

П. Ф. Буданов¹
В. Б. Кононов¹
В. Є. Мельников¹

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія»

Проаналізовано методи контролю та оцінки якості параметрів сонячних елементів. Зазначено, що за тривалої експлуатації фотоелектричних модулів, відбувається поступова їхня деградація, як через неправильний режим експлуатації, так і під дією на них зовнішніх факторів. Деградація призводить до значного зниження продуктивності фотоелектричних модулів через погіршення їхніх основних параметрів.

Запропоновано використовувати під час експлуатації фотоелектричних модулів такі методи контролю та оцінки якості параметрів сонячних елементів: метод електричних вимірювань, коротко-строківих довгострокових тестів, інфрачервону термографію, мікроскопію, спектроскопію, метод моделювання роботи сонячного елемента, метод дистанційного моніторингу, метод порівняння з еталонними значеннями, метод ультразвукової діагностики, метод оцінки електричних характеристик, метод хімічного аналізу, метод стрес-тестів, метод безперервного контролю якості, метод вибірки та тестування, метод випадкового відбору зразків, метод тестування на втомлюваність, метод моделювання деградації. Завдяки використанню відповідних методів контролю та оцінювання якості параметрів сонячних елементів, можуть бути виявлені дефекти, які призводять до передчасного виходу з ладу фотоелектричного модуля.

Підтверджено, що за використання таких методів: вимірювання вихідної потужності, коротко-строківих та довгострокових тестів, оптичних методів, — отримується цінна інформація для аналізу продуктивності сонячних елементів, яка дозволяє оцінити стан елементів і виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях, що важливо для забезпечення надійності та ефективності експлуатації фотоелектричних модулів.

Визначено, що за використання методу моделювання та симуляції і методу дистанційного моніторингу забезпечується ефективність та надійність сонячних елементів, знижуються витрати, підвищується продуктивність систем. Визначено, що використання методів: порівняльного аналізу, ультразвукової діагностики, імпедансного аналізу, хімічного аналізу, стрес-тестів, контролю та оцінки якості, — забезпечує надійність та довговічність сонячних елементів.

Підтверджено, що використання методів: впровадження системи управління якістю, випадкового відбору зразків, тестування на втомлюваність, моделювання деградації, — забезпечує високі стандарти продукції, підвищує довіру споживачів і сприяє сталому розвитку енергетичних систем.

Обґрунтовано, що застосування описаних методів сприяє контролю та оцінюванню якості параметрів сонячних елементів.

Ключові слова: сонячний елемент, метод контролю, параметри кваліметрії, оцінка, система якості і кількості, вимірювання поверхні, інформаційно-вимірювальна система, фотоелектричний модуль

Вступ

Використання фотоелектричних панелей стало однією з основних технологій для виробництва енергії в усьому світі. Знання та конкурентоспроможні ціни є основними причинами широкого використання фотоелектричних систем. Відповідно це ставить низку задач для виробників і споживачів, головним чином, щодо якості фотоелектричних модулів, які мають витримувати вплив негативних факторів навколишнього середовища протягом усього терміну служби.

Сонячні елементи, як ключові компоненти сонячних енергетичних систем, повинні демонстру-

вати високу ефективність, довговічність і стабільність. Для оцінювання їхніх характеристик використовують комплексний підхід, оснований на різних методах вимірювання, аналізу та моделювання.

Метою статті є аналіз особливостей використання методів контролю для оцінки якості параметрів сонячних елементів.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі *задачі*:

1. Аналіз наявних методів контролю та оцінки якості параметрів сонячних елементів
2. Визначення особливостей методів контролю та оцінювання якості параметрів сонячних елементів.

Результати досліджень

Сонячні елементи є ключовими компонентами сонячних енергетичних систем, які забезпечують перетворення сонячної енергії в електричну. Оскільки використання відновлювальних джерел енергії стає дедалі актуальнішим через зміну клімату та виснаження традиційних ресурсів, забезпечення високої продуктивності та надійності сонячних елементів (СЕ) стає важливим завданням. Висока якість сонячних елементів не тільки підвищує ефективність систем, але й зменшує витрати на їхню експлуатацію та обслуговування. Таким чином, актуальність оцінки характеристик параметрів сонячних елементів полягає в такому:

– економічна вигода — висока ефективність сонячних елементів безпосередньо впливає на економічні показники. З підвищенням коефіцієнта корисної дії (ККД) зменшується площа елементів, необхідна для установки, що знижує витрати на матеріали та монтаж.

