

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

¹Національний університет «Одеська політехніка»;

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія»

Проаналізовано механізми, що впливають на деградацію фотоелектричних модулів, зокрема роль мікротріщин, які знижують ефективність цих систем протягом їхнього терміну служби. Завдяки доступності, що зростає, та конкурентоспроможності ціни на фотоелектричні системи, фотоелектричні модулі стали важливим джерелом відновлювальної енергії по всьому світу. Проте однією з основних проблем є забезпечення надійності фотоелектричних модулів в умовах навколишнього середовища. Дослідження зосереджене на вивченні мікротріщин, як основного чинника, що спричиняє втрати енергії на етапі експлуатації фотомодулів. Мікротріщини можуть мати різні форми і орієнтації, що залежить від їхнього походження. Результати показали, що мікротріщини мають різний вплив на втрату потужності, зокрема для полікристалічних панелей зниження потужності становить від 0,82 % до 3,21 %, а для монокристалічних панелей — від 0,55 % до 0,9 %.

Досліджено тестові фотоелектричні модулі з навмисно створеними дефектами, такими як мікротріщини, тріщини в елементах, розбиття скла і дефекти з'єднань. Модулі піддавалися різним умовам стресу в кліматичних камерах, щоб оцінити вплив цих факторів на продуктивність. Для порівняння частина модулів також тестувалася на відкритому полігоні. Всі модулі протестовано за допомогою електролюмінесценції та вимірювань продуктивності до і після випробувань. Окрім цього, досліджено зміни у флуоресценції полімерного інкапсулятора під час випробувань на прискорене старіння, що дозволило виявити ступінь деградації матеріалів під впливом кліматичних факторів. Період індукції для виявлення ефектів флуоресценції полімерного інкапсулятора становив близько одного року вивітрювання на відкритому повітрі або 300 годин штучного опромінення.

Практичне застосування результатів цього дослідження може бути вкрай корисним для виробників та операторів фотоелектричних установок. Виявлення та моніторинг мікротріщин на ранніх стадіях дозволяє прогнозувати потенційні втрати потужності та ефективно управляти процесом технічного обслуговування фотоелектричних модулів. Використання методів ультрафіолетової візуалізації для моніторингу стану фотоелектричних модулів без необхідності їхнього демонтажу на місці дає змогу значно знизити витрати на перевірку та своєчасно виявляти дефекти, які можуть призвести до серйозних пошкоджень або втрат потужності. Дані, отримані під час дослідження, можуть бути використані для розробки рекомендованих практик для оцінки та контролю якості фотоелектричних модулів, що дозволяють підвищити їхню надійність і довговічність. До того ж, ці результати можуть сприяти удосконаленню процесів вибору матеріалів для виробництва фотоелектричних модулів, що мають покращену стійкість до механічних пошкоджень та умов навколишнього середовища.

Подальші дослідження можуть зосередитися на детальному вивченні взаємозв'язку між різними типами механічних пошкоджень, зокрема мікротріщин, та їхнім впливом на загальну ефективність фотоелектричних модулів протягом тривалого часу. В статті розглянуто, як різні кліматичні умови (температура, вологість, інтенсивність опромінення) можуть прискорювати або змінювати механізми деградації в залежності від типу технології (монокристалічна чи полікристалічна). Дослідження може також сприяти розвитку нових методів прогнозування терміну служби фотоелектричних модулів на основі їхніх механічних характеристик, що дозволить удосконалити процеси гарантії та обслуговування. Окремо важливим є розвиток точніших і доступніших методів візуалізації та моніторингу пошкоджень на ранніх етапах їхнього розвитку, таких як поліпшені технології ультрафіолетової та електролюмінесцентної візуалізації, що дозволяють оперативно діагностувати і мінімізувати потенційні втрати енергії в процесі експлуатації фотоелектричних модулів.

Ключові слова: метод контролю, оцінка, фотоелектричний модуль, система якості і кількості, вимірювання поверхні.

Вступ

Фотоелектричні модулі стали одними з найбільших у світі розподілених відновлюваних джерел енергії [1]. Це пояснюється декількома фактами, зокрема екологічно чистим джерелом енергії, простою конфігурацією, яка підтримує модульність, доступністю за низькою ціною завдяки масовому виробництву та передовими технологіями, розробленими в процесі виробництва, простотою встановлення та мінімальним обслуговуванням. Такі особливості зробили фотоелектричну технологію безпечною інвестицією з погляду збереження навколишнього середовища не лише для великих компаній, а й для приватного сектору [2].

