

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження особливостей процесу деградації сонячних панелей в  
результаті збільшення їх потенціалу»

Виконав

\_\_\_\_\_

(підпис)

Міралі ІБРАГІМОВ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЕТЕС 2401м

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олена ДОВЖИК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

**Андрій ЧЕПІЖНИЙ**

«5» вересня 2024 року

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу

**Міралі ІБРАГІМОВ**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження особливостей процесу деградації сонячних панелей в результаті збільшення їх потенціалу.
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент.
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: паспортні дані обладнання, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1. Теоретичні основи деградації сонячних панелей. 2. Вплив деградації на ефективність сонячних панелей. 3. Дослідження впливу збільшення потенціалу на деградацію. 4. Охорона праці. 5. Економічне обґрунтування. Висновки та пропозиції. Список використаної літератури.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Андрій ЧЕПІЖНИЙ**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Міралі ІБРАГІМОВ**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Збір інформації про особливості деградації сонячних панелей	до 02.08.2025 р.	
2	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 1. Теоретичні основи деградації сонячних панелей»	до 30.08.2025р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 2. Вплив деградації на ефективність сонячних панелей»	до 19.09.2025 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 3. Дослідження впливу збільшення потенціалу на деградацію»	до 03.10.2025 р.	
8	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
10	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_

(підпис)

Міралі ІБРАГІМОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

**Ібрагімов Міралі Ельшанович** «Дослідження особливостей процесу деградації сонячних панелей в результаті збільшення їх потенціалу».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025

У ході виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження процесів деградації сонячних панелей, спричинених збільшенням їх електричного потенціалу. Розглянуто теоретичні основи деградації сонячних панелей. Проаналізовано сутність поняття «деградація», описано її фізико-хімічні механізми та наведено типи пошкоджень.

Досліджено вплив деградаційних процесів на енергетичну ефективність фотоелектричних систем. Визначено, що навіть незначне зменшення коефіцієнта перетворення може призвести до суттєвих втрат у виробництві електроенергії протягом усього життєвого циклу панелей.

Проведено аналіз впливу підвищення електричного потенціалу на деградаційні процеси. Встановлено, що збільшення напруги в системі може спричинити посилення ефектів деградації. Наведено експериментальні результати, що підтверджують кореляцію між рівнем потенціалу, кліматичними умовами та швидкістю старіння матеріалів.

В роботі підкреслено необхідність дотримання вимог електричної, механічної, пожежної та експлуатаційної безпеки. Раціональне проектування сонячних установок забезпечує стабільну роботу системи й захищає персонал та навколишнє середовище від потенційних аварійних ситуацій. Розглянуто економічні наслідки деградації та можливі технологічні підходи до її зниження.

**Ключові слова:** сонячна панель, деградація, струм, вольт-амперна характеристика, покриття, деламінація, вимірювання, строк служби.

## ABSTRACT

**Ibragimov Mirali Elshanovich** «Study of the features of the degradation process of solar panels as a result of increasing their potential».

Qualification work for the degree of Master of Science in Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics under the educational program «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics» in specialty 141 «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics». Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025

During the thesis, a comprehensive study of the degradation processes of solar panels caused by an increase in their electrical potential was conducted. The theoretical foundations of the degradation of solar panels were considered. The essence of the concept of «degradation» was analyzed, its physicochemical mechanisms were described, and types of damage were given.

The influence of degradation processes on the energy efficiency of photovoltaic systems was studied. It was determined that even a slight decrease in the conversion coefficient can lead to significant losses in electricity production throughout the life cycle of the panels.

The influence of an increase in electrical potential on degradation processes was analyzed. It is established that an increase in the voltage in the system can cause an increase in the effects of degradation. Experimental results are presented, confirming the correlation between the potential level, climatic conditions and the rate of aging of materials.

The paper emphasizes the need to comply with the requirements of electrical, mechanical, fire and operational safety. Rational design of solar installations ensures stable operation of the system and protects personnel and the environment from potential emergencies. The economic consequences of degradation and possible technological approaches to its reduction are considered.

**Keywords:** solar panel, degradation, current, current-voltage characteristic, coating, delamination, measurement, service life.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДЕГРАДАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	9
1.1 Загальна інформація про деградацію сонячних панелей.....	9
1.2 Типи деградації сонячних панелей.....	9
1.3 Механізми деградації.....	11
1.4 Вплив факторів на деградацію сонячних панелей.....	13
1.5 Методи оцінки деградації.....	13
Висновки до розділу.....	21
2 ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	22
2.1 Зниження виходу енергії.....	22
2.2 Тривалість служби сонячних панелей.....	24
2.3 Технологічні рішення для зменшення деградації.....	27
Висновки до розділу.....	37
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗБІЛЬШЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ НА ДЕГРАДАЦІЮ.....	38
3.1 Експериментальні методи.....	38
3.2 Результати дослідження.....	40
3.3 Перспективи досліджень у галузі деградації сонячних панелей.....	49
Висновок до розділу.....	51
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	52
Висновки до розділу.....	54
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	55
Висновки до розділу.....	56
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	59
ДОДАТКИ.....	62

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Зараз все більше людей звертають увагу на відновлювані джерела енергії. У цьому аспекті сонячна енергія відіграє важливу роль. Сонячні панелі є одними з найважливіших у фотоелектричних системах. Вони перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію. При цьому без викиду шкідливих речовин у навколишнє середовище. З часом ефективність цих пристроїв поступово знижується. Це явище називається деградацією. Деградація впливає на низку факторів. Таких як: продуктивність, надійність і тривалість експлуатації.

Сонячна енергетика займає одне із перших місць у напрямку відновлюваної енергетики. Фотоелектричні модулі перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію. Але сонячні панелі схильні до старіння та деградації. Сонячні панелі це об'єднання фотоелектричних перетворювачів. Вони прямо перетворюють сонячну енергію в постійний електричний струм. Це відрізняється від сонячних колекторів. Колектори нагрівають сам матеріал яким слугує теплоносієм. Виробництво фотоелектричних елементів і сонячних колекторів розвивається в різних напрямках. Сонячні панелі бувають вбудовані у мікрокалькулятори або займають дахи будинків. До складу сонячної електростанції входить одна або більше сонячних панелей та інвертор. В деяких випадках ще використовують акумулятори і сонячні трекери.

Актуальність теми дослідження спричинена необхідністю підвищення довговічності сонячних панелей. Ще вона викликана щоб зменшити витрати електроенергії. Вивченню впливу потенціалу елементів сонячної панелі ми приділяємо високу увагу. Та засвоєнню цього впливу на швидкість та характер їх деградації. Збільшення напруги призводить до появи додаткових струмів витоку, локального нагрівання та пошкодження структури фотоелектричних елементів.

*Аналіз стану наукової розробки проблеми.* Дослідження сонячної енергетики є одним з актуальних питань та проблем світу. Особливу увагу

науковців привертають процеси експлуатації, а в тому числі і процеси деградації сонячних панелей.

**Мета та задачі досліджень.** Метою дослідження є визначення особливостей процесу деградації сонячних панелей в результаті збільшення їх потенціалу, що дозволяє підвищити ефективність роботи сонячних електростанцій.

Для вирішення поставленої мети дослідження необхідною умовою є вирішення ряду задач:

1. Визначити особливості виникнення процесів деградації сонячних панелей та визначити основні фактори впливу на процеси деградації.
2. Проаналізувати основні методи визначення процесів деградації сонячних панелей.
3. Запропонувати основні методи боротьби з процесами деградації сонячних панелей.
4. Провести економічну оцінку та навести заходи з охорони праці.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є процеси деградації сонячних панелей в результаті збільшення їх потенціалу.

**Предмет дослідження.** Основні фактори, що впливають на збільшення процесів деградації сонячних панелей.

**Завдання дослідження.** Визначити особливості деградації сонячних панелей в умовах Сумської області.

**Методи дослідження.** Під час проведення досліджень нами використовувались аналітичні методи та експериментальні. При цьому застосовувалось обладнання для проведення експериментального дослідження процесу деградації.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота містить 5 розділів, 2 додатки, 3 таблиці, 7 рисунків, 22 джерела.

# **1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДЕГРАДАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ**

## **1.1 Загальна інформація про деградацію сонячних панелей**

Деградація сонячних панелей поступово призводить до зниження їх продуктивності. Це явище спричинено рядом фізичних, хімічних, електричних або механічних процесів. Такі зміни відбуваються весь час, поки працюють сонячні панелі. Деградація – це коли панелі поступово втрачають здатність нормально перетворювати сонячне світло на електрику. Через це зменшується їхня потужність і ефективність, а втрат енергії стає більше.

Згідно з міжнародними стандартами деградація фотоелектричних модулів вважається природним процесом. Цей процес відбувається протягом усього життєвого циклу панелі. Однак інтенсивність цього процесу залежить від великої кількості умов. Наприклад якості матеріалів, технології виготовлення, умов експлуатації та зовнішніх впливів. Показником деградації є щорічна втрата потужності. Для більшості кремнієвих сонячних панелей втрата потужності становить приблизно 0,5-0,8% на рік. У разі несприятливих умов (перегрів, вологість, ультрафіолетове випромінювання, підвищений потенціал і т. ін.) ця величина може збільшуватися.

Також деградація є наслідком порушення структури напівпровідникових матеріалів і зміни властивостей контактів, зниження прозорості захисного скла або полімерного шару. Деградації пасивуючих шарів з часом втрачають свої ізоляційні властивості.

Деградація сонячних панелей поєднує процеси старіння матеріалів, які спричинені внутрішніми фізико-хімічними змінами і зовнішніми експлуатаційними факторами.

## **1.2 Типи деградації сонячних панелей**

Деградацію ділять на кілька типів за тим, як вона проявляється і що її викликає. Виходячи з цього деградацію розподіляють на наступні типи:

- Фізична деградація. Цей тип деградації спричинений фізичним псуванням матеріалів панелі. Наприклад, тріщини на кремнієвих пластинах, мікротріщини чи деформація скла або рамки. Температурні перепади змушують матеріали розширюватися й стискатися, через що рвуться контакти або відшаровуються захисні шари (EVA-плівка). Це погіршує герметичність, і волога може проникати всередину.

- Хімічна деградація. Основною причиною даного типу деградації є хімічні реакції, які псують панель. Наприклад, металеві контакти окислюються через вологу чи кисень, а полімери руйнуються від ультрафіолету, втрачаючи міцність і прозорість. Корозія шин і з'єднань підвищує опір, що знижує ефективність.

- Електрична деградація. Дана деградація виникає через проблеми з електрикою: високі напруги, струми витoku чи електростатичні розряди. Наприклад, потенціально індукована деградація (PID), що виникає коли іони (часто натрій) під напругою псують фотоелементи, знижуючи потужність. Або перегрів контактів через надлишковий струм, що прискорює старіння.

- Оптична деградація. Даний тип деградації пояснюється погіршенням пропускання світла до фотоелементів. EVA-плівка може пожовтіти чи потемніти, скло втрачає прозорість, а антиблікове покриття зношується. Усе це зменшує кількість світла, що доходить до фотоелементів, а отже виробленої енергії.

- Деградація від навколишнього середовища. Погодні умови теж спричиняють певні процеси деградації. Ультрафіолет руйнує полімери, волога викликає корозію, пил і бруд заважають світлу потрапляти на панель, а перепади температур призводять до тріщин.

Основні особливості процесу деградації сонячних панелей можна зобразити графічно (рис.1.1).

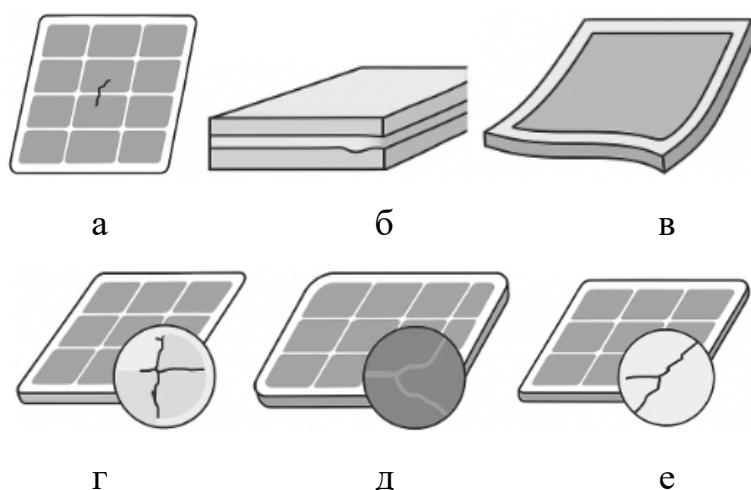


Рисунок 1.1 – Приклади деградації сонячних панелей

Усе це пов'язано: хімічні зміни можуть посилювати електричні проблеми, фізичні пошкодження пропускають вологу, а електричні перенапруги прискорюють знос. Якщо розібратися, як це працює, можна знайти способи зменшити деградацію і зробити панелі довговічнішими.

### 1.3 Механізми деградації

Сонячні панелі з часом втрачають ефективність через різні процеси – фізичні, хімічні, електричні. Вони псуєть матеріали й знижують продуктивність. Ось основні механізми, які це викликають, розказані простою мовою:

- **Фотоіндукована деградація (LID)**. Це коли панелі тільки починають працювати, і сонячне світло «будить» дефекти в кремнії. Домішки бору й кисню утворюють проблемні зони, які заважають електронам рухатися. Через це панель втрачає 1-3 % потужності на старті. Але після нагріву чи певного часу частина цих втрат може відновитися.

- **Потенціально індукована деградація (PID)**. Дуже підступна штука. Якщо між фотоелементами й заземленням виникає велика різниця напруги, іони натрію зі скла чи захисної плівки починають «гуляти» до кремнію. Це викликає струми витоку й псує ізоляцію. У гіршому випадку панель може втратити до 30% потужності, з'являються «гарячі точки», і деградація йде нерівномірно.