– довговічність — оцінка довговічності та надійності дозволяє прогнозувати термін служби сонячних елементів. Це критично важливо для інвесторів і споживачів, які планують довгострокове використання СЕ.

– сталий розвиток — використання якісних сонячних елементів сприяє сталому розвитку. Що вища ефективність, то менше енергії витрачається на виробництво та обслуговування елементів, що сприяє зменшенню викидів парникових газів.

– зміна технологій — інноваційні технології у виробництві сонячних елементів вимагають нових методів оцінювання їхньої якості. Використання сучасних інформаційно-вимірювальних систем та програмного забезпечення стає актуальнішим з кожним роком, оскільки нові матеріали та технології стають доступнішими.

Розглянемо особливості методів контролю та оцінювання якості параметрів сонячних елементів. На рис. 1 показані методи контролю та оцінки параметрів сонячних елементів.

Метод електричних вимірювань. Суть методу полягає в тому, що по вольт-амперній характеристиці (ВАХ) визначаються основні характеристики, такі як струм короткого замикання та напруга холостого ходу. ВАХ є важливим інструментом для аналізу продуктивності сонячних елементів. ВАХ дозволяє ідентифікувати критично важливі параметри: струм короткого замикання, напругу холостого ходу, точку максимальної потужності і ККД. ВАХ відображає залежність струму від напруги за різних умов освітлення.

Процес контролю і оцінки ВАХ, полягає в підключенні сонячного елемента до вольтметра і амперметра. Для освітлення використовується стандартне джерело світла або сонячне випромінювання для отримання реальних даних. Для побудови ВАХ вимірюються струм і напруга в різних точках.

В результаті вимірювання зміни величини струму можуть свідчити про забруднення поверхні сонячного елемента. Порівняння ВАХ різних матеріалів дозволяє оцінити, як різні структури впливають на загальну продуктивність сонячних елементів.

Процес контролю і оцінки вимірювання вихідної потужності полягає в тому, що вимірювання вихідної потужності дозволяє оцінити реальну продуктивність сонячних елементів у різних умовах.

Вимірювання вихідної потужності за різних умов освітлення і температури показує, як різні фактори впливають на продуктивність сонячного елемента.

Регулярні вимірювання є критично важливими для виявлення факторів, що впливають на ефективність сонячного елемента.

Процес контролю і оцінки вимірюваної вихідної потужності полягає у моніторингу вимірюваної вихідної потужності, який проводяться в умовах різного освітлення, температури та наявності тіні. Зібрані дані порівнюються з очікуваними значеннями для визначення відхилень.



Рис. 1. Методи контролю та оцінки параметрів сонячних елементів

Під час тестування в умовах низької освітленості виявлення зменшення вихідної потужності може вказувати на проблеми з налаштуваннями системи.

Суть експериментальних досліджень полягає у підключенні сонячного елемента до регульованого навантажувального пристрою та варіювання його опору.

В ході проведення експериментальних досліджень використовують мультипараметричний аналізатор для вимірювання за різних умов освітлення. Для побудови графіка ВАХ використовуються програмні засоби, такі як MATLAB або Python.

Метод короткострокових тестів. Метод короткострокових тестів дозволяє швидко виявити зміни у продуктивності сонячних елементів. Це може бути важливо для оперативного управління фотоелектричними системами. Метод дозволяє оцінити продуктивність сонячних елементів у стабільних умовах, визначаючи їхню реакцію на миттєві зміни в умовах навколишнього середовища. Процес контролю і оцінки здійснюється вимірюванням параметрів сонячних елементів в умовах змінюваного освітлення або навантаження. Після вимірювання проводиться обробка даних для отримання інформації про реакцію системи.

Результатом контролю і оцінки є аналіз впливу раптових змін температури або навантаження на продуктивність сонячного елемента, що може допомогти в налаштуванні системи для оптимізації роботи.

Суть експериментальних досліджень полягає у створенні тестової установки, в якій сонячні елементи піддаватимуться різним рівням освітлення і температури. В процесі експериментальних досліджень використовують автоматизовані системи для збору даних у реальному часі.