Метою статті є аналіз особливостей моделювання характеристик сонячних елементів для оцінки якості їхніх параметрів.

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

1. Аналіз наявних методів оцінки якості параметрів сонячних елементів;
2. Розгляд особливостей методів оцінки якості параметрів сонячних елементів.

Результати досліджень

Фотоелектричні модулі складаються з різних шарів, починаючи зі скляного шару з антивідблиском, герметизувального матеріалу, матриці сонячних елементів, іншого герметизувального шару та тильного листа. Конструкція фотоелектричного модуля не забезпечує належного захисту сонячних елементів, інкапсульованих усередині, тобто комірки знаходяться під високим ризиком розвитку мікротріщин протягом будь-якої стадії життєвого циклу фотомодуля, від виробництва, транспортування, монтажу до етапу обслуговування [3], [4].

Оцінка впливу мікротріщин на продуктивність фотоелектричних модулів вважається одним з життєво важливих процесів для контролю якості параметрів сонячних елементів. Через що цей процес оцінювання повинен відповідати точним вказівкам, отриманими під час аналізу першопричин, що допоможе замінити фотомодуль без суттєвих збитків для навколишнього середовища, через проблеми його перероблення по закінченню терміну служби [5].

Робота фотоелектричних систем залежить від різних погодних умов, таких як дощ і сніг, які можуть мати великий вплив на продуктивність фотоелектричних модулів [6].

Для уникнення втрат енергії через забруднення поверхні фотоелектричних модулів, їх потрібно очищати щомісяця або кожні два тижні. Це пов'язано з тим, що річні втрати енергії через забруднені фотомодулі можуть досягати від 1,37 до 5,02 % [7].

Існує багато типів фотоелектричних сонячних елементів, які використовуються для створення фотоелектричних модулів, зокрема монокристалічні, полі- або мультикристалічні, аморфні, кремнієві і концентровані фотоелектричні елементи [2].

Класифікація сонячних елементів залежить від напівпровідникового матеріалу, який використовується в процесі виробництва. Усі ці типи мають однаковий принцип перетворення сонячного світла в електрику, і головна відмінність полягає в ефективності процесу перетворення. В основному, фотоелектричні модулі можуть мати один або кілька шарів або конфігурацій, де застосовуються різні властивості поглинання. Існують різні технологічні покоління фотоелектричних модулів. Перше покоління — це кристалічний кремній на основі моно- та полікристалічного кремнію, тоді як друге та третє покоління — це тонка плівка та різні технології тонкої плівки [3].

Товщина сонячних елементів (полі- або монокристалічних) залежить від постачальника, а ефективність елементів коливається від 26,7 % для монокристалічної технології до 22,3 % для технології на основі багатокристалічної кремнієвої пластини. Найвища ефективність, зареєстрована для тонкоплівкової технології, становить близько 23,4 % для селеніду міді, індій-галію (CIGS) і 21,0 % для сонячних елементів з телуриду кадмію (CdTe). Використання матеріалу для виробництва кремнієвих сонячних елементів, значно скоротилося протягом останніх 13 років, приблизно з 16 г/Вт до 4 г/Вт. Це зменшення пов'язано зі збільшенням показників ефективності, використанням тонших пластин і дротів [4].

Загалом кристалічний кремній є найпоширенішим типом у фотоелектричній промисловості завдяки глибоким знанням, накопиченим навколо нього. Ефективність фотомодулів знаходиться в межах 12...16 %.

Деякі типи мікротріщин на поверхні фотоелектричних модулів можуть зростати відповідно до їхньої форми та розташування в фотомодулі. Це зростання може статися через транспортування, неправильне встановлення, поведження, вібрацію, надмірне навантаження, навантаження з боку

навколишнього середовища, неправильне очищення, а також під час експлуатації та етапу обслуговування. Для оптимізації виробництва електроенергії фотоелектричними модулями, необхідно знайти вплив кожної форми мікротріщини на продуктивність фотоелектричного модуля. Це зменшить витрати на експлуатацію та обслуговування фотоелектричних модулів у майбутньому.