- **Термічна деградація.** Виникає під дією високих температур або їх перепадів. Матеріали постійно розширюються й стискаються, через що з'являються мікротріщини. Спека також прискорює хімічне старіння пластику й окиснення контактів. У підсумку панель гірше ізолює, зростає опір, падає вихідний струм.

- **Вологісно-індукована деградація (HID).** Волога просочується через тріщини чи пошкодження й викликає корозію контактів. Це послаблює ізоляцію, може навіть призвести до коротких замикань. Як результат – окислені електроди й зіпсовані з'єднання.

- **Фототермічна деградація.** Виникає у випадках коли світло й тепло діють разом, особливо в спекотних регіонах. Сонячні промені й висока температура руйнують захисні шари (EVA-плівку), бо молекули в них рвуться. Плівки темніють, скло стає менш прозорим, а панель перегрівается.

- **Електроміграція.** Це коли електричний струм змушує атоми металу (срібла чи алюмінію) «мігрувати» в провідниках. Через це контактні доріжки псується, опір зростає, а струм розподіляється гірше. У підсумку – обриви контактів і зниження ефективності.

Усі ці процеси псують панелі по-різному, але разом вони знижують їх продуктивність.

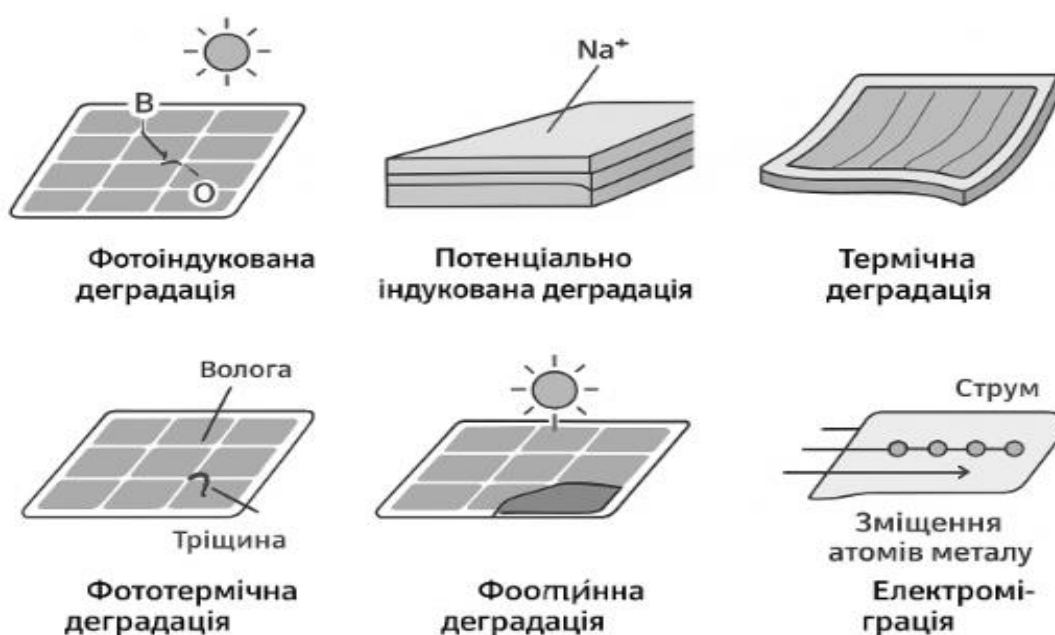


Рисунок 1.2 – Механізми деградації сонячних панелей

## **1.4 Вплив факторів на деградацію сонячних панелей**

Сонячні панелі з часом втрачають ефективність – це складний процес, на який впливає купа факторів: від погоди до якості матеріалів.

Температура – один із головних ворогів. Спекта прискорює старіння пластикових шарів, які тримають панель герметичною. А перепади температур змушують матеріали (скло, кремній, алюмінієва рамка) розширюватися й стискатися по-різному. Через це з'являються мікротріщини, падає провідність, а іноді виникають гарячі точки, де панель перегрівається.

Волога просочується через мікротріщини чи слабкі місця в герметизації, викликає корозію контактів і руйнує пластик. Це погіршує ізоляцію, робить захисні шари менш прозорими, і, як наслідок, панель видає менше енергії.

Ультрафіолет (УФ) повільно розкладає полімери, через що EVA-плівка жовтіє, стає крихкою і тріскається. Це зменшує кількість світла, яке доходить до фотоелементів, і знижує ККД.

Якщо між панеллю й заземленням виникає різниця напруги, може початися потенціально індукована деградація (PID). Іони в матеріалах починають рухатися, що призводить до витоку струму й падіння напруги.

Пил, пісок, сажа чи сіль (особливо біля моря) сідають на поверхню, блокують світло й викликають нерівномірний нагрів. Це може спричинити «гарячі точки».

Вітер, град, сніг чи кривий монтаж можуть викликати мікротріщини, які з часом розгерметизують панель.

Якість матеріалів і виробництва має величезне значення. Якщо використовують дешеве скло, погану EVA-плівку чи неправильно ламінують, панель може почати псуватися вже в перші роки.

## **1.5 Методи оцінки деградації**

Оцінювання деградації сонячних панелей є необхідною складовою технічного моніторингу фотоелектричних систем. Це дозволяє визначити швидкість старіння модулів, своєчасно виявити дефекти та запобігти

подальшому зниженню ефективності системи. Існує кілька підходів до визначення деградації. Ці підходи базуються на аналізі електричних, термічних і візуальних характеристик.

Найбільш поширеним є метод порівняння потужності або річного показника деградації. Для цього вимірюють вихідну потужність панелі через певні проміжки часу. Порівнюють її зі значенням, отриманим одразу після встановлення. На основі цих даних обчислюють відсоток зниження потужності на рік. У промисловій практиці прийнято вважати, що нормальна деградація не перевищує 0,7 % на рік.

Для глибшого аналізу використовують вимірювання вольт-амперної характеристики (I–V). Вона дозволяє визначити зміну таких параметрів: струм короткого замикання, напруга холостого ходу, напруга та струм у точці максимальної потужності, заповнення робочої області. Будь-які відхилення від номінальних значень свідчать про наявність внутрішніх дефектів або процесів деградації.

Крім електричних вимірювань, ще застосовується інфрачервона термографія. Вона дає змогу оцінити розподіл температури на поверхні панелі. Локальні зони перегріву (гарячі точки) свідчать про пошкодження елементів або з'єднань. Це призводить до втрати ефективності. Цей метод є особливо корисним при експлуатації великих фотоелектричних станцій. Оскільки дозволяє швидко виявляти дефектні модулі без необхідності демонтажу.

Важливим інструментом є також електролюмінесцентна (EL) діагностика. Вона дозволяє виявляти приховані дефекти. Наприклад, мікротріщини в кремнієвих осередках, порушення контактів чи деградацію пасиваційних шарів. Застосування цього методу дає можливість оцінити якість панелей ще на етапі виробництва або після транспортування.

Візуальні інспекції залишаються базовим методом контролю стану панелей. Вони дозволяють швидко визначити механічні пошкодження, потемніння матеріалів, корозію, забруднення або деламінацію. Регулярний візуальний контроль дає повну картину технічного стану системи.

Зараз більшого значення набувають спектральні та фотолюмінесцентні методи. Вони дають змогу досліджувати зміну оптичних властивостей матеріалів і структури напівпровідників. Їх застосовують переважно у наукових дослідженнях та лабораторній діагностиці для оцінки глибоких фізико-хімічних процесів деградації.

Точна оцінка деградації можлива лише за умови комплексного підходу. Він поєднує візуальний контроль, електричні вимірювання, термографію та лабораторні методи аналізу. Це дозволяє не лише виявити факт старіння, а й встановити його першопричини. Це є ключовим для підвищення надійності та довговічності фотоелектричних систем.

**Візуальні інспекції.** Візуальні інспекції є одним із найпростіших, найдоступніших і водночас найважливіших методів оцінювання технічного стану сонячних панелей. Вони застосовуються на етапі виробництва. Також під час транспортування, монтажу та експлуатації фотоелектричних систем. Метою цього методу є своєчасне виявлення зовнішніх ознак деградації. Вони можуть свідчити про внутрішні дефекти або порушення технологічних процесів.

Основою візуальної інспекції є ретельний огляд поверхні панелі за допомогою людського ока, оптичних приладів або спеціальних засобів контролю. Наприклад портативні мікроскопи, ультрафіолетові лампи чи цифрові камери високої роздільності. Під час такого огляду оцінюють загальний стан конструкції і локальні пошкодження на різних її елементах.

Найбільш поширеними дефектами є:

1. Механічні пошкодження скла або рамки. Це тріщини, сколи, подряпини, відшарування фарби. Вони можуть призвести до порушення герметичності модуля та подальшого проникнення вологи.

2. Пожовтіння або потемніння EVA-плівки. Це свідчить про фотостаріння полімерів, що зменшує прозорість шару.

3. Деламінація. Це відшарування шарів панелі (скло-EVA-елементи-задня плівка). Цей процес спричинює утворення повітряних порожнин. Вони знижують механічну міцність і створюють зони підвищеної температури.

4. Корозія контактів та шин. Зазвичай вона зумовлена потраплянням вологи. Корозійні процеси збільшують електричний опір і знижують ККД панелі.

5. Пожовтіння або обвуглення задньої плівки. Це ознака перегріву, надлишкового струмового навантаження або тривалого впливу ультрафіолетового випромінювання.

6. Забруднення поверхні. Призводить до локального зменшення освітлення елементів і можуть спричинити появу «гарячих точок».



Рисунок 1.3 – Дефекти при візуальних інспекціях

Огляд слід проводити при денному або рівномірному штучному освітленні. Це потрібно щоб уникнути тіней і відблисків. Вони можуть приховати дрібні дефекти. Оптимально здійснювати інспекцію не рідше ніж один раз на півроку Також після сильних опадів, граду або технічного обслуговування системи.

Крім зовнішнього огляду панелей, важливо перевіряти механічну цілісність монтажної системи. Це кріплення, кабельні з'єднання, герметизацію вводів та стан інверторів. Часто деградація або пошкодження панелі є наслідком саме механічних порушень у конструкції кріплення чи електричних з'єднаннях.

Візуальні інспекції відіграють ключову роль у профілактиці деградаційних процесів. Це дозволяє виявити проблеми ще на початковій стадії. Наприклад, невелика тріщина на склі чи задній плівці може з часом призвести до значного зниження продуктивності через проникнення вологи або утворення електричних витоків.

Результати інспекції фіксуються у технічному журналі обстеження. Там зазначаються тип дефекту, його локалізація, площа пошкодження та можливі наслідки. За потреби проводиться фотодокументування. Воно дозволяє відстежувати динаміку змін у часі.

Систематичне проведення візуальних інспекцій є одним із найефективніших методів раннього виявлення деградації сонячних панелей. Це забезпечує продовження терміну їхньої служби. Також забезпечує підвищення надійності роботи всієї системи та зменшення витрат на обслуговування.

**Електричні вимірювання.** Електричні вимірювання є ключовим інструментом для кількісної оцінки стану та ефективності сонячних панелей. На відміну від візуальних інспекцій електричні методи дозволяють визначити внутрішні процеси деградації. Саме вони забезпечують можливість оцінити ступінь втрати потужності і появу прихованих дефектів та зміни характеристик фотоелементів у часі.

Основними показниками є:

- Відкрито-ланцюгове напруження ( $V_{oc}$ ) – характеризує максимальну напругу, яку панель може забезпечити без навантаження. Зниження  $V_{oc}$  може свідчити про деградацію напівпровідникових шарів або пошкодження контактів.

- Струм короткого замикання ( $I_{sc}$ ) – визначає максимальний струм, що модуль може виробляти при КЗ. Його зменшення зазвичай пов'язане з дефектами у з'єднаннях, деградацією поверхні або забрудненням скла.

- Максимальна потужність ( $P_{max}$ ) – основний критерій ефективності панелі. Поступове зменшення цього параметра є прямим показником деградації.

- Фактор заповнення (Fill Factor, FF) – показує якість фотоелементів і внутрішні втрати енергії. Зменшення FF часто свідчить про зростання внутрішнього опору або появу мікротріщин.

- Коефіцієнт деградації (Degradation Rate) – відносна зміна потужності за певний період експлуатації. Дозволяє прогнозувати залишковий ресурс панелі.

Для вимірювань зазвичай використовуються:

- Метод вольт-амперних характеристик (ВАХ). Це базовий метод, що дозволяє побудувати графік залежності струму від напруги при різних рівнях освітлення. Аналіз форми ВАХ дає змогу виявити приховані дефекти. Наприклад, зниження струму насичення або підвищення серійного опору.

- Метод електролюмінесценції (EL-тест). Під час тесту панель підключається до джерела постійного струму, що змушує фотоелементи випромінювати світло у ближньому інфрачервоному діапазоні. Камера з інфрачервоним фільтром фіксує зображення. Темні зони відповідають дефектним або деградованим ділянкам. Це один із найточніших способів виявлення мікротріщин та деградації через потенціальну індукцію (PID).