Метод довгострокових тестів. Суть методу полягає в тому, що він дозволяє оцінити довговічність і стійкість сонячних елементів до зовнішніх впливів, таких як ультрафіолетове випромінювання, волога та механічні навантаження. Довгострокові тести проводяться для оцінки надійності сонячних елементів в умовах реальної експлуатації протягом тривалого часу. Процес вимірювання проводиться протягом кількох місяців або років. Контроль і оцінка даних здійснюється в результаті постійного моніторингу характеристик сонячних елементів. Експериментальні дослідження методом довгострокових тестів проводяться шляхом встановлення сонячних елементів на відкритому повітрі за різних кліматичних умов.

В процесі експериментальних досліджень проводяться регулярні замірювання продуктивності сонячних елементів протягом тривалого часу, фіксуються зміни у струмі, напрузі і вихідній потужності.

Результатом дослідження впливу тривалої експлуатації на деградацію сонячних елементів методом довгострокових тестів, є прогнозування термінів обслуговування та заміни сонячних панелей.

Метод інфрачервоної термографії. Інфрачервона термографія — це неруйнівний метод, що дозволяє виявити температурні аномалії, такі як перегрівання або недостатня теплоізоляція на поверхні сонячних елементів. Метод базується на принципі, що об'єкти з різними температурами випромінюють різну кількість інфрачервоного випромінювання. Різниця в температурі може вказувати на перегрів або погані з'єднання. Метод дозволяє виявити температурні аномалії, які можуть вказувати на дефекти або проблеми в роботі сонячного елемента [1], [2].

Процес вимірювання методом інфрачервоної термографії полягає у використанні інфрачервоної камери для отримання термографічних зображень сонячного елемента. Потім вивчаються термографічні зображення для виявлення температурних аномалій сонячного елемента. В ході експериментальних досліджень аналізується зображення на предмет гарячих точок і порівняння їх з вимірюваннями вихідної потужності. Це може допомогти виявити неефективні ділянки та механічні uszkodження.

Результатом контролю цим методом є виявлення місць перегріву, які можуть свідчити про проблеми в електричній системі або з'єднаннях.

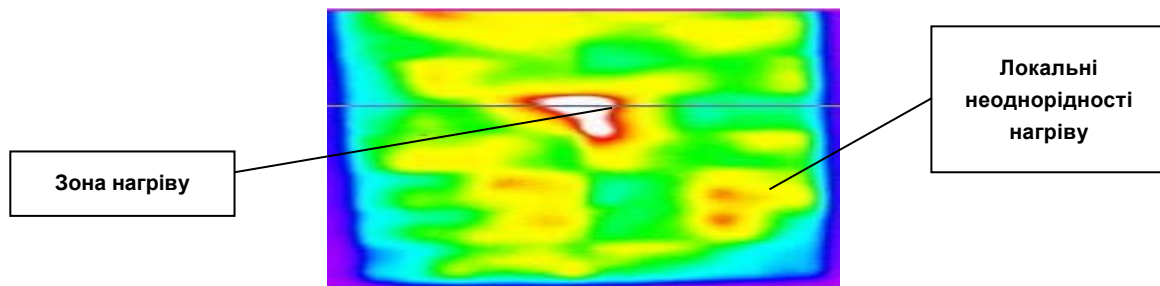


Рис. 2. Термографічне зображення сонячного елемента

Метод спектроскопії. Суть методу полягає в аналізованні спектра поглинання сонячним елементом, що є критично важливо для оптимізації його характеристик. Метод допомагає оптимізувати конструкцію та матеріали. Перед використанням методу відбувається вибір зразків матеріалів для аналізу.

Процес спектроскопічного дослідження виконується вимірюванням енергії поглинання та вивчення його характеристик. У дослідженні використовується спектрометр для вимірювання енергії спектра поглинання сонячного елемента.

В ході експериментальних досліджень спектроскопічним методом, визначаються коефіцієнти відбиття і поглинання для різних довжин хвиль. Результати дослідження порівнюються з теоретичними значеннями, які ґрунтуються на властивостях матеріалів. Результатом контролю і оцінки є аналіз спектра поглинання різних матеріалів, що дозволяє виявити, які з них мають найменші втрати енергії, що може покращити продуктивність сонячних елементів.