Тріщини це справжня проблема, яка виникає з фотоелектричними модулями протягом усього терміну їхньої служби. Нові фотомодулі можуть мати мікротріщини, але їхній вплив не береться до уваги. Проблема виникає коли фотомодулі піддаються впливу погодних умов, зовнішніх пошкоджень під час транспортування та встановлення тощо [6]. Вплив мікротріщин залежить від їхньої орієнтації та форми, яка виникає під дією різних факторів (рис. 1).



Рис. 1. Мікротріщини в сонячному елементі

На рис. 1 показано приклад мікротріщин, які класифікуються як великі, оскільки пошкодження досягає 20 % модуля. Більше того, мікротріщини можуть впливати на падіння потужності до 3,2 %, що впливає на загальну вироблену потужність фотоелектричним модулем.

Орієнтація мікротріщин відіграє важливу роль у зниженні потужності фотоелектричними модулями. До прикладу, вертикальні, дендритні мікротріщини, та множинні орієнтації значно знижують продуктивність фотомодулів. Близько 6 % модулів можуть мати тріщини після транспортування. Відповідно, це дуже важливе питання для оцінювання типів та величини мікротріщин перед встановленням сонячних модулів у фотоелектричних системах [7].

Проведений огляд літератури [1]—[6] показав, що фактори навколишнього середовища впливають на розвиток мікротріщин поверхні сонячного елемента. Такі чинники навколишнього середовища, як пил, температура навколишнього середовища, швидкість вітру, вологість, снігопад, град і піщані бурі, погіршують енергоефективність сонячних установок, та призводять до відмови фотомодулів. Різні технології виготовлення фотоелектричних модулів по-різному реагують на погодні умови, що проявляється на рівнях деградації. Крім того, вибір фотоелектричних модулів може знизити вартість до 55 % для звичайної фотоелектричної установки протягом 20 років експлуатації.

Мікротріщини в полікристалічному кремнії є серйозною проблемою для довговічності фотоелектричних модулів. Виявити мікротріщини в них можна за допомогою методів контролю: електролюмінесценції та ультрафіолетової флуоресценції (рис. 2).

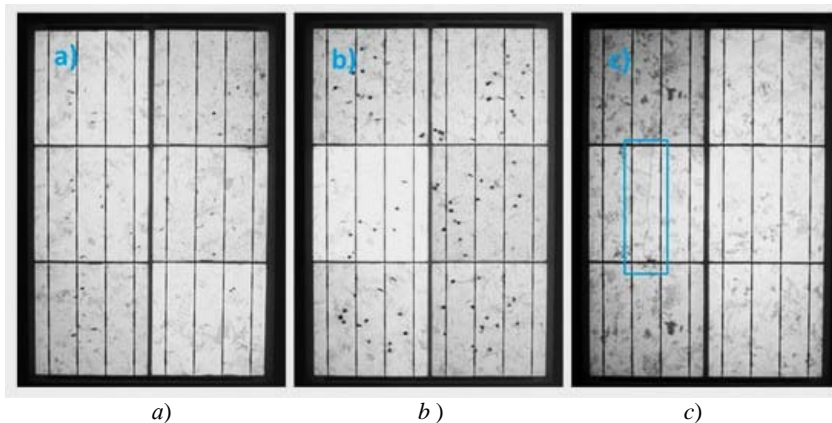
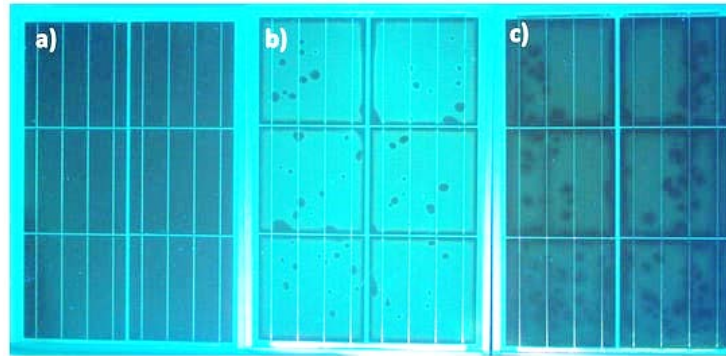