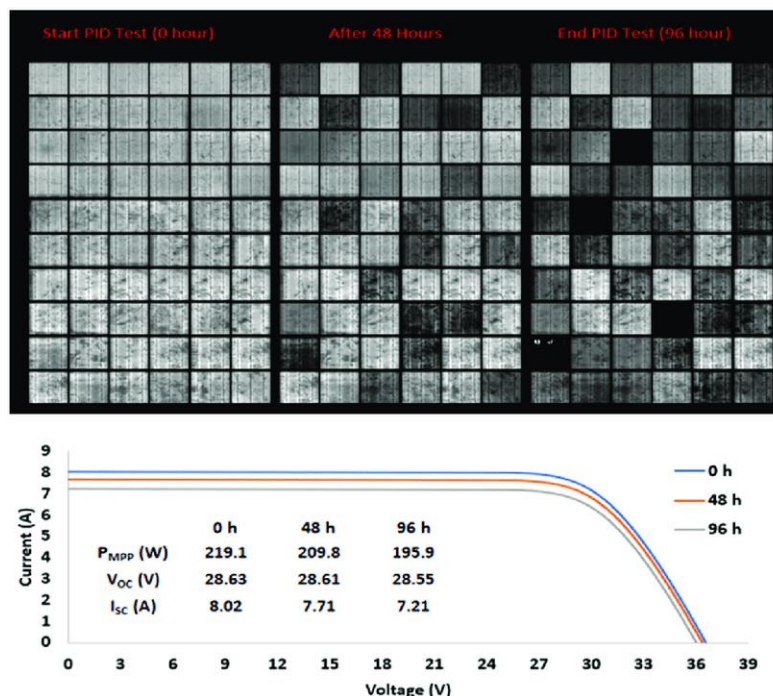


Рисунок 1.4 – Фотоелектричний модуль до та після PID-тесту

- Метод електроакустичних вимірювань. Дозволяє дослідити локальні області підвищеного опору. Вони утворюються внаслідок деградаційних процесів у кристалі кремнію або на межі контакту.

- Моніторинг опору ізоляції. Важливий параметр для запобігання витокам струму та потенційно небезпечним ситуаціям. Зниження опору ізоляції може свідчити про проникнення вологи або пошкодження захисного шару.

- Аналіз температурної залежності електричних параметрів. Дозволяє оцінити, як деградація впливає на стабільність роботи панелі при зміні температури. Наприклад, зростання серійного опору може призводити до підвищення температури елементів і подальшого прискорення деградації.



Рисунок 1.5 – Методи електричних вимірювань деградації сонячних панелей

Регулярне проведення електричних вимірювань забезпечує повну діагностичну картину стану сонячних панелей. Це дозволяє своєчасно виявити проблеми. Також це дозволяє прийняти рішення щодо їх усунення. Електричні вимірювання є невід'ємною частиною процесу моніторингу. Це сприяє продовженню строку служби сонячних панелей, підвищенню ефективності генерації енергії та економічній доцільності експлуатації фотоелектричних систем.

**Термографічні дослідження.** Термографічні дослідження є одним із найефективніших методів безконтактної діагностики стану сонячних панелей. Цей метод базується на використанні інфрачервоного випромінювання. Воно дозволяє візуалізувати розподіл температур по поверхні панелі та виявити приховані дефекти. Ці дефекти не можуть бути помічені під час звичайного візуального огляду чи навіть електричних вимірювань.

Принцип роботи термографічного методу. Будь-який об'єкт із температурою вище абсолютного нуля випромінює теплову енергію в інфрачервоному діапазоні. За допомогою тепловізора (інфрачервоної камери)

можна виміряти інтенсивність цього випромінювання. Потім перетворити його у візуальне зображення та визначити локальні аномалії температури.

У сонячних панелях ці аномалії вказують на: «гарячі точки» (hot spots) – ділянки з підвищеною температурою, що виникають через пошкодження комірок, часткове затінення або внутрішні дефекти. Нерівномірний розподіл температури, який може бути спричинений деградацією з'єднань, неякісною пайкою або старінням матеріалів. Підвищену температуру контактних коробок і з'єднувачів, що може свідчити про перевантаження або корозію контактів. Витік струму на землю іноді проявляється у вигляді локальних зон перегріву біля країв панелі або на задній поверхні.

Процедура проведення термографічного контролю:

- Підготовка системи. Перевіряють справність обладнання. Проводять очищення поверхні панелей від пилу та забруднень. Можуть спотворити результати вимірювань.

- Проведення зйомки. Оптимальні умови – ясна погода з рівномірним сонячним освітленням (не менше  $600 \text{ Вт/м}^2$ ). Зйомка може проводитись на землі і з використанням безпілотних літальних апаратів (дронів). Це дозволяє швидко обстежити великі площі.

- Аналіз термограм. Отримані зображення аналізуються спеціальним програмним забезпеченням. На них чітко видно ділянки з аномальною температурою. Підвищення температури на  $5\text{-}10^\circ\text{C}$  порівняно з сусідніми комірками може бути ознакою деградації або пошкодження.

- Інтерпретація результатів. Термографічні дані порівнюються з електричними вимірюваннями для підтвердження наявності дефектів. Виявлені «гарячі точки» зазвичай корелюють із зниженням локальної продуктивності модуля.

Перевагами термографічного методу є безконтактність і безпека не потребує відключення системи чи фізичного доступу до панелей. За допомогою дронів можна обстежити сонячну електростанцію площею кілька гектарів за лічені години.

Даний метод дозволяє виявити дефекти до того, як вони спричинять значну втрату потужності. Термограма дає чітке уявлення про розташування і масштаби проблемної ділянки.

До типових термографічних дефектів сонячних панелей входять локальні гарячі точки які спричинені пошкодженням фотоелемента або затіненням. Рівномірне підвищення температури свідчить про погіршення теплопровідності задньої плівки або старіння EVA-шару. Нагрівання з'єднувальних коробок може бути результатом високого контактного опору чи неправильної пайки. Асиметричний розподіл температури вказує на деградацію окремих комірок або ділянок ланцюга.

У практиці експлуатації фотоелектричних систем термографічні дослідження зазвичай проводяться: під час приймально-здавальних випробувань нових станцій; періодично (1-2 рази на рік) у рамках планового технічного обслуговування; після стихійних лих (граду, буревію, сильної спеки); при появі аномальних показників генерації електроенергії.

### **Висновки до розділу**

Проаналізовано сутність поняття «деградація», описано її фізико-хімічні механізми та наведено типи пошкоджень. Вони спостерігаються під час експлуатації від поступового зменшення ефективності до утворення мікротріщин, корозії контактів та втрати прозорості покриття. Встановлено, що основними чинниками деградації є вплив ультрафіолетового випромінювання, температурних циклів, підвищеної вологості, електричних навантажень та зовнішнього середовища.

## 2 ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

### 2.1 Зниження виходу енергії

Одним із найочевидніших та найважливіших наслідків деградації сонячних панелей є зменшення їх здатності виробляти електроенергію. Це явище має фізичну і економічну складову. Навіть незначне річне зниження ефективності призводить до значних втрат енергії та прибутку протягом усього життєвого циклу системи.

У нормальних умовах експлуатації сонячні панелі піддаються впливу зовнішніх чинників: сонячного випромінювання, коливань температури, вологи, пилу, механічних навантажень, електричних перенапруг тощо. З часом це спричиняє поступову зміну фізико-хімічних властивостей матеріалів.

Ключовим наслідком цих змін є зниження ефективності перетворення сонячної енергії у електричну (зменшення ККД). Зниження ККД відбувається через деградацію напівпровідникових шарів. У кристалічному кремнії накопичуються дефекти ґратки, що знижують концентрацію носіїв заряду. Також пошкодження металевих контактів і струмопровідних доріжок, які збільшують внутрішній опір. Через зменшення прозорості переднього скла або полімерного шару, знижується кількість світла, яке потрапляє на фотоелементи.

Згідно з технічними паспортами провідних виробників щорічна деградація потужності для кремнієвих панелей становить:

- 0,25-0,45 %/рік для монокристалічних PERC-модулів;
- 0,5-0,8 %/рік для полікристалічних модулів;
- 1,0-1,5 %/рік для тонкоплівкових CdTe або a-Si модулів.

При цьому перший рік експлуатації зазвичай характеризується первинною деградацією. Коли потужність падає на 1-3 % через стабілізацію структури кремнію під дією освітлення.

Часті цикли нагрівання й охолодження призводять до термомеханічних напружень. Висока температура (> 60°C) зменшує напругу холостого ходу. Це

знижує вихідну потужність. Волога, що потрапляє у внутрішні шари панелі, викликає корозію контактів і розшарування ламінату. Тривалий вплив UV-променів руйнує полімерні шари. Це викликає їх пожовтіння, яке знижує пропускну здатність світла. За наявності високого потенціалу між панелями і землею частина електронів мігрує через ізоляційні шари. Це утворює струм витоку, який знижує напругу і вихідну потужність. Осідання пилу, сажі або пташиного посліду знижує кількість світла, яке потрапляє на комірки. За відсутності регулярного очищення втрати енергії можуть досягати 5-10 %.

Процес зниження енергетичного виходу відбувається поступово. Якщо початкова потужність модуля  $P_0 = 400$  Вт, то при середній деградації 0,7 %/рік отримаємо дані, що наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Динаміка втрат потужності протягом життєвого циклу

Рік експлуатації	Потужність, Вт	Відносна потужність, %
0	400	100
5	386	96,5
10	373	93,3
20	348	87
25	334	83,5

Таким чином, за 25 років експлуатації втрати становлять близько 16-17 %, що еквівалентно кільком рокам бездіяльності системи у масштабах станції.

Втрати потужності окремих панелей мають кумулятивний ефект у межах всієї фотоелектричної системи. Для станції потужністю 1 МВт навіть зниження ефективності на 0,5 % означає недоотримання близько 5 МВт·год електроенергії на рік. Це еквівалентно річному споживанню енергії кількох домогосподарств.

У великих промислових сонячних електростанціях такі втрати можуть обчислюватися десятками тисяч доларів на рік. Це підкреслює необхідність постійного моніторингу та профілактичних заходів для мінімізації деградаційних процесів.

Зниження виходу енергії – це комплексний результат взаємодії фізичних, хімічних і електричних процесів. Ці процеси відбуваються впродовж усього

життєвого циклу сонячних панелей. Втрата потужності на рівні 0,5-1 % на рік здається незначною. За десятиліття ця втрата перетворюється на суттєву.

Для забезпечення стабільної ефективності необхідно впроваджувати регулярні діагностичні перевірки. Термографічні дослідження і очищення поверхонь. Також потрібно використовувати панелі з антипідід-покриттям (PID-resistant) і покращеними матеріалами герметизації.

## **2.2 Тривалість служби сонячних панелей**

Тривалість служби сонячних панелей визначається періодом протягом якого вони зберігають здатність генерувати електроенергію з прийнятним рівнем ефективності. Вона безпосередньо залежить від швидкості деградації фотоелементів, стабільності матеріалів, умов експлуатації та якості монтажу. У середньому сучасні сонячні панелі здатні функціонувати від 25 до 30 років, а за сприятливих умов – навіть до 40 років.

Однак цей показник не є постійним. З роками у конструкції модуля відбуваються поступові процеси старіння, зміни в структурі напівпровідникових шарів, корозія контактів, ослаблення герметичності, руйнування полімерних матеріалів та окиснення провідників. У результаті панель втрачає частину своєї потужності. Це відображається на загальному виході електроенергії.

Загальні закономірності зниження ефективності з часом. На початковому етапі роботи спостерігається явище первинної деградації, або LID (Light Induced Degradation). Воно пов'язане з перебудовою структури кристалічного кремнію після першого впливу сонячного випромінювання. Після цього панель стабілізує свої характеристики, і подальше зниження потужності відбувається повільніше (приблизно на 0,5-0,8 % щорічно). Якщо умови експлуатації є сприятливими, то через 25 років панель зберігає 80-85 % початкової потужності. Водночас у суворих кліматичних регіонах втрати досягають 20-25 % за той самий період.

Таблиця 2.3 – Динаміка зниження потужності протягом експлуатації

Період експлуатації	Середній рівень потужності	Основні процеси деградації
0–1 рік	98–99 %	Первинна деградація (LID), стабілізація кристалічної структури
2–10 років	92–95 %	Початок PID-ефекту, термічне старіння, зміни оптичних властивостей скла
10–20 років	85–90 %	Розшарування ламінату, корозія контактів, механічне зношення
20–30 років	75–85 %	Втрата герметичності, зниження прозорості покриття, старіння полімерів

Як видно з таблиці 2.3, більшість деградаційних процесів відбуваються поступово. Тому навіть після 30 років експлуатації сонячні панелі можуть залишатися працездатними. Однак їхня економічна ефективність поступово знижується, і система потребує модернізації або часткової заміни модулів.

Висока температура сприяє прискоренню термічного старіння, розширенню матеріалів і утворенню мікротріщин у фотоелементах. У регіонах із підвищеною вологістю можливе проникнення пари всередину модуля. Це призводить до корозії контактів і порушення ізоляції. Ультрафіолетове випромінювання поступово руйнує захисні полімерні шари, роблячи їх ламкими та менш прозорими.

Панелі, виготовлені з високочистого кремнію, зі стабільними пасивуючими шарами та якісною ламінацією, характеризуються набагато повільнішим старінням. Натомість дешеві матеріали з нестабільним EVA-шаром або неякісним фторполімерним покриттям можуть почати розшаровуватися вже через кілька років роботи.

Неправильне кріплення, надмірна жорсткість конструкції або нерівномірний розподіл навантаження під час вітру чи снігу спричиняють утворення мікротріщин. Навіть невидимі тріщини можуть призвести до локального перегріву комірок і прискореного старіння модулів.

Пил, листя, пташиний послід і промислові відкладення утворюють тіньові ділянки, що викликають нерівномірне нагрівання поверхні. У цих місцях

виникають «гарячі точки», які поступово пошкоджують кремнієві осередки, знижуючи загальну ефективність панелі.

Перенапруга, неправильне заземлення або підвищений потенціал між панелями і землею спричиняють явище PID (Potential Induced Degradation). Воно може знизити продуктивність системи на 20-30 % за кілька років.