Метод моделювання роботи сонячного елемента. Моделювання роботи сонячного елемента — це процес створення комп'ютерних моделей, які відображають фізичні та електричні характеристики сонячних елементів. Такі моделі дозволяють прогнозувати поведінку сонячних елементів у різних умовах експлуатації, таких як зміна температури, освітленості, кута нахилу панелі тощо. Метод моделювання роботи сонячного елемента дозволяє прогнозувати його характеристики в різних умовах, враховуючи різні параметри. Моделювання базується на фізичних законах, таких як закон Ома та рівняннях, що описують напівпровідникові властивості матеріалів.

Процес моделювання полягає у використанні програмного забезпечення для моделювання, до прикладу:

- PV*SOL, програма для моделювання роботи сонячних електростанцій, яка дозволяє розраховувати продуктивність системи в залежності від її конфігурації та кліматичних умов;
- HOMER, програма використовується для оптимізації гібридних енергетичних систем, зокрема сонячні елементи;
- MATLAB/Simulink, програма, що уможливорює створення детальної моделі, враховуючи електричні характеристики та динаміку системи.

Перевагами моделювання є:

- прогнозування продуктивності — моделювання дозволяє передбачати, як зміна певних пара-

метрів вплине на загальну продуктивність системи, наприклад, зміна кута нахилу панелей може підвищити ефективність в певні сезони;

- оптимізація проєкта — моделювання допомагає у виборі оптимальних компонентів системи, зокрема типу сонячних елементів, інверторів, акумуляторів, що дозволяє зменшити загальні витрати на систему;

- зменшення витрат на дослідження — завдяки моделюванню можна провести численні експерименти в комп'ютерному середовищі без необхідності фізичного виготовлення прототипів, що значно знижує витрати;

- аналіз впливу зовнішніх факторів — моделі можуть враховувати такі фактори, як забрудненість панелей, затінення, температурні коливання, що дозволяє отримати реалістичніші прогнози.

Для проведення моделювання використовується програмне забезпечення, що створює моделі сонячного елемента з урахуванням різних параметрів. До програми водяться дані про матеріали, розміри та умови навколишнього середовища, щоб спрогнозувати струм, напругу і ККД сонячних панелей. По завершенню моделювання відбувається порівняння результатів з експериментальними даними.

Метод дистанційного моніторингу. Суть методу полягає у спостереженні за продуктивністю сонячних елементів в реальному часі. Це важливо для оперативного реагування на зміни в умовах роботи та забезпечення стабільної роботи сонячних електростанцій [1]—[3].

Дистанційний моніторинг дозволяє відстежувати продуктивність сонячних елементів у реальному часі, для управління та обслуговування сонячних установок.

Процес та контроль методу дистанційного моніторингу полягає у використанні датчиків для збору даних про температуру, вологість, освітленість, а також електричних характеристик сонячних елементів. Дані передаються до систем, які забезпечують централізований контроль за електричними станціями, що дозволяє здійснювати їхній моніторинг і управління в реальному часі.

Результатом контролю і оцінки дистанційного моніторингу є:

- своєчасне реагування на збої у роботі в режимі реального часу, що дозволяє виявляти збої у роботі та вживати заходів для їхнього усунення, що критично важливо для великих установок;

- аналіз збору даних про продуктивність дозволяє оптимізувати роботу системи;

- зменшення витрат на обслуговування та ремонти завдяки своєчасному виявленню та усуненню проблем на ранніх стадіях;

- підвищення ефективності управління шляхом використання даних, отриманих під час моніторингу, наприклад, регулювання виробництва електроенергії в залежності від попиту;

- аналіз експлуатаційних умов, шляхом моніторингу, зовнішніх факторів (погода, сезонні зміни), які впливають на продуктивність, що зі свого боку може допомогти в плануванні подальших інвестицій у систему.

Для експериментальних досліджень методу дистанційного моніторингу встановлюються системи з датчиками струму та напруги, підключеними до інтернету. В ході проведення експериментальних досліджень збираються дані про продуктивність в реальному часі, що дозволяє швидко виявляти відхилення від нормальної роботи.

Метод порівняння з еталонними значеннями. Суть методу полягає в тому, що відбувається оцінювання характеристик сонячних елементів, таких як: ефективність, струм короткого замикання, напруга холостого ходу та інших параметрів, шляхом їхнього зіставлення з еталонними значеннями, визначеними відповідними стандартами. Порівняння вимірних параметрів з еталонними значеннями дозволяє оцінити продуктивність сонячних елементів.