Рис. 2. Електролюмінесцентні зображення трьох фотоелектричних модулів з :
a — кількома мікротріщинами, *b* — численними мікротріщинами, *c* — з тріщиною комірки

Для дослідження поверхні сонячного елемента використовується електролюмінесцентний метод, при цьому фотоелектричний модуль працює як світловипромінювальний діод. Випромінювання, що виникає внаслідок рекомбінаційних ефектів, може бути виявлено за допомогою чутливої камери. Значення довжини хвилі камери становить від 300 до 1100 нм. На фотоелектричний модуль подається певний струм зовнішнього збудження (застосовується струм короткого замикання елемента або модуля), у той час як камера фіксує зображення випромінюваних фотонів. Пошкоджені ділянки сонячного модуля виглядають темними, або випромінюють менше, ніж ділянки без дефектів.

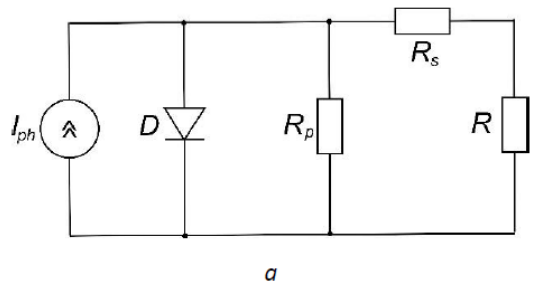
ктів. Електролюмінесценція використовується для дослідження фотоелектричних модулів з електричними неоднорідностями, викликаними внутрішніми дефектами (наприклад, межами зерен, дислокаціями, шунтами) і зовнішніми дефектами (наприклад, тріщинами комірок, корозією або перерваними контактами).

Ультрафіолетова (УФ) флуоресценція є формою люмінесценції і виявляє фізичний ефект випромінювання світла матеріалом, який поглинув світло або інше електромагнітне випромінювання (рис. 3). Вимірювання УФ флуоресценцією проводиться в темному середовищі шляхом освітлення фотоелектричних модулів ультрафіолетовим світлом і виявлення флуоресцентного світла у видимій області системою фотокамер, оснащена фільтром високих частот.

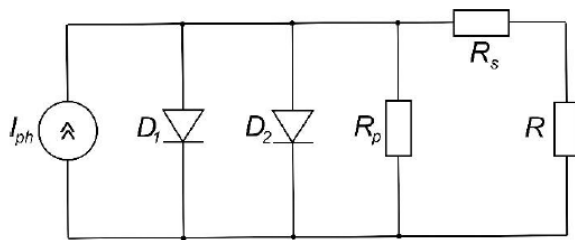


a).....b).....c)

Рис. 3. УФ-флуоресцентне зображення трьох тестових фотоелектричних модулів з мікротріщинами: *a* — фотоелектричний модуль у вихідному стані; *b* — стан фотоелектричного модуля після впливу світлового потоку протягом 1000 годин; *c* — фотоелектричний модуль після природного зберігання протягом 1,5 р.



a



б

Рис. 4. Еквівалентні схеми заміщення ФМ: *a* — однодіодна (1D); *б* — дводіодна (2D)

Для розробки і експлуатації фотоелектричних систем потрібне точне знання параметрів фотоелектричних модулів та фотоелектричних комірок. Ці характеристики зазвичай отримуються за допомогою еквівалентних схем заміщення з модельними параметрами, що описують процеси генерації і розсіювання електричної потужності.

Еквівалентні схеми заміщення фотоелектричних модулів показані на рис. 4 (4*a* — однодіодна (1D) схема; 4*б* — дводіодна схема (2D)).

Струм короткого замикання схеми заміщення визначається з формули

$$I_{sc} = q \cdot G (L_n + L_p), \quad (1)$$

де I_{sc} — струм короткого замикання; G — швидкість генерації; q — заряд електрона; L_n і L_p — відповідно дифузійна довжина електронів і дірок.