Збільшити тривалість роботи сонячних панелей можна шляхом застосування комплексних технічних і експлуатаційних заходів:

- Використання антиперешкодних покриттів і захисних шарів від PID-ефекту.
- Забезпечення надійного заземлення і стабільної напруги в системі.
- Регулярне очищення поверхні панелей та контроль стану контактних з'єднань.
- Застосування термографічних перевірок для виявлення дефектів до моменту їхнього поширення.
- Використання систем моніторингу в реальному часі, які дозволяють фіксувати зміни вихідної потужності, температури й опору.

У сучасній промисловій практиці дедалі частіше застосовуються модулі з подвійним склінням, заміною полімерних плівок на скло та більш стійкими алюмінієвими рамками, що істотно збільшує довговічність систем.

Тривалість служби сонячних панелей є одним із ключових показників їхньої надійності та економічної доцільності. Незважаючи на поступове зниження потужності, сучасні технології дозволяють експлуатувати якісні фотомодулі протягом кількох десятиліть без суттєвих втрат ефективності. Систематичний контроль, дотримання технічних вимог і своєчасне технічне обслуговування здатні продовжити життєвий цикл панелей до 35-40 років. Це суттєво підвищує загальну рентабельність фотоелектричних станцій та зменшує витрати на енергетичну інфраструктуру.

### 2.3 Технологічні рішення для зменшення деградації

Деградація сонячних панелей це неминучий процес, який проявляється поступовим зниженням їх ефективності під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. Проте сучасна інженерна практика й розвиток матеріалознавства дозволяють значно уповільнити цей процес. Основне завдання технологічних рішень полягає у підвищенні вихідної потужності й у збереженні стабільності параметрів панелей протягом десятиліть експлуатації.

Для досягнення цього виробники застосовують комплексні заходи покращення матеріалів, герметизацію, терморегуляцію та впровадження інтелектуальних систем контролю. Такий підхід забезпечує стабільну генерацію енергії й продовжує життєвий цикл фотомодулів. Це робить інвестиції у сонячну енергетику економічно доцільнішими.

Одним із ключових напрямів удосконалення є покращення структури фотоелементів. Традиційні кристалічні комірки поступово замінюються більш стабільними технологіями. Удосконалені варіанти кремнієвих елементів із пасивуючими шарами або гетеропереходами дають змогу знизити втрати енергії. Такі структури краще витримують вплив високих температур, різких перепадів вологості й тривалого опромінення. Це безпосередньо сповільнює деградацію.

Не менш важливою складовою є захист від потенційно індукованої деградації (PID). Цей ефект виникає тоді, коли між панеллю та землею утворюється небажаний потенціал. Це спричиняє витік струму та руйнування структури комірок. Для усунення цього явища використовуються спеціальні покриття з високим електричним опором. Вони мінімізують струми витоку. В конструкції панелей застосовують матеріали з поліпшеною діелектричною стабільністю. Це забезпечує їхню роботу навіть у середовищах із підвищеною вологістю. Завдяки таким технологічним рішенням втрати потужності через PID-ефект скорочуються у декілька разів.

Суттєве значення для довговічності панелей має якість матеріалів, з яких вони виготовлені. Використання загартованого скла з антивідбивними покриттями дозволяє зменшити ризик появи тріщин та запобігти оптичній

деградації. Ламінаційні плівки нового покоління містять стабілізатори. Вони захищають полімер від руйнування під дією ультрафіолету та високих температур. Замість традиційної задньої плівки часто використовується скло. Воно забезпечує кращу герметичність і повну ізоляцію елементів від вологи. Усе це дозволяє зменшити проникнення кисню й водяної пари.

Окрему увагу приділяють терморегуляції панелей. Перегрів є одним із головних чинників деградації. Підвищення температури навіть на кілька градусів призводить до зниження напруги та збільшення струмів витоку. Тому в сучасних конструкціях використовують теплоємні алюмінієві рамки. Вони ефективно відводять тепло. Також використовують системи природної або примусової вентиляції. У великих сонячних електростанціях застосовуються модулі з рідинним охолодженням або терморегулюючими елементами. Вони підтримують стабільну температуру осередків і запобігають їхньому локальному перегріву.

Ще один напрямком є удосконалення електричних з'єднань. Традиційна пайка поступово замінюється лазерним зварюванням. Це забезпечує рівномірний розподіл струму і зменшує ризик появи мікротріщин. Для з'єднання фотоелементів застосовують гнучкі струмопровідні стрічки. Вони здатні компенсувати теплові деформації без втрати провідності. Такий підхід дозволяє уникнути руйнування контактів.

Значного прогресу досягнуто і в сфері інкапсуляції та герметизації. Нові полімерні матеріали етилен-вінілацетат із підвищеною стабільністю або поліетилентерефталат зменшують паропроникність і надійно фіксують комірки між шарами скла. Герметики на основі силікону витримують тисячі циклів нагрівання й охолодження. Вони не втрачаючи еластичності. Завдяки цьому забезпечується висока стабільність механічних і електричних властивостей модуля навіть у складних кліматичних умовах.

Під час тестів перевіряється їх стійкість сонячних панелей до температурних циклів, вологості, ультрафіолетового опромінення та механічних навантажень. Ці процедури дозволяють оцінити поведінку матеріалів у реальних

умовах і вдосконалити конструкцію ще на етапі виробництва. Панелі після тестів демонструють мінімальні втрати потужності протягом десятиліть роботи.

Крім конструктивних удосконалень, дедалі ширше впроваджуються інтелектуальні системи моніторингу. Вони дозволяють у режимі реального часу відстежувати параметри роботи кожної панелі: температуру, напругу, струм, рівень генерації. Це дає змогу своєчасно виявляти аномалії та проводити профілактичне обслуговування. Також це дозволяє запобігати серйозним пошкодженням і втратам енергії. Поєднання таких систем із прогностичними алгоритмами дозволяє підтримувати стабільність енергетичних показників і зменшувати вплив деградації.

Сучасні технологічні рішення охоплюють усі елементи сонячного модуля. Від мікроструктури фотоелемента до зовнішнього захисного шару. Комплексне застосування вдосконалених матеріалів, оптимізованих конструкцій, інтелектуального моніторингу та продуманої терморегуляції дає змогу знизити темпи деградації до мінімуму. У результаті тривалість служби фотомодулів зростає на десятки відсотків. Втрати потужності можуть не перевищувати 0,2 % на рік. Це робить сучасні сонячні установки значно надійнішими й довговічнішими.

**Вибір матеріалів.** Вибір матеріалів для виготовлення сонячних панелей є одним із найважливіших факторів. Цей процес визначає їхню довговічність, стабільність роботи та стійкість до деградаційних процесів. Саме від фізико-хімічних властивостей компонентів модуля залежить ефективність. Він зможе протистояти дії температурних коливань, ультрафіолетового випромінювання, вологи, механічних навантажень і електричних напружень. Удосконалення матеріалів є стратегічним напрямом розвитку сучасної фотоенергетики. Він безпосередньо впливає на продуктивність і термін служби сонячних електростанцій.

Основним елементом будь-якої сонячної панелі є фотоперетворювач, виготовлений на основі напівпровідникових матеріалів. Традиційно в промисловому виробництві застосовується кремній. Оскільки він поєднує

високу ефективність перетворення енергії та стабільність у різних кліматичних умовах. Використовуються два основні типи кремнію: монокристалічний та полікристалічний. Монокристалічний кремній має упорядковану структуру без міжкристалічних меж. Це мінімізує дефекти і забезпечує найвищу ефективність. Такі елементи менше схильні до деградації від термічних впливів і мають стабільні електричні параметри протягом усього строку служби. Полікристалічний кремній містить більшу кількість меж зерен. Де можуть виникати рекомбінаційні процеси, що прискорюють деградацію. Проте завдяки сучасним методам пасивації дефектів ці недоліки значно зменшені.

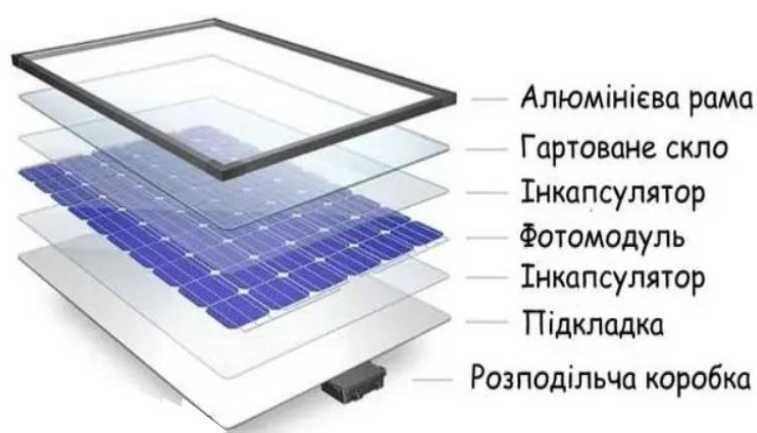


Рисунок 2.1 – Будова сонячної батареї

Крім традиційного кремнію, у фотоенергетиці активно розвиваються й альтернативні матеріали: телурид кадмію ( $\text{CdTe}$ ), мідь-індій-галій-селен (CIGS) та перовськітові структури.  $\text{CdTe}$ -панелі характеризуються хорошою стійкістю до високих температур та меншою чутливістю до затінення. CIGS-модулі мають високу гнучкість і добру адгезію. Це дозволяє використовувати їх на нестандартних поверхнях. Проте основною проблемою цих матеріалів залишається їхня довгострокова стабільність і поступове руйнування під впливом вологи або УФ-випромінювання. Саме тому тривають активні дослідження щодо удосконалення хімічної структури цих сполук і запровадження захисних шарів.

Особливу роль у стабільності роботи модуля відіграє захисне скло, що є переднім шаром конструкції. Воно повинно одночасно виконувати кілька

функцій: захищати фотоелементи від механічних пошкоджень, атмосферного впливу й ультрафіолетового випромінювання, і пропускати якомога більше сонячного світла. Для цього використовується загартоване боросилікатне або флоат-скло, яке має високу міцність і термостійкість. Його поверхня часто покривається антивідбивним шаром. Це зменшує втрати світла на відбиття до 2–3 %. Також важливо, щоб скло було стійким до ерозії, адже пил і дрібні частинки можуть з часом зменшити пропускання світла та сприяти перегріванню поверхні.

Важливою складовою панелі є інкапсуляційний шар. Він фіксує сонячні комірки між склом і задньою поверхнею. Також одночасно виконуючи роль електричної ізоляції та захисту від вологи. Традиційно використовувався етиленвінілацетат (EVA), але сучасні вимоги сприяли появі його вдосконалених аналогів, таких як поліетиленвінілацетат із додаванням стабілізаторів або тераполімери на основі силіконів. Ці матеріали мають меншу паропроникність, кращу термостійкість і забезпечують стабільність протягом десятків років. Вони також запобігають утворенню бульбашок. Ці бульбашки можуть стати осередками механічного руйнування чи деградації елементів.

Задній шар панелі забезпечує герметичності й захист від проникнення вологи та ультрафіолету. Раніше для цього використовували полімерні плівки на основі поліетилентерефталату (PET). Проте з часом вони починали жовтіти й втрачали механічну міцність. Сьогодні дедалі частіше застосовується подвійне скло. Воно повністю виключає потрапляння кисню й водяної пари. Така конструкція хоч і важча, але забезпечує найвищий рівень захисту від деградації. Особливо для модулів, що експлуатуються в екстремальних кліматичних умовах.

Не менш важливим аспектом є контактні матеріали та струмопровідні елементи. Для з'єднання фотоелементів використовуються мідні або срібні провідники з антикорозійними покриттями. У сучасних панелях усе частіше застосовують тонкі мідні стрічки з лудженим покриттям. Вони знижують ризик окислення й покращують електропровідність. Замість традиційного срібла розробляються матеріали на основі алюмінію або нікелю. Вони мають порівнянні характеристики, але є більш стійкими до електрохімічної деградації.

Щоб підвищити стійкість до потенційно індукованої деградації, велике значення має діелектрична стабільність матеріалів. Високоякісні діелектрики запобігають утворенню струмів витoku між осередками та рамою. Додатково застосовуються антистатичні шари. Вони рівномірно розподіляють потенціал по поверхні панелі, мінімізуючи ризик локального пробою. Завдяки цьому панелі здатні витримувати напругу понад 1500 В без втрати функціональності.

Сучасний вибір матеріалів являє собою результат поєднання наукових досліджень, технологічних інновацій та практичного досвіду експлуатації. Кожен компонент панелі має бути хімічно сумісним з іншими. Це дозволяє уникнути внутрішніх реакцій, які могли б прискорити старіння. Використання якісних матеріалів дозволяє підвищити ефективність і надійність системи й суттєво продовжити строк її служби. Іноді понад 30-35 років без суттєвих втрат потужності. Правильний вибір матеріалів є фундаментом у боротьбі з деградацією сонячних панелей. Саме від нього залежить, наскільки стійкою буде конструкція до фізичних, хімічних і електричних навантажень. Отже, наскільки ефективно вона зможе перетворювати енергію Сонця впродовж багатьох років експлуатації.

**Покриття та захист.** Покриття та захисні шари сонячних панелей відіграють ключову роль у забезпеченні їхньої довговічності. Це надає стабільної роботи впродовж усього життєвого циклу. Вони захищають елементи модуля від механічних пошкоджень, ультрафіолетового випромінювання, проникнення вологи, пилу та хімічно агресивних речовин. Покриття впливають на оптичні властивості панелей, збільшуючи кількість світла, що потрапляє на фотоперетворювач.

Одним із найважливіших компонентів у структурі сонячної панелі є захисне скло з антивідбивним покриттям (AR-coating). Його основне завдання полягає в тому щоб мінімізувати втрати світлового потоку через відбиття сонячних променів від поверхні. Звичайне скло може відбивати до 8-10 % світла. А антивідбивне покриття зменшує цей показник до 2-3 %.