Процес такого контролю і оцінки включає в себе:

- визначення еталонів шляхом вибору стандартних або еталонних значень, отриманих з надійних джерел, таких як міжнародні стандарти;

- збір даних шляхом вимірювання характеристик сонячних елементів в умовах лабораторії або в реальному часі;

- аналіз результатів шляхом порівняння отриманих даних з еталонними значеннями для виявлення відхилень.

Результатом контролю і оцінки є виявлення проблем у продуктивності сонячних елементів, таких як низька ефективність або нестабільність характеристик, формування рекомендацій щодо змін у технології виробництва, які можуть покращити якість сонячних елементів. Суть експериментальних досліджень полягає у вимірюванні струму, напруги, вихідної потужності сонячних елементів і порівняння їх з характеристиками, вказаними виробником. Після експериментальних дос-

ліджень розраховується ККД, визначається його відхилення від заявлених значень.

Метод ультразвукової діагностики. Суть методу полягає в використанні ультразвукових хвиль для сканування поверхні сонячного елемента для виявлення мікротріщин та інших дефектів у сонячних модулях на ранніх стадіях, що може запобігти серйозним збиткам у майбутньому.

В ході проведення експериментальних досліджень аналізуються отримані дані для виявлення структурних дефектів і проводиться оцінка їхнього впливу на продуктивність сонячних елементів.

Процес контролю і оцінки включає в себе:

- підготовка зразків сонячних елементів для тестування шляхом очищення поверхні;
- акустичне тестування шляхом використання ультразвукових приладів для надсилання хвиль у матеріал;
- обробка отриманих сигналів після вимірювання з поверхні сонячних елементів для визначення глибини і характеру дефектів.

Результатом контролю і оцінювання є:

- раннє виявлення дефектів, що може знизити ризик відмови обладнання.
- непошкоджуваність методу, що дозволяє зберегти цілісність зразків.
- широкий спектр застосувань, зокрема перевірка якості на етапах виробництва та експлуатації.

Метод оцінки електричних характеристик. Суть методу базується на вимірюванні реактивного опору та фазового зсуву в електричній схемі. Цей метод дозволяє оцінити електричні параметри сонячного елемента, такі як опір і ємність. На першому етапі під час використання методу зразок сонячного елемента підключається до імпедансного аналізатора, потім проводяться тести на різних частотах для отримання даних про імпеданс. На завершальному етапі проводиться аналіз отриманих результатів для визначення електричних характеристик, таких як діелектрична проникність та інших параметрів, що впливають на продуктивність сонячного елемента. В ході проведення експериментальних досліджень отримані дані виявляють потенційні проблеми матеріалів та конструкцій у фотоелектричному модулі [4].

Результатом контролю методу оцінки електричних характеристик є глибше розуміння процесів, що відбуваються в сонячному елементі, виявлення проблем в конструкції, та можливість раннього діагностування дефектів, пов'язаних з електричними властивостями.

Метод хімічного аналізу. Суть методу полягає в дослідженні складу матеріалів, з яких виготовлені сонячні елементи, для виявлення домішок, які можуть негативно впливати на їхню продуктивність. Метод оцінює якість використаних матеріалів, які впливають на ефективність і довговічність сонячного елемента.

На першому етапі відбувається забір зразків матеріалів (наприклад, кремній, металеві з'єднання) для аналізу. Потім проводяться лабораторні дослідження з використанням методів спектроскопії та хроматографії, для визначення складу та вмісту домішок. Експериментальні дослідження методу полягають у проведенні хімічного аналізу на наявність домішок з використанням рентгенівської флуоресцентної спектроскопії. В ході проведення експериментальних досліджень порівнюють результати проведеного хімічного аналізу з еталонними значеннями, щоб оцінити вплив на продуктивність сонячного елемента. На останньому етапі проводиться оцінка вмісту небажаних елементів, що може вплинути на електричні та механічні властивості сонячного елемента.

Результатом контролю і оцінки є визначення якості матеріалів на етапі виробництва, що дозволяє запобігти зниженню продуктивності і допомагає в розробці нових матеріалів з кращими характеристиками та підвищує надійність і довговічність сонячних елементів [4], [6].