Таке покриття зазвичай виготовляють на основі оксидів металів (зокрема, діоксиду кремнію  $\text{SiO}_2$  або оксиду титану  $\text{TiO}_2$ ). Вони наносяться методом вакуумного напилення або хімічного осадження з пари. Ці шари формують тонку плівку товщиною кілька сотень нанометрів. Вона створює інтерференційний ефект. Хвилі світла, відбиті від зовнішньої та внутрішньої меж покриття, взаємно компенсуються, підвищуючи проникнення світла всередину. Антивідбивні шари також захищають скло від забруднення та старіння. До складу покриттів часто додають гідрофобні або самоочисні компоненти, які запобігають накопиченню пилу та води на поверхні панелі. Завдяки цьому зменшується потреба у частому очищенні. Панелі довше зберігають прозорість навіть у запилених або дощових регіонах.

Не менш важливу роль відіграють захисні покриття проти ультрафіолетової деградації. Тривала дія УФ-випромінювання спричиняє руйнування полімерних матеріалів, які використовуються для інкапсуляції та герметизації. Для захисту цих компонентів застосовують спеціальні стабілізатори. Вони поглинають ультрафіолет і перетворюють його на тепло або безпечне інфрачервоне випромінювання. До таких стабілізаторів належать бензотриазоли, HALS (hindered amine light stabilizers) та інші органічні сполуки. Вони вводяться безпосередньо до складу полімеру. Такі добавки значно подовжують термін служби матеріалів. Вони попереджають пожовтіння, розтріскування та втрату механічної міцності.

Додатковим способом підвищення стійкості до деградації є нанесення антистатичних покриттів. Вони допомагають запобігати накопиченню електричного заряду на поверхні скла. Антистатичні плівки формуються з прозорих оксидів металів (оксид індію-олова (ITO) або оксид цинку з алюмінієм (AZO)). Вони забезпечують низький рівень поверхневого опору й одночасно зберігають високу оптичну прозорість.

Також у деяких сучасних панелях застосовуються тепловідбивні покриття. Вони зменшують перегрів фотоелементів, відбиваючи частину інфрачервоного

спектра. Це дозволяє підтримувати нижчу робочу температуру та зменшити термічну деградацію. Особливо в регіонах із високою сонячною інсоляцією.

Важливим напрямом удосконалення захисту є впровадження мультифункціональних нанопокриттів. Вони поєднують одразу кілька властивостей: антивідбивні, гідрофобні, антистатичні та фотостабілізуючі. Такі системи наносяться шарами товщиною лише кілька десятків нанометрів. Це не впливає на прозорість і значно підвищує надійність модуля. Наприклад, нанопокриття на основі діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ) не тільки знижує відбивання, але й проявляє фотокаталітичні властивості. Тобто під дією ультрафіолету розкладає органічні забруднення. Що робить поверхню самоочисною. Це особливо важливо для великих сонячних станцій, де ручне очищення є економічно не вигідним. Захисту потребують також задні шари та бічні кромки панелей. Волога часто проникає саме через краї. Тому їх додатково обробляють силіконовими герметиками або епоксидними смолами. Такі герметики повинні зберігати еластичність при зміні температури та не втрачати адгезії навіть після десятиліть експлуатації.

Для підвищення стійкості до корозії металеві елементи рам покривають анодованим алюмінієм. Він утворює щільний оксидний шар, який є стійким до агресивного середовища. У сучасних вискоелективних модулях застосовуються навіть розумні захисні покриття. Вони здатні змінювати свої властивості залежно від умов навколишнього середовища. Це допомагає запобігти перегріву панелей. При зниженні температури вони підвищують прозорість для кращого поглинання світла.

Правильно підібрані покриття й захисні матеріали значно знижують швидкість деградації сонячних панелей, продовжують строк їх служби та підтримують високу ефективність протягом десятиліть експлуатації. Використання інноваційних багатофункціональних систем покриттів дозволяє захищати модуль від зовнішніх факторів. Ще це дозволяє активно підтримувати його енергетичну стабільність.

**Системи моніторингу.** Системи моніторингу є одним із інструментів для виявлення, контролю та запобігання деградаційним процесам у сонячних панелях. Вони дозволяють у реальному часі відстежувати параметри роботи фотоелектричних модулів. Аналізувати їхній стан та виявляти відхилення від норми і оперативно реагувати на несправності. Завдяки таким системам можна підвищити ефективність генерації енергії й продовжити термін служби сонячних установок.

У традиційних системах контролю оцінювали лише загальні параметри – напругу, струм і температуру. Проте сучасні технології дозволяють проводити деталізований моніторинг кожної панелі окремо. Для цього використовуються інтелектуальні сенсорні модулі. Вони інтегруються у конструкцію інвертора або під'єднуються безпосередньо до фотомодуля.

Такі системи вимірюють широкий спектр параметрів:

- вихідну потужність і ККД панелі;
- напругу та струм у кожному модулі;
- температуру комірок і задньої поверхні;
- опір ізоляції;
- показники деградації (PID, LID, термічні аномалії);
- рівень сонячного випромінювання (інсоляції) та температуру навколишнього середовища.

Один із найпоширеніших підходів є використання систем моніторингу на основі інтернету речей (IoT). Кожна панель обладнується мікроконтролером або датчиком. Він збирає дані й передає їх через бездротові канали на центральний сервер. На сервері інформація аналізується. Користувач отримує повідомлення про зміни або несправності. Такі системи дозволяють побачити будь-які відхилення. Наприклад, зниження вихідної потужності однієї панелі в масиві. Це може свідчити про початок деградації або часткове затінення.

Окремо варто виділити термографічний моніторинг. Він базується на інфрачервоному аналізі поверхні панелей. Використання тепловізорів дозволяє виявляти локальні перегріву. Це є першими ознаками деградації. Термографічні

системи можуть працювати автоматично. Вони сканують великі площі сонячних електростанцій і формуючи теплові карти стану панелей. Ці дані аналізуються програмним забезпеченням. Воно визначає рівень ризику пошкоджень і пріоритетність технічного обслуговування.

Сучасні системи моніторингу часто доповнюються програмним забезпеченням на основі штучного інтелекту (AI). Алгоритми машинного навчання здатні аналізувати великі обсяги. Наприклад, якщо певна панель демонструє поступове зниження потужності програма може спрогнозувати момент деградації. Завдяки цьому обслуговування переходить від реактивного до превентивного. Потенційні проблеми усуваються ще до того, як вони спричинять втрати енергії.

Важливим компонентом системи моніторингу є візуалізація даних. Сучасні платформи мають зручні інтерфейси. Вони відображають роботу кожної панелі у вигляді інтерактивних графіків і схем. Оператор може миттєво бачити зміну продуктивності, температуру або енергетичний баланс, а також швидко локалізувати зону проблеми. Такі системи використовуються на великих промислових станціях і в приватних домогосподарствах. Вони забезпечують повний контроль над енергетичними процесами.

Крім контролю параметрів, системи моніторингу забезпечують збір історичних даних, які використовуються для довгострокового аналізу деградаційних тенденцій. Наприклад, порівняння показників за кілька років дозволяє оцінити середньорічне зниження потужності, виявити типові причини втрат і скорегувати стратегію технічного обслуговування. У поєднанні з кліматичними даними це допомагає визначити оптимальні умови експлуатації та прогнозувати ресурс панелей.

Застосування систем моніторингу суттєво знижує витрати на обслуговування сонячних станцій, що дозволяє:

- своєчасно виявляти початок деградації окремих панелей;
- автоматично фіксувати та аналізувати зміни продуктивності;
- запобігати аваріям та електричним пробоям;

- забезпечувати ефективне планування ремонту чи заміни компонентів.

Системи моніторингу є невід'ємною частиною сучасної фотоенергетики. Вони поєднують сенсорні технології, аналітику даних та штучний інтелект. Це створює інтелектуальні енергетичні мережі. Які здатні самостійно виявляти та усувати проблеми ще до того, як вони вплинуть на ефективність. Завдяки такому підходу деградаційні процеси стають контрольованими. Експлуатаційна надійність сонячних панелей стає максимально високою навіть за складних кліматичних умов.

### **Висновки до розділу**

Досліджено вплив деградаційних процесів на енергетичну ефективність фотоелектричних систем. Визначено, що навіть незначне зменшення коефіцієнта перетворення може призвести до суттєвих втрат у виробництві електроенергії протягом усього життєвого циклу панелей. Розглянуто економічні наслідки деградації та можливі технологічні підходи до її зниження. Застосування вдосконалених матеріалів, захисних покриттів, систем моніторингу та діагностики в реальному часі.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗБІЛЬШЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ НА ДЕГРАДАЦІЮ

Сонячні панелі працюють під впливом різниці потенціалів між різними ділянками фотоелектричного модуля. З плином часу, впливом кліматичних факторів та електричних навантажень, цей потенціал може змінюватися. Він може зростати або перерозподілятися всередині структури панелі. Такі зміни можуть викликати певні деградаційні процеси. Вони безпосередньо впливають на ефективність, стабільність і довговічність фотоелементів.

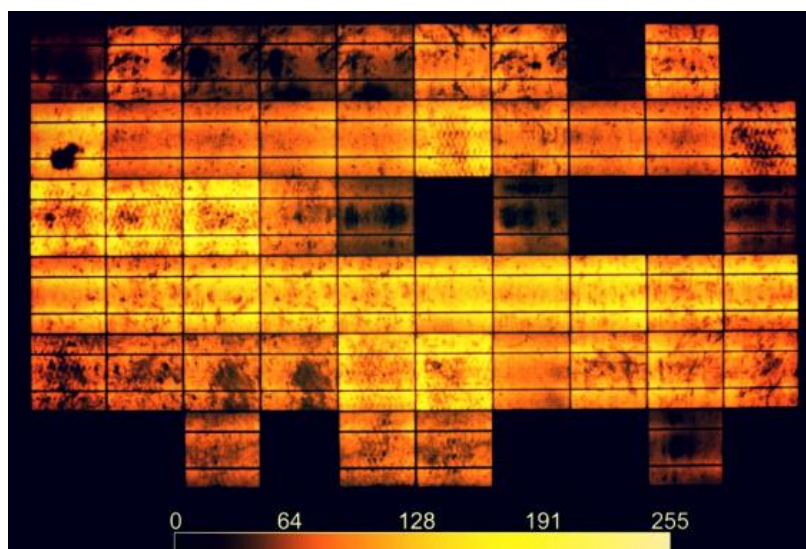


Рисунок 3.1 – Сонячна панель з деградацією

Збільшення потенціалу часто пов'язують із явищем, відомим як PID (Potential Induced Degradation). Це деградація, спричинена потенціалом. Цей ефект є одним із найсерйозніших механізмів втрати потужності у сонячних панелях. Особливо в умовах високої напруги або вологості.

#### 3.1 Експериментальні методи

Для вивчення впливу підвищеного потенціалу на деградацію сонячних панелей застосовують лабораторні й польові експерименти. Основна мета таких досліджень визначити, як саме напруга, температура, вологість та інші фактори впливають на зміну електричних характеристик панелей. Лабораторні

експерименти проводять у контрольованих умовах. Там можна точно регулювати параметри середовища. Панелі піддають впливу підвищеної напруги (зазвичай у межах  $\pm 1000$  В) між провідниками та заземленою рамою. Такий підхід дає змогу симулювати умови, які будуть близькі до реальної експлуатації на великих сонячних станціях.

Основні етапи проведення експерименту:

- вимірювання початкових параметрів панелі – струму КЗ, напруги холостого ходу, ККД, температури комірок;
- підключення панелі до високовольтного джерела;
- підтримання стабільних умов (напруга, температура, вологість) протягом заданого часу;
- періодичне вимірювання електричних параметрів для оцінки змін;
- порівняння отриманих результатів до та після експерименту.

Для точного визначення PID-ефекту застосовують електролюмінесцентну (EL) або інфрачервону (IR) діагностику. EL-зображення дозволяють виявити мікротріщини. Ще дозволяють виявити порушення контактів і ділянки втрати провідності. IR-зображення показують локальні зони нагріву. Це свідчить про підвищений опір або пошкодження ізоляції.

Польові дослідження проводять на реальних сонячних станціях. Там панелі перебувають під впливом природних умов. Для цього частину модулів підключають до різних потенціалів або експлуатують у різних секціях. Це дозволяє порівняти швидкість деградації. Зібрані дані передаються системою моніторингу. Це потрібно щоб виявляти закономірності деградаційних процесів у динаміці.

Додатково використовують кліматичні камери. В цих камерах поєднуються висока вологість (до 85%), підвищена температура (до 85°C) та висока напруга ( $\pm 1000$  В). Такі умови імітують екстремальні режими. Це прискорює деградацію, дозволяючи оцінити довгострокові ефекти за короткий час.

Інструменти для дослідження: вольтметри та амперметри високої точності; термопари для контролю температури комірок; тепловізори для виявлення «гарячих точок»; прилади для EL-візуалізації; системи збору даних та програмне забезпечення для аналізу PID.

Отримані результати таких досліджень дозволяють оцінити ступінь втрати потужності та зміну електричних параметрів у часі. Після 48-96 годин впливу високого потенціалу спостерігається зниження потужності на 10-30% залежно від матеріалів і типу модуля. Після цього деградаційні процеси можуть або стабілізуватись, або прогресувати.

### 3.2 Результати дослідження

У процесі дослідження впливу підвищеного потенціалу на деградацію сонячних панелей було отримано низку важливих результатів. Вони підтверджують суттєвий вплив електричного поля на стабільність фотоелементів. Експериментальні дані свідчать, що при прикладенні високої напруги (від  $\pm 600$  В до  $\pm 1000$  В) відбуваються помітні зміни у структурі та електричних характеристиках сонячних модулів.