Метод стрес-тестів. Суть методу полягає у визначенні стійкості сонячних елементів до екстремальних умов (висока температура, вологість, механічні навантаження) для оцінки їхньої довговічності та надійності. В процесі випробувань сонячні елементи піддаються екстремальним температурним режимам, механічним навантаженням, впливу ультрафіолетового випромінювання та вологи. В ході проведення експериментальних досліджень вимірюються зміни в струмі, напрузі і вихідній потужності. В процесі аналізування результатів проводиться оцінка зміни продуктивності та виявлення слабких місць у конструкції сонячних елементів. За допомогою цього методу виявляються потенційні проблеми, що можуть виникнути в реальних умовах експлуатації фотоелектричних модулів.

Метод мікроскопії. Суть методу полягає в використанні оптичного, електронного або атомно-силового мікроскопа для детального вивчення поверхні сонячних елементів з метою визначення якісних характеристик сонячних елементів на основі їхньої мікроструктури. Цей метод дозволяє виявити потенційні проблеми на етапі виробництва. Перед початком дослідження зразки сонячних

елементів очищують та готують для мікроскопічного дослідження. У разі мікроскопічного дослідження використовується оптичний, електронний або атомно-силовий мікроскоп для вивчення мікроструктури, дефектів та тріщин сонячного елемента. Після цього проводиться аналіз та оцінка отриманих зображень для визначення можливих дефектів у матеріалах та їхній вплив на продуктивність.

Результатом контролю і оцінки є детальне вивчення поверхневих характеристик сонячних елементів, що може виявити дефекти на етапі їхнього виробництва.

Метод безперервного контролю якості. Система управління якістю включає в себе набір процедур і процесів, що дозволяють контролювати та поліпшувати якість всіх етапів виробництва сонячних елементів, а саме: планування, виконання, моніторинг і коригування процесів для досягнення встановлених стандартів. Впровадження системи управління якістю забезпечує високу якість сонячних елементів, що критично важливо для збереження конкурентоспроможності на ринку [4].

Суть експериментальних досліджень полягає у впровадженні процесу контролю якості на кожному етапі виробництва, від вибору матеріалів до остаточної перевірки. В ході проведення експериментальних досліджень використовують регулярні аудити для виявлення проблем і поліпшення виробничих процесів під час виробництва сонячних елементів.

Процес управління якістю включає в себе:

- розробку стандартів і процедур для всіх етапів виробництва, від постачання матеріалів до остаточної перевірки готової продукції;
- регулярні внутрішні та зовнішні аудити допомагають виявити можливі недоліки та коригувати процеси відповідно до виявлених проблем;
- забезпечення навчання працівників щодо стандартів якості та процедур, що сприяє зменшенню помилок та підвищенню продуктивності;
- використання інформаційно-вимірювальних систем для збору та аналізу даних про якість на всіх етапах виробництва, що дозволяє виявляти проблеми [5].

Метод вибірки та тестування, метод випадкового відбору зразків. Суть методу полягає у випадковому відборі зразків частини партії, для отримання об'єктивних даних про якість продукції без необхідності тестувати всі одиниці. Цей підхід дозволяє отримати об'єктивні дані про якість.

Процес відбору зразків починається визначення розміру вибірки. Розмір вибірки залежить від обсягу партії та необхідного рівня достовірності результатів. Зазвичай використовується випадковий метод, щоб уникнути упередженості. Можуть застосовуватися різні статистичні методи для вибору зразків. Вибрані зразки проходять різноманітні випробування, такі як: вимірювання електричних характеристик, механічні навантаження, термічні випробування, тощо.

В процесі експериментальних досліджень за цим методом вибирають випадкові зразки сонячних елементів з партії та проводять вимірювання електричних характеристик, механічних навантажень, термічні випробування, потім порівнюють результати тестів з загальними показниками партії, щоб оцінити її якість.

Результатом контролю і оцінки є:

- зменшення витрат на тестування, оскільки не потрібно перевіряти всю продукцію;
- збереження часу, оскільки вибірка може бути протестована швидше;
- отримання достовірних даних, що підвищує довіру до виробника.

Метод тестування на втомлюваність. Суть методу полягає у впливі на матеріали сонячних елементів циклічного навантаження для оцінки їхньої довговічності в умовах тривалої експлуатації. Цей метод дозволяє визначити, як матеріали реагують на стреси, які можуть виникнути в реальних умовах [6].

Процес тестування на втомлюваність починається з визначення матеріалів, які будуть підлягати тестуванню (наприклад, кремнієві пластини, з'єднання). Далі матеріали піддаються циклічним механічним або термічним навантаженням. Цикли можуть варіюватися за інтенсивністю і тривалістю. В процесі випробування вимірюються зміни електричних характеристик, таких як струм і напруга, а також фізичні зміни в матеріалах [7].

Суть експериментальних досліджень полягає у проведенні циклічних тестів, наприклад зміна температури і вологості, що імітує використання матеріалів в реальних умовах експлуатації. В ході проведення досліджень за цим методом вимірюють зміни електричних характеристик до та після тестів. Результатом контролю і оцінки є виявлення потенційних проблем до їхнього виникнення в реальних умовах експлуатації, при цьому отримуються дані для прогнозування терміну служби матеріалів.

Метод моделювання деградації. Суть методу полягає в прогнозуванні характеристик сонячних елементів, які будуть змінюватися з часом під впливом різних факторів, таких як: температурні коливання, вологість, ультрафіолетове випромінювання тощо. Процес моделювання починається

зі збору історичних даних про продуктивність сонячних елементів за різних умов експлуатації. На наступному етапі використовуються статистичні методи і алгоритми машинного навчання для аналізу даних і побудови моделей деградації. В ході проведення експериментальних досліджень порівнюються отримані результати з фактичними даними довгострокових тестів. На останньому етапі відбувається моделювання різних сценаріїв експлуатації для оцінки впливу факторів на продуктивність сонячних елементів.

Результатом контролю і оцінки є прогнозування терміну служби, що важливо для інвесторів і споживачів. допомога в оптимізації дизайну сонячних елементів, що зменшує ризики деградації, забезпечення інформації для розробки нових матеріалів з поліпшеними характеристиками.

Використання методів вимірювання вихідної потужності, короткострокові та довгострокові тестів, оптичних методів дозволяє оцінити стан елементів і виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях, що важливо для забезпечення надійності та ефективності в експлуатації фотоелектричних перетворювачів.

У разі використання методів моделювання та симуляції, дистанційного моніторингу забезпечується ефективність та надійність сонячних елементів, знижуються витрати, підвищується продуктивність систем. Використання методів: порівняльного аналізу, ультразвукової діагностики, імпедансного аналізу, хімічного аналізу, стрес-тестів, контролю та оцінки якості, — забезпечує надійність та довговічність сонячних елементів.

Висновки

Методи електричних вимірювань, вимірювання вихідної потужності, короткострокові та довгострокові тести, а також оптичні методи, надають цінну інформацію для аналізу продуктивності сонячних елементів. Використання цих методів дозволяє не лише оцінити стан сонячних елементів, але і виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях, що важливо для забезпечення їхньої надійності та ефективності в процесі експлуатації.

Методи моделювання та симуляції, а також метод дистанційного моніторингу є важливими для забезпечення ефективності та надійності сонячних елементів. Використання цих технологій не лише знижує витрати, але й підвищує продуктивність систем, через що вони стають конкурентнішими на ринку. В умовах глобального переходу на відновлювальні джерела енергії ці методи стають ключовими для сталого розвитку енергетичних систем.

Методи оцінки якості забезпечують всебічний підхід до контролю характеристик сонячних елементів, допомагають виявити недоліки, поліпшують процеси виробництва та забезпечують високу надійність сонячних елементів.

Використання методів: порівняльного аналізу, ультразвукової діагностики, імпедансного аналізу, хімічного аналізу, стрес-тестів, контролю та оцінки якості, — є критично важливими для забезпечення надійності та довговічності сонячних елементів. Методи: впровадження системи управління якістю, випадкового відбору зразків, тестування на втомлюваність та моделювання деградації, — забезпечують високі стандарти продукції, що підвищує довіру споживачів і сприяє сталому розвитку енергетичних систем. Якість і надійність сонячних елементів є вирішальними для успішного переходу до відновлювальних джерел енергії.