Найбільш очевидним проявом деградації є зниження потужності модуля ( $P_{max}$ ). Уже після кількох десятків годин впливу високої напруги спостерігається падіння потужності від 5 до 15%. В деяких випадках до 30%. Струм короткого замикання ( $I_{sc}$ ) зменшується. Це вказує на зниження фотогенерації або збільшення опору в ланцюгу. Напруга холостого ходу ( $V_{oc}$ ) також може зменшуватися. Особливо за наявності струмів витоку через ізоляційні матеріали. Коефіцієнт заповнення ( $F_F$ ) деградує через втрату однорідності електричного поля та появу дефектних зон у фотоелементах. Загальний ККД модуля після експериментів зменшувався на 8-20% залежно від типу фотоелемента (монокристалічний чи полікристалічний кремній) та конструкції ізоляційних шарів.

За допомогою електролюмінесцентного аналізу (EL) виявлено формування темних ділянок на поверхні комірок. Вони свідчать про втрату активних зон або

порушення контакту між шарами. Також спостерігались такі ефекти: поява мікротріщин у кристалічній решітці кремнію; нерівномірне затемнення фотоелементів, характерне для локальних струмів витоку; корозійні процеси на провідних шинах через проникнення вологи.

Після тривалого впливу потенціалу (понад 96 годин) темні зони на EL-зображеннях охоплювали до 40% поверхні комірок. Це відповідало втраті приблизно 25% вихідної потужності.

Термографічні дослідження показали появу локальних гарячих точок (hot spots). Вони утворюються в місцях підвищеного опору або пошкоджень контактів. Температура цих зон могла перевищувати середню температуру поверхні панелі на 15-25°C. Це створює додаткові ризики для прискореного старіння матеріалів, зокрема EVA-капсуланта та задньої плівки. Цей ефект є небезпечним. Оскільки може призвести до ланцюгової деградації ділянок.

Встановлено, що швидкість і глибина деградації суттєво залежать від: полярності потенціалу – негативна напруга на фотоелементах спричиняє більш інтенсивний PID, ніж позитивна; температури середовища – при підвищенні з 25°C до 85°C швидкість деградації збільшується у 2-3 рази; рівня вологості – за вологості понад 60% виникають струми витоку через ізоляційні матеріали; типу скла та капсуланта – модулі з низькоякісними або тонкими шарами EVA деградують швидше через недостатню герметичність.

Після зняття напруги й проведення відновлювальної термообробки (нагрівання панелі при 80-100°C протягом кількох годин) у частини модулів спостерігалось часткове відновлення потужності до 80-90% початкового рівня. Це пояснюється тим, що частина зарядів, які спричинили PID, може бути розсіяна з часом або під впливом тепла. Однак повне відновлення можливе лише тоді, коли деградаційні процеси не призвели до необоротних пошкоджень структури кремнію.

Отримані результати свідчать, що підвищення потенціалу є одним із ключових чинників деградації сонячних панелей. Його вплив виявляється у: зниженні вихідних електричних параметрів; утворенні локальних дефектів і

гарячих точок; прискоренні термічних та хімічних реакцій у шарах модуля; втраті частини генераційної здатності навіть після усунення впливу напруги.

Для мінімізації таких ефектів необхідно використовувати матеріали з високою ізоляційною стійкістю. Також контролювати рівень потенціалу між модулями і землею. А ще потрібно застосовувати системи моніторингу PID у режимі реального часу.

Після проведення серії експериментів щодо впливу підвищеного потенціалу на деградацію сонячних панелей було виконано глибокий аналіз отриманих даних. Метою цього аналізу є встановлення закономірностей, які пояснюють механізми деградації під дією електричного поля, а також оцінка можливостей прогнозування довговічності сонячних модулів за умов тривалої експлуатації.

Першим етапом аналізу стало узагальнення результатів вимірювань зниження потужності ( $P_{max}$ ) та параметрів I–V характеристик. Для кожної серії експериментів визначали: середнє відсоткове зниження потужності; стандартне відхилення, що характеризує нерівномірність деградації між окремими модулями; коефіцієнт кореляції між зниженням потужності та температурою, вологістю й рівнем прикладеної напруги.

Розрахунки показали, що: коефіцієнт кореляції між деградацією потужності та величиною прикладеного потенціалу становить  $r = 0,87$ , що свідчить про сильну залежність; між температурою середовища та швидкістю деградації спостерігається середній зв'язок ( $r = 0,62$ ); вплив вологості має нелінійний характер: різке прискорення деградації починається після досягнення порогу 60% відносної вологості.

Це дозволяє зробити висновок, що основним ініціюючим фактором процесів деградації є саме електричний потенціал. Інші фактори лише підсилюють його дію.

Графічне порівняння до та після експерименту демонструє зміщення кривих униз і вліво. Це свідчить про зростання серійного опору та зменшення фотоструму. Особливо помітним є зниження напруги при максимальній

потужності ( $V_{mp}$ ). Він втрачає до 15% від початкового значення. Це означає, що частина фотоелементів працює не в оптимальному режимі через появу локальних дефектів.

Такі зміни підтверджують наявність внутрішніх струмів витоку через ізоляційні матеріали та міграцію іонів, які порушують електричну однорідність шару. Це типовий прояв PID-ефекту, коли потенціальна різниця між фотоелементом і землею створює електричне поле, що «виштовхує» іони  $\text{Na}^+$  з поверхні скла в кремнієвий шар, спричиняючи появу пасток заряду.

Теплові карти продемонстрували поступове збільшення кількості гарячих точок у міру зростання тривалості експерименту. У середньому температура локальних перегрівів зростала на  $0,5-0,8^\circ\text{C}$  за кожні 10 годин впливу високої напруги. Згодом ці точки поширювалися на сусідні комірки, створюючи ланцюговий ефект деградації. Математичне моделювання показало, що збільшення температури навіть на  $10^\circ\text{C}$  у таких зонах може прискорити процеси старіння матеріалів капсуланта на 30-40%. Це підтверджує важливість температурного контролю в системах моніторингу.

На основі отриманих даних було створено емпіричну модель, яка описує залежність відносної деградації потужності ( $\Delta P/P_0$ ) від часу впливу ( $t$ ) та величини потенціалу ( $V$ ):

$$\frac{\Delta P}{P_0} = A \cdot e^{(B \cdot V)} \cdot (1 - e^{-C \cdot t}) \quad (3.1)$$

де  $A$  – коефіцієнт матеріалу (визначається типом комірки та ізоляційних шарів);

$B$  – коефіцієнт залежності від напруги;

$C$  – коефіцієнт швидкості деградації у часі.

Підставивши експериментальні значення, було визначено, що для типових кремнієвих модулів:  $A = 0,05$ ,  $B = 0,002 \text{ В}^{-1}$ ,  $C = 0,03 \text{ год}^{-1}$ . Це означає, що при напрузі 1000 В деградація стабілізується приблизно через 72-96 годин і сягає близько 20% втрати потужності.

Порівняння з довгостроковими польовими спостереженнями показало, що результати лабораторних випробувань добре узгоджуються з реальною

динамікою деградації модулів. Модулі, що піддавались впливу потенціалів понад 700 В, демонстрували середньорічну втрату потужності на рівні 1,5-2%, що удвічі перевищує нормований показник. Таким чином, лабораторна модель може бути використана для прогнозування довговічності сонячних панелей у різних кліматичних і експлуатаційних умовах.

Збільшення потенціалу має експоненційний вплив на швидкість деградації. Найбільш чутливими параметрами є напруга холостого ходу ( $V_{oc}$ ) і коефіцієнт заповнення ( $FF$ ). Температура і вологість виступають як прискорювальні фактори. Розроблена емпірична модель дозволяє кількісно оцінювати PID-деградацію. Для мінімізації втрат необхідно впроваджувати активні системи компенсації потенціалу та проводити регулярний моніторинг.

Щоб повніше зрозуміти, як збільшення потенціалу впливає на деградацію сонячних панелей у реальних умовах, доцільно розглянути практичні приклади з польових спостережень і промислових об'єктів. Ці приклади демонструють теоретичні закономірності, підтверджені лабораторними експериментами. Проявляються під час реальної експлуатації сонячних електростанцій різних масштабів.

**Приклад 1: Вплив клімату на деградацію.** Кліматичні умови є одним із головних факторів. Вони визначають швидкість і характер деградаційних процесів у сонячних модулях. Вплив температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання, пилу та опадів призводить до прискореного старіння матеріалів і погіршення електричних характеристик панелей.

Дослідження показують, що різниця у втраті потужності між панелями, встановленими в тропічному кліматі та в умовах помірної зони, може сягати до 25% після п'яти років експлуатації.

Температура безпосередньо впливає на електричні параметри фотомодулів. З підвищенням температури зменшується напруга на виході елемента і його потужність. Коефіцієнт температурної залежності для більшості кремнієвих панелей становить близько  $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$ . Коли панелі тривалий час працюють за температури понад  $70-80^{\circ}\text{C}$ , у матеріалах починаються процеси

термічної деградації: прискорюється окиснення контактів; з'являються мікродфекти у кристалічній решітці кремнію; знижується адгезія шарів EVA та скла.

У спекотних регіонах, наприклад у Північній Африці чи на Близькому Сході, температура поверхні панелі може сягати 90°C. Це вдвічі скорочує термін служби стандартних модулів без термостійких матеріалів.

Висока відносна вологість є ключовим чинником розвитку корозії, деламінації та PID-деградації. Молекули води проникають у мікротріщини або по краях інкапсуляційного шару і створюють електролітичне середовище у якому починаються процеси корозії металевих провідників.

Додатково, у присутності вологи іонна провідність шарів значно підвищується, що призводить до: міграції іонів натрію ( $\text{Na}^+$ ) зі скла в кремнієвий шар; формування потенціальних пасток у структурі p-n переходу; зменшення опору ізоляції, що збільшує струми витоку.

В умовах тропічного клімату, де середньорічна вологість перевищує 80%, втрати потужності через PID можуть становити до 15% за перший рік роботи.

Постійна дія ультрафіолету призводить до фотохімічних реакцій у полімерних матеріалах – передусім у EVA (етиленвінілацетат). Він використовується як інкапсулянт між шарами панелі.

З часом EVA жовтіє, втрачає прозорість і частково втрачає еластичність. Це призводить до: зменшення пропускання світла у фоточутливий шар; утворення мікропустот між шарами скла й кремнію; прискорення термального старіння та появи тріщин.

Досліди показали, що після 5-7 років роботи в умовах сильного сонячного випромінювання прозорість EVA може знизитися на 10-15%. Це безпосередньо зменшує вихід енергії модуля.

Пилові відкладення і часті опади також мають значний вплив на ефективність модулів. Пилова плівка на поверхні скла: зменшує кількість світла, що потрапляє на комірки; створює нерівномірне освітлення, сприяючи виникненню гарячих точок; затримує вологу, що підсилює поверхневу корозію.

У пустельних зонах втрати від забруднення можуть сягати до 30%, якщо панелі не очищати протягом кількох тижнів.

Різкі зміни температури вдень і вночі призводять до термічного розширення матеріалів. Це створює механічні напруги на межах шарів. Також сприяє утворенню: мікротріщин у кремнієвих пластинах; відшарування контактів; зниження механічної стабільності панелі.

Такі умови типові для пустельних або високогірних регіонів, де різниця температур може перевищувати 40°C протягом доби.

Клімат визначає темп старіння сонячних панелей і характер деградації матеріалів. Найбільшу небезпеку становить поєднання високої вологості, температури та напруги. Ці умови створюють одночасний розвиток кількох механізмів деградації PID, LID і термічного старіння. Тому для кожного регіону необхідно адаптувати конструкцію панелей.

**Приклад 2: Вибір матеріалів та їх вплив на деградацію.** Матеріали, з яких виготовлені сонячні панелі, мають вирішальний вплив на їхню довговічність, стабільність та стійкість до деградаційних процесів. Навіть за однакових кліматичних і експлуатаційних умов, модулі з різними матеріалами демонструють істотно різну швидкість старіння та втрати ефективності.

Найважливішим елементом сонячної панелі є напівпровідниковий матеріал, який визначає основні параметри її роботи – ефективність, температурну стабільність та стійкість до дефектів. Монокристалічний кремній (mono-Si) відзначається високою ефективністю (до 23%) і структурною однорідністю, що забезпечує низьку чутливість до утворення мікротріщин. Проте він має вищу схильність до LID-деградації (Light Induced Degradation), пов'язаної з утворенням рекомбінаційних центрів у структурі кристалу під дією світла. Полікристалічний кремній (poly-Si) є дешевшим у виробництві, але через наявність міжкристалічних меж швидше піддається деградації під дією вологи й температури. Такі модулі частіше страждають від PID (Potential Induced Degradation), оскільки межі зерен виступають шляхами для міграції іонів. Тонкоплівкові матеріали (CdTe, CIGS, a-Si) мають меншу масу та гнучкість,

однак часто деградують швидше через нестабільність хімічних сполук, особливо під дією УФ-випромінювання та вологи.

Скло виконує роль не лише захисного елемента, а й оптичного фільтра. Від його властивостей залежить пропускання сонячного світла, термостійкість та електрична ізоляція. Звичайне натрій-кальцієве скло має добру прозорість, але містить іони  $\text{Na}^+$ , які при підвищених потенціалах можуть мігрувати в кремнієвий шар, спричиняючи PID. Залізівільне скло (low-iron glass) забезпечує високу прозорість (до 92%) і меншу схильність до старіння. Загартоване скло з антибліковим покриттям зменшує втрати на відбиття світла та підвищує механічну міцність, що важливо для регіонів із сильними вітрами або градами.