Сучасні методи контролю та оцінювання якості сонячних елементів є багатограними і комплексними. Кожен з описаних методів відіграє свою унікальну роль в аналізованні продуктивності, довговічності та надійності сонячних технологій. Впровадження цих методів у виробництво може суттєво поліпшити характеристики сонячних елементів, що в свою чергу, сприятиме розширенню використання сонячної енергії та зниженню витрат на її виробництво. Це забезпечить високу якість та ефективність сонячних елементів, що критично важливо для сталого розвитку енергетичних систем на основі відновлювальних джерел енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] К. М. Божко, В. І. Дунаєвський, В. Й. Котовський, В. П. Маслов, і В. А. Порев, «Інфрачервона термографія сонячних елементів, нагрітих темновим струмом,» *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Сер.: Приладобудування*, вип. 46. с. 56-63. 2013. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_prylad_2013_46_10.
- [2] І. Г. Кирисов, і П. Ф. Буданов, «Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів,» *Машинобудування*, зб. наук. праць, № 29, с. 104-117, 2022.
- [3] P. Budanov, I. Kyrysov, K. Brovko, D. Rudenko, P. Vasiuchenko, and A. Nosyk, "Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 8 (111), pp. 75-89, 2021. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>.
- [4] Я. С. Буджак, В. Ю. Єрохов, і І. І. Мельник, «Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками,» *Східноєвропейський журнал передових технологій*, № 4/8 (52), с. 24-29, 2011.
- [5] В. С. Цих, А. М. Кульчак, і А. В. Яворський, «Аналіз досліджень впливу температури на деградацію та ефектив-

ність роботи сонячних панелей.» *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, с. 77-83, 2024.

[6] M. Bdour, Z. Dalala, M. Al-Addous, A. Radaideh, and A. Al-Sadi, "A comprehensive evaluation on types of microcracks and possible effects on power degradation in photovoltaic solar panels," *Sustainability*, no. 12, iss. 16, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12166416>.

[7] В. В. Панченко, і Р. О. Харін, «Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції.» *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, т. 28, № 3, с. 73-82, 2023.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 9.12.2024

Буданов Павло Феофанович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки і електроенергетики, e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ;

Кононов Володимир Борисович — д-р техн. наук, професор, доцент кафедри електротехніки і електроенергетики, e-mail: budanov@karazin.ua ;

Мельников В'ячеслав Євгенович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електротехніки і електроенергетики, e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com .

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія», Харків

P. F. Budanov¹
V. B. Kononov¹
V. Ye. Melnykov¹

Methods of Control and Assessment of the Quality of the Parameters of Solar Elements

¹V. N. Karazin Kharkiv National University, NNI "Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy"

The article analyzes the methods of control and assessment of the quality of solar cell parameters. It is noted that during long-term operation of photovoltaic modules, their gradual degradation occurs, both due to improper operation mode and under the influence of external factors on them. Degradation leads to a significant decrease in the productivity of photovoltaic modules, due to the deterioration of their main parameters.

It is proposed to use the following methods of control and assessment of the quality of solar cell parameters during operation of photovoltaic modules: electrical measurement method, short-term and long-term tests, infrared thermography, microscopy, spectroscopy, method of modeling the operation of a solar cell, remote monitoring method, method of comparison with reference values, method of ultrasonic diagnostics, method of assessing electrical characteristics, method of chemical analysis, method of stress tests, method of continuous quality control, method of sampling and testing, method of random sampling, method of fatigue testing, method of degradation modeling. When using methods for controlling and assessing the quality of solar cell parameters, defects can be detected that may lead to premature failure of the photovoltaic module.

It has been confirmed that the use of methods: output power measurement, short-term and long-term tests, optical methods, provides valuable information for analyzing the performance of solar cells, allows you to assess the condition of the elements and identify potential problems at an early stage, which is important for ensuring the reliability and efficiency of operation of photovoltaic modules.

It has been determined that the use of methods: modeling and simulation, remote monitoring ensures the efficiency and reliability of solar cells, reduces costs, and increases system performance.

It has been determined that the use of methods: comparative analysis, ultrasonic diagnostics, impedance analysis, chemical analysis, stress tests, quality control and assessment, ensures the reliability and durability of solar cells. It has been confirmed that the use of methods: implementation of a quality management system, random sampling, fatigue testing, degradation modeling ensures high product standards, increases consumer confidence and contributes to the sustainable development of energy systems.

It has been substantiated that the use of the described methods contributes to the control and assessment of the quality of solar cell parameters.

Keywords: solar cell, control method, quality parameters, assessment, quality and quantity system, surface measurement, information and measurement system, photovoltaic module.

Budanov Pavlo F. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ;

Kononov Volodymyr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: budanov@karazin.ua ;

Melnykov Viacheslav Ye. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com