У деяких сучасних панелях застосовується двостороннє скління (glass-glass) – такий підхід значно підвищує герметичність, знижує ризик деламінації та подовжує термін служби модулів до 35-40 років.

Інкапсулянт забезпечує зчеплення між шарами панелі та захищає елементи від механічних впливів і вологи. Найчастіше використовують EVA (етиленвінілацетат), проте він має низку недоліків: схильність до жовтіння під дією УФ-випромінювання; поступове зниження адгезії при високих температурах; утворення оцтової кислоти внаслідок старіння, що спричиняє корозію контактів.

Сучасною альтернативою є POE (поліолефіновий інкапсулянт), який відзначається кращою термостійкістю, низькою вологопроникністю і високою електричною ізоляцією. Використання POE може зменшити PID-деградацію на 70-90%.

Задня плівка виконує функцію електроізоляції та механічного захисту. Її руйнування або втрата герметичності часто стає причиною деградації.

Найпоширенішими матеріалами є: PET (поліетилентерефталат) – дешевий, але має низьку стійкість до УФ-випромінювання та гідролізу; PVF (полівініліденфторид) – стійкий до УФ та вологи, забезпечує тривалу ізоляцію; PVDF (полівінілфторид) – використовується у високоякісних модулях, гарантує термін служби понад 30 років.

З часом під дією ультрафіолету або тепла плівка може тріскатися, що призводить до втрати герметичності і збільшення струмів витoku. Саме тому у сучасних двосторонніх панелях задню плівку часто замінюють другим шаром скла, який повністю усуває цей ризик.

Алюмінієва рамка є одним із найбільш вразливих елементів конструкції. При контакті з вологою та агресивним середовищем (особливо в морських регіонах) на поверхні з'являється окисна плівка, що може порушувати електричну ізоляцію. Для герметизації стиків використовуються силіконові або бутилові герметики, які з часом втрачають еластичність. Це сприяє проникненню вологи, а відтак – утворенню PID або корозії провідників.

Вибір матеріалів суттєво впливає на темп і характер деградації сонячних панелей. Найменша економія на якісних ізоляційних або герметичних шарах може призвести до скорочення терміну служби панелі на 30-50%. Можна стверджувати, що правильний вибір матеріалів є одним з найефективніших способів зниження деградації сонячних панелей і продовження їхньої експлуатаційної надійності.

***Приклад 3: Промислова сонячна електростанція у південному регіоні України.*** На одній із сонячних станцій потужністю 5 МВт, розташованій у Херсонській області, було виявлено зниження продуктивності окремих ланцюгів фотомодулів на 8-10% протягом двох років експлуатації. Система моніторингу фіксувала нерівномірне падіння потужності між секціями, що не пояснювалось затіненням або забрудненням. Після проведення термографічного аналізу та вимірювань напруги з'ясувалося, що частина модулів перебувала під постійним потенціалом приблизно -900 В відносно землі через особливості заземлення інверторів. Це створювало умови для PID-деградації.

Результати обстеження: зниження вихідної потужності на 12-15% у секціях з негативним потенціалом; наявність гарячих точок на термограмах (перегрів на 20-25°C); потемніння окремих комірок на EL-зображеннях; збільшення опору ізоляції майже вдвічі після проведення відновлювальної термообробки.

Основною причиною деградації стало постійне електричне навантаження між модулем і землею. Після впровадження системи антипотенціальної компенсації (анти-PID box), яка зрівнює потенціали під час нічного циклу, потужність панелей поступово відновилася на 80-85% від початкової.

***Приклад 4. Мала дахова сонячна установка у центральній Європі.***

Дахова система потужністю 30 кВт, встановлена на будівлі комерційного центру, показала значне зниження генерації через три роки роботи – близько 20%. Кліматичні умови були відносно м'які, однак підвищена вологість (до 70%) та відсутність регулярного обслуговування призвели до поступового старіння ізоляційного шару.

Дані моніторингу: середнє зниження напруги  $V_{oc}$  на 9%; підвищення температури деяких модулів до 70°C; фіксація струмів витoku через заземлення до 500  $\mu$ A. Після діагностики встановлено, що PID-деградація розвинулася через електричну асиметрію ланцюгів: частина панелей мала постійний негативний потенціал щодо землі, що створювало умови для міграції іонів натрію зі скла в кремнієвий шар. Після відновлювальних заходів вихідна потужність зросла на 16%, а температурні перепади між модулями зменшилися на 10-12°C. Це свідчить, що PID-ефект можна частково усунути при своєчасному втручанні.

### **3.3 Перспективи досліджень у галузі деградації сонячних панелей**

З огляду на постійне зростання ролі відновлюваних джерел енергії, проблема деградації сонячних панелей стає однією з ключових у розвитку фотоелектричних технологій. Хоча сучасні панелі мають високий ККД і тривалий термін служби (20-30 років), поступова деградація матеріалів і електричних характеристик залишається головним чинником зниження ефективності систем.

Одним із найдинамічніших напрямів є розробка нових матеріалів, здатних краще протистояти термічним, електричним і механічним навантаженням. Удосконалення пасивуючих шарів у структурах типу PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) або TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) дозволяє зменшити

рекомбінацію носіїв заряду та знизити вплив деградації під дією потенціалу. Нові оксидні шари ( $Al_2O_3$ ,  $SiNx$ ) забезпечують кращу електричну ізоляцію та стабільність у часі.

Використання двостороннього скла підвищує механічну міцність, знижує ризик деламінації та мінімізує PID-ефекти завдяки покращеній ізоляції. Такі панелі ефективніше використовують розсіяне світло, збільшуючи загальний вихід енергії. Перовськітні матеріали ( $MAPbI_3$ ,  $FAPbBr_3$  тощо) демонструють надзвичайно високі показники ККД (понад 26%). Вони потребують удосконалення стабільності. Сучасні дослідження спрямовані на розробку гібридних структур перовськіт з кремнієм, які поєднують високу ефективність і тривалість служби.

Розробляються нанопокриття, що зменшують накопичення пилу та підвищують гідрофобність скла. Такі покриття дозволяють утримувати поверхню панелі чистою та запобігають фотохімічному руйнуванню EVA.

У майбутньому науковці зосереджуватимуть увагу на трьох основних напрямках: моніторинг деградації, інтелектуальні системи управління та відновлення властивостей панелей.

Сучасні системи моніторингу дозволяють відстежувати зміну параметрів напруги, струму, температури та внутрішнього опору модулів у реальному часі. Інтеграція таких систем з інтернетом речей (IoT) та штучним інтелектом (AI) дає змогу: прогнозувати виникнення PID або hot-spot ефектів; здійснювати автоматичну діагностику несправностей; підвищувати ефективність експлуатації великих сонячних станцій.

Застосування методів машинного навчання дає можливість створювати моделі. Вони передбачають швидкість деградації на основі кліматичних даних, хімічних властивостей матеріалів і режимів експлуатації. Такі системи дозволять розробникам ще на етапі проектування прогнозувати термін служби панелі в конкретних умовах.

Перспективним напрямом є відновлення деградованих модулів без необхідності їх повної заміни. Теплова регенерація, реверсна напруга або

короткочасне опромінення інфрачервоним світлом дають змогу частково або повністю усунути PID-ефекти. Деякі компанії вже тестують мобільні системи «recovery PID», які можна інтегрувати у діючі електростанції.

Зростає інтерес до екологічно безпечних матеріалів без свинцю, кадмію або токсичних полімерів. Впровадження таких рішень зменшить вплив фотоелектричної галузі на довкілля та спростить утилізацію старих модулів.

Подальший розвиток досліджень у галузі деградації сонячних панелей зосереджений на поєднанні нових матеріалів, інтелектуальних технологій і сталого підходу до виробництва. Головна мета полягає не лише у збільшенні ефективності панелей, а й у забезпеченні стабільної роботи протягом усього життєвого циклу з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Майбутнє фотоелектричних технологій тісно пов'язане з інноваціями в галузі матеріалознавства, автоматизації моніторингу та відновлення експлуатаційних характеристик.

### **Висновок до розділу**

Проведено аналіз впливу підвищення електричного потенціалу на деградаційні процеси. Було встановлено, що збільшення напруги в системі може спричинити посилення ефектів потенціально-індукованої деградації (PID). Вона проявляється у зниженні вихідного струму та локальних ушкодженнях фотоелементів. Наведено експериментальні результати, що підтверджують кореляцію між рівнем потенціалу, кліматичними умовами та швидкістю старіння матеріалів. Особливу увагу приділено прикладам із практики впливу кліматичних факторів (температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання) на деградацію панелей у різних регіонах.

Розвиток нанотехнологій, нових матеріалів і гібридних фотоелементів може суттєво зменшити деградаційні втрати. Особливу увагу привертають нові типи сонячних елементів на основі перовськітів і органічних напівпровідників. Вони мають потенціал для підвищення ефективності при одночасному зниженні вартості виробництва.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Безпека проектних рішень у галузі сонячної енергетики має ключове значення. Від неї залежить не лише надійність та ефективність роботи сонячних систем, але й життя та здоров'я людей. Також збереження матеріальних ресурсів. Проектування сонячних електростанцій або автономних фотоелектричних систем вимагає дотримання комплексного підходу. Він поєднує технічну, електричну, пожежну, експлуатаційну та екологічну безпеку.

Головною метою безпечного проектування є створення такої системи, яка забезпечуватиме стабільну роботу всіх компонентів. Запобігатиме аварійним ситуаціям і мінімізуватиме ризики у процесі експлуатації.

**Технічна безпека проекту.** На етапі проектування сонячних електростанцій або окремих фотопанелей враховуються численні фактори. Вони впливають на їхню стабільність і довговічність.

Перш за все, це механічна міцність конструкцій: панелі, кріплення, рами, кабельні траси, інвертори та інше обладнання. Вони повинні витримувати дію вітру, снігових навантажень, граду, перепадів температур. Усі механічні елементи виготовляються з корозійностійких матеріалів. Переважно з анодованого алюмінію або оцинкованої сталі. Це дає змогу забезпечити стабільність конструкції протягом усього терміну служби системи, який зазвичай перевищує 25 років. Додатково проект передбачає антистатичний захист, заземлення металевих елементів, захист кабельних ліній від ультрафіолетового випромінювання та перегріву.

**Електробезпека.** Сонячні панелі виробляють постійний струм високої напруги (до 1500 В), тому дотримання вимог електробезпеки є обов'язковим. Основні принципи безпечного електротехнічного проектування включають: правильний вибір перерізу кабелів відповідно до струмового навантаження, щоб уникнути перегріву; встановлення захисних автоматів, запобіжників та вимикачів у кожному контурі; організацію системи заземлення та зрівнювання потенціалів; застосування захисту від перенапруг (особливо при грозових

розрядах або імпульсних навантаженнях); маркування електричних елементів відповідно до міжнародних стандартів безпеки. При монтажі сонячних систем особливу увагу приділяють ізоляції кабельних з'єднань та герметизації конекторів типу MC4. Вони мають забезпечувати надійний контакт навіть за умов підвищеної вологості чи пилу.

**Пожежна безпека.** Сонячні установки повинні відповідати вимогам пожежної безпеки. Навіть невелика помилка у з'єднанні або коротке замикання можуть стати причиною займання. Щоб цього уникнути, в проект закладаються такі технічні рішення: використання вогнестійких кабелів і роз'ємів; застосування непалких матеріалів для монтажних конструкцій; автоматичні системи відключення при перегріві або перенапрузі; встановлення датчиків температури на великих масивах панелей; можливість локального відключення окремих секцій для запобігання поширенню аварії. Крім того, для великих сонячних електростанцій передбачається створення пожежних коридорів. Вони дозволяють оперативний доступ пожежних підрозділів у разі необхідності.

**Безпека експлуатації.** У процесі експлуатації головне завдання це підтримувати систему у справному стані. Для цього передбачається регулярне технічне обслуговування, що включає: перевірку контактів і кабелів; діагностику інверторів; контроль температури панелей; візуальні інспекції кріплень та захисних елементів; перевірку системи заземлення. Також важливим є навчання персоналу, який працює з сонячними системами. Кожен оператор повинен знати порядок дій у разі короткого замикання, пошкодження кабелю або виникнення пожежі.

**Безпека навколишнього середовища.** Усі проектні рішення повинні бути спрямовані на збереження природного середовища. Це означає мінімізацію впливу на ґрунт, флору і фауну, а також забезпечення екологічної сумісності використовуваних матеріалів. Для цього у проектах передбачаються: використання нетоксичних матеріалів у складі модулів; системи збору та очищення води для миття панелей; рекультивация земель після демонтажу систем; використання вторинних матеріалів під час будівництва або заміни

панелей. Завдяки цим заходам проєкт не лише зберігає довкілля, але й створює умови для сталого розвитку території, де він реалізується.

Безпека проектних рішень у сонячній енергетиці це багатогранна система технічних, організаційних і технологічних заходів, спрямованих на забезпечення стабільної, надійної та екологічно безпечної роботи енергетичних установок. Дотримання норм і стандартів безпеки на всіх етапах є запорукою довговічності систем, мінімізації ризиків та підвищення довіри до відновлюваної енергетики загалом. Таким чином, безпечне проектування є не лише технічним, а й стратегічним аспектом розвитку галузі. Воно формує основу для ефективного переходу до «чистої» енергетики майбутнього.

### **Висновки до розділу**

У роботі розглянуто екологічну безпеку функціонування сонячних систем. Основними напрямками зменшення негативного впливу на довкілля є впровадження екологічно чистих технологій виробництва, використання нетоксичних матеріалів. Також створення ефективних систем переробки та утилізації відпрацьованих панелей.

Що стосується безпеки проектних рішень, підкреслено необхідність дотримання вимог електричної, механічної, пожежної та експлуатаційної безпеки. Рациональне проектування сонячних установок забезпечує стабільну роботу системи й захищає персонал та навколишнє середовище від потенційних аварійних ситуацій.

## 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

*Економічні наслідки деградації сонячних панелей.* Деградація сонячних панелей знижує технічну ефективність системи й безпосередньо впливає на її економічну рентабельність. Навіть невелике зменшення продуктивності щороку призводить до втрати доходу та подовження терміну окупності та зменшення внутрішньої норми прибутковості. У сучасних умовах ефект деградації стає ключовим фактором економічного планування.

Для будь-якої сонячної установки основним показником економічної ефективності є кількість виробленої електроенергії (кВт·год). Наприклад, номінальна потужність установки становить 100 кВт, а деградація дорівнює 0,7% на рік. Через 25 років вона вироблятиме на приблизно 14-17 % менше енергії, ніж у перший рік роботи.

Якщо врахувати середню генерацію 120 000 кВт·год/рік і тариф на продаж електроенергії 639,16 коп/кВт·год це означає втрату понад  $120000 \times 0,15 \times 6,39 = 115020$  грн на рік до кінця життєвого циклу установки.

Деградація напряму впливає на термін окупності. Якщо в проекті не врахувати поступове зниження потужності, реальний термін повернення інвестицій може бути на 1-2 роки довшим. Наприклад, для станції потужністю 500 кВт із вартістю будівництва 16800000 грн: без деградації (ідеальний сценарій) термін окупності становить 6,5 років; за деградації 0,8 %/рік термін окупності збільшується до 7,2 років; за деградації 1,2 %/рік – до 7,8 років.

Вплив на вартість електроенергії (LCOE). LCOE (Levelized Cost of Energy). Це інтегральний показник, що визначає собівартість виробництва 1 кВт·год електроенергії за весь період експлуатації. Формула LCOE враховує капітальні витрати, експлуатаційні витрати, строк служби та виробіток енергії. При зниженні виробітку енергії через деградацію LCOE зростає. Це значить зниження економічної привабливості проекту.

Таблиця 5.1 – Значення зростання LCOE при різних темпах деградації

Річна деградація, %	Зростання LCOE, %
0,5	≈ +3
0,8	≈ +5–6
1,2	≈ +8–10

Деградація в 1 %/рік підвищує собівартість енергії приблизно на 10 %. Це особливо відчутно для довгострокових контрактів на постачання.

Для промислових сонячних електростанцій із потужністю понад 10 МВт питання деградації має стратегічне значення. Додаткові втрати потужності навіть у 0,5 % можуть призвести до зниження доходу на десятки тисяч гривень щороку. Це у свою чергу впливає на здатність компанії обслуговувати кредити, підтримувати фінансову стійкість і планувати модернізацію. Банки та інвестори дедалі частіше вимагають від розробників деградаційні моделі потужності. Це дозволяє зменшити ризики і забезпечити більш реалістичні прогнози доходності.

Збільшення експлуатаційних витрат унаслідок необхідності: періодичного очищення панелей; моніторингу деградаційних процесів; заміни або ремонту дефектних модулів; перевірки ізоляційних властивостей (для запобігання PID-ефекту).

Роботи з діагностики, транспортування та монтажу залишаються суттєвими статтями витрат. Тому запобігання деградації за допомогою превентивних заходів є більш економічно вигідним.

### **Висновки до розділу**

Економічні наслідки деградації сонячних панелей є масштабними та багаторівневими. Вони охоплюють безпосередні втрати електроенергії і зростання експлуатаційних витрат, збільшення LCOE та подовження терміну окупності. Тому на етапі проектування та експлуатації важливо враховувати прогнозну деградацію у фінансових моделях. Впроваджувати системи моніторингу продуктивності і планові перевірки та профілактичні заходи, що дозволяють мінімізувати економічні втрати.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Проаналізовано сутність поняття «деградація», описано її фізико-хімічні механізми та наведено типи пошкоджень. Вони спостерігаються під час експлуатації від поступового зменшення ефективності до утворення мікротріщин, корозії контактів та втрати прозорості покриття. Встановлено, що основними чинниками деградації є вплив ультрафіолетового випромінювання, температурних циклів, підвищеної вологості, електричних навантажень та зовнішнього середовища.

2. Досліджено вплив деградаційних процесів на енергетичну ефективність фотоелектричних систем. Визначено, що навіть незначне зменшення коефіцієнта перетворення може призвести до суттєвих втрат у виробництві електроенергії протягом усього життєвого циклу панелей. Розглянуто економічні наслідки деградації та можливі технологічні підходи до її зниження. Застосування вдосконалених матеріалів, захисних покриттів, систем моніторингу та діагностики в реальному часі.

3. Проведено аналіз впливу підвищення електричного потенціалу на деградаційні процеси. Було встановлено, що збільшення напруги в системі може спричинити посилення ефектів потенціально-індукованої деградації (PID). Вона проявляється у зниженні вихідного струму та локальних ушкодженнях фотоелементів. Наведено експериментальні результати, що підтверджують кореляцію між рівнем потенціалу, кліматичними умовами та швидкістю старіння матеріалів. Особливу увагу приділено прикладам із практики впливу кліматичних факторів (температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання) на деградацію панелей у різних регіонах.

Розвиток нанотехнологій, нових матеріалів і гібридних фотоелементів може суттєво зменшити деградаційні втрати. Особливу увагу привертають нові типи сонячних елементів на основі перовськітів і органічних напівпровідників. Вони мають потенціал для підвищення ефективності при одночасному зниженні вартості виробництва.

4. У роботі розглянуто екологічну безпеку функціонування сонячних систем. Основними напрямками зменшення негативного впливу на довкілля є впровадження екологічно чистих технологій виробництва, використання нетоксичних матеріалів. Також створення ефективних систем переробки та утилізації відпрацьованих панелей.

Що стосується безпеки проектних рішень, підкреслено необхідність дотримання вимог електричної, механічної, пожежної та експлуатаційної безпеки. Рациональне проектування сонячних установок забезпечує стабільну роботу системи й захищає персонал та навколишнє середовище від потенційних аварійних ситуацій.

Економічні наслідки деградації сонячних панелей є масштабними та багаторівневими. Вони охоплюють безпосередні втрати електроенергії і зростання експлуатаційних витрат, збільшення LCOE та подовження терміну окупності. Тому на етапі проектування та експлуатації важливо враховувати прогнозу деградацію у фінансових моделях. Впроваджувати системи моніторингу продуктивності і планові перевірки та профілактичні заходи, що дозволяють мінімізувати економічні втрати.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. N. Shakhovska, M. Medykovskyy, R. Melnyk та N. Kryvinska, «Optimization of the Active Composition of the Wind Farm Using Genetic Algorithms,» Tech Science Press (TSP), т. 69, № 3, pp. 3065-3078, 2021.
2. M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Modeling of the energy-dynamic modes of the wind farm with the battery energy storage system (BESS),» Journal of Computational Problems of Electrical Engineering, т. 11, № 1, 2021.
3. М. Медиковський, Р. Мельник та М. Дубчак, «Нейромережевий метод визначення активного складу вітрової електричної станції,» Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі», т. 8, р. 55 – 64, 2020.
4. M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Processing of data on the intensity of solar radiation for solar power plant management systems,» Econtechmod. An international quarterly journal, т. 7, № 3, pp. 33 - 38, 2019.
5. V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy, R. Melnyk та M. Dilai, «Optimization of wind farm structure control,» Advances in Intelligent Systems and Computing CSIT, т. 689, pp. 320-333, 2018.
6. V. Kravchyshyn, M. Medykovskyy та R. Melnyk, «Modification of Dynamic Programming Method in Determining Active Composition of Wind Power Stations,» Computational problems of electrical engineering, № Vol. 6, pp. 83-90, 2019.
7. Р. Мельник, «Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій,» в 10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні», м. Львів, Україна, 2019.
8. Г. Шмідт, А. Конеченков, М. Ільчук та М. Гріцишина, «Вітроенергетичний сектор України 2018. Огляд ринку,» Українська вітроенергетична асоціація, 2019.

9. С. Кудря, Л. Яценко та Г. Душина, Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України, Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2018.

10. О. Кармазін, Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики. Автореферат, Київ: Національної академії наук України, 2019.

11. В. Павловський, Л. Лук'яненко, І. Гончаренко та А. Захаров, «Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умови приєднання до електричної мережі,» Праці ІЕД НАНУ, № 43, pp. 18-23, 2016.

12. П. Лежнюк, В. Комар та С. Кравчук, Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія, Вінниця: ВНТУ, 2018.

13. І. Щур та В. Климко, «Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта. Електромеханічні і енергозберігаючі системи,» Електромеханічні і енергозберігаючі системи, № 2, pp. 92-100, 2018.

14. М. Кузнєцов, О. Лисенко та О. Мельник, «Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ,» Відновлювана енергетика, № 2, pp. 6-15, 2018.

15. М. Кузнєцов та О. Лисенко, «Оцінка балансу потужності комбінованих енергосистем,» Відновлювана енергетика, № 4, pp. 6-14, 2018.

16. М. Стаднік, Д. Проценко та С. Бабій, «Гібридне електропостачання з 161 використанням відновлюваних джерел енергії,» Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 4, pp. 32-41, 2020.

17. О. Болдирєв, А. Квицинський, М. Редін, М. Клопот та М. Головатюк, «Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України,» 2019. [Онлайновий]. Available: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/06/SOU-NEK-341.001\\_2019.pdf](https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/06/SOU-NEK-341.001_2019.pdf). [Дата звернення: 06.06.2021].

18. М. Кулик та О. Згуровець, «Можливості використання великих накопичувачів електроенергії для стабілізації частоти в об'єднаних енергосистемах з потужними сонячними електростанціями,» Відновлювана енергетика, № 3, р. 6–14, 2018.
19. А. Барило, М. Бенменні, В. Бурдюк, М. Бурдюк та П. Васюк, Відроджувальні джерела енергії. Монографія, Київ, 2020.
20. В. Кравчишин, Інтелектуалізація управління комплексною системою генерації електричної енергії, Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019.
21. О. Ємець та Л. Колечкіна, Ємець О.О. Задачі комбінаторної оптимізації з дробово-лінійними цільовими функціями: Монографія, Київ: Наук. думка., 2005.
22. М. Медиковский та О. Шуневич, «Виконання цілочисельного програмування для визначення складу вітрової електростанції,» Збірник 164 наукових праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, т. 57, рр. 230-233, 2017.

## ДОДАТКИ

## Додаток А

## Основні математичні моделі деградації сонячних панелей

**1. Лінійна модель (найпростіша).** Ця модель передбачає постійну швидкість деградації з часом.

$$P(t) = P_0 - D \cdot t \quad (\text{A.1})$$

де  $P(t)$  – вихідна потужність у час  $t$ ;  $P_0$  – початкова (номінальна) потужність;  $t$  – час експлуатації (наприклад, роки);  $D$  – абсолютна швидкість деградації (наприклад, Вт/рік).

Швидкість деградації у відсотках:

$$rL = \frac{D}{P_0} 100 \quad (\text{A.2})$$

$$P(t) = P_0 - \left(1 - \frac{rL}{100} t\right) \quad (\text{A.3})$$

**2. Експоненційна модель.** Ця модель краще відображає сповільнення деградації з часом, оскільки деякі початкові дефекти швидко стабілізуються.

$$P(t) = P_0 - e^{-r_E t} \quad (\text{A.4})$$

де  $r_E$  – відносна (експоненційна) швидкість деградації (одиниця/час, наприклад, 1/рік);  $e$  – основа натурального логарифма.

**3. Модель Арреніуса (для прискореного старіння).** Ця модель використовується для прогнозування деградації, пов'язаної з термічними процесами (основна причина деградації), особливо в умовах прискорених випробувань. Вона пов'язує швидкість хімічної реакції (деградації) з температурою.

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \quad (\text{A.5})$$

де  $k$  – швидкість деградації;  $A$  – передекспоненційний фактор (константа);  $E_a$  – енергія активації процесу деградації (наприклад, Дж/моль);  $k_B$  – стала Больцмана або універсальна газова стала (залежно від одиниць  $E_a$ );  $T$  – абсолютна температура (у Кельвінах, К).

**Урахування впливу кліматичних факторів.** Для точнішого моделювання швидкість деградації ( $D$  або  $r$ ) може бути представлена як функція основних стресових факторів: температури ( $T$ ) та вологості ( $H$ ).

Узагальнена модель:

$$D = f(T, H, E_{rad}, \dots) \quad (\text{A.6})$$

де  $E_{rad}$  – опромінення (УФ, сонячне);  $f(\dots)$  – емпірична функція, визначена на основі польових даних.

**Висновок.** Лінійна модель є найпоширенішою для швидких оцінок (наприклад, зниження потужності на 0,5-0,8% на рік). Моделі Арреніуса та експоненційна використовуються для глибшого аналізу довгострокової надійності та прогнозування терміну служби.

## Додаток Б

## Особливості деградації сонячних панелей відповідно до їх типу

Тип панелі	Швидкість деградації (після 1-го року)	Загальний термін служби	Примітки
Монокристалічні (с-Si)	0,35-0,71% на рік	25 – 30+ років	Висока початкова ефективність, але можуть бути чутливі до високих температур. Сучасні технології (PERC, n-type, HJT) мають нижчий коефіцієнт деградації (до 0,25%)
Полікристалічні (mc-Si)	0,5-0,67% на рік	20 – 25+ років	Трохи менш ефективні, але можуть мати кращі показники деградації, ніж старі монокристалічні моделі.
Тонкоплівкові (напр., CdTe, a-Si)	1-2% на рік (може бути значно вище)	7 – 20 років	Як правило, мають вищі початкові втрати, але краще працюють при розсіяному світлі та високих температурах. Сучасні тонкоплівкові технології покращують ці показники.