У математичних моделях, основаних на термодинамічних принципах, напругу холостого ходу U_{oc} , можна записати через температуру та рівень

освітленості згідно з виразом

$$U_{oc} = \frac{k \cdot T}{e} \ln \left(\frac{I_F}{I_0} + 1 \right), \quad (2)$$

де U_{oc} — напруга холостого ходу, k — постійна Больцмана, T — абсолютна температура, e — заряд електрона, I_F — фотострум, А;

ККД розраховується, як відношення вихідної потужності ($P_{вих}$) до потужності сонячного випромінювання, що падає на елемент P_p .

$$\eta_{KPD} = \frac{P_{вих}}{P_p} = \frac{I_m \cdot U_m}{P_p}, \quad (3)$$

де I_m і U_m — величина струму та напруги, що відповідають точці найбільшої потужності; P_p — потужність випромінювання, що падає на сонячний елемент.

Максимальна вихідна потужність сонячного елемента визначається згідно з таким виразом:

$$P_{\max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot F_z, \quad (4)$$

де I_{sc} — струм короткого замикання, U_{oc} — напруга холостого ходу, F_z — коефіцієнт заповнення ВАХ сонячного елемента.

На основі аналітичних виразів (1)—(4) розраховано значення величини фактичної потужності фотомодуля від кількості пошкоджених комірок, які подані в табл. 1.

Таблиця 1

Значення потужності 27 зразків фотомодулів за різної кількості пошкоджених комірок

Номер зразка	Кількість пошкоджених комірок	Фактична потужність фотомодуля, Вт	Номер зразка	Кількість пошкоджених комірок	Фактична потужність фотомодуля, Вт
1	4	325,786	15	1	332,091
2	10	326,297	16	3	332,291
3	5	329,051	17	2	332,301
4	11	330,255	18	14	332,301
5	2	330,315	19	1	332,476
6	11	330,327	20	6	333,303
7	1	330,49	21	4	333,899
8	5	330,6	22	1	333,974
9	1	331,464	23	4	333,974
10	3	331,464	24	1	334,693
11	4	331,508	25	1	334,898
12	1	331,778	26	1	335,468
13	2	332,022	27	1	336,293
14	4	332,057			

З діаграм на рис. 5 видно, що зі збільшенням пошкоджень комірок потужність фотоелектричних модулів значно зменшується (наприклад, зразки № 2, 4, 6, 27).

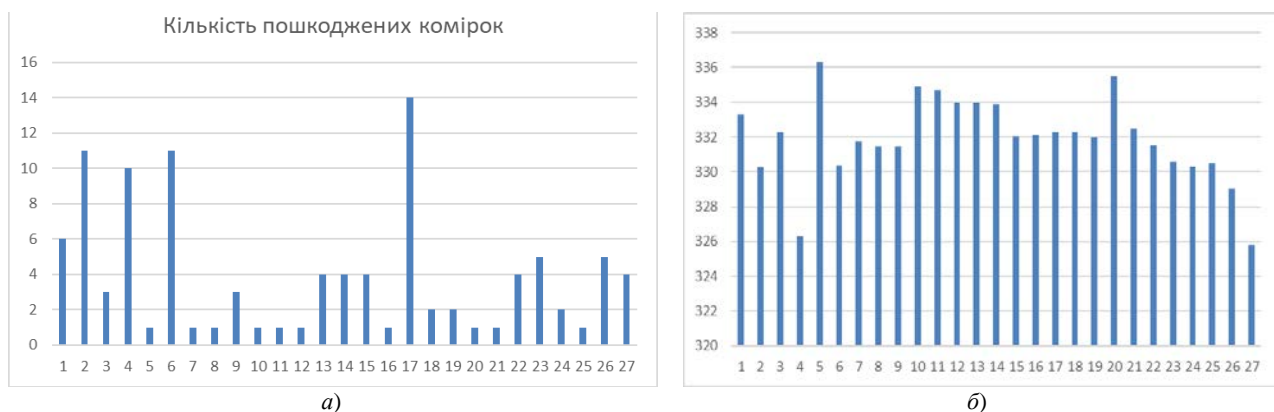


Рис. 5. Кількість пошкоджених комірок та значення потужності 27 зразків фотоелектричних модулів: а — кількість пошкоджених комірок; б — значення потужності за різних пошкоджень у комірках

З діаграм на рис. 6 та рис. 7 видно, що зі збільшенням мікротріщин в комірках потужність фотоелектричних модулів значно зменшується (наприклад, зразки № 2—6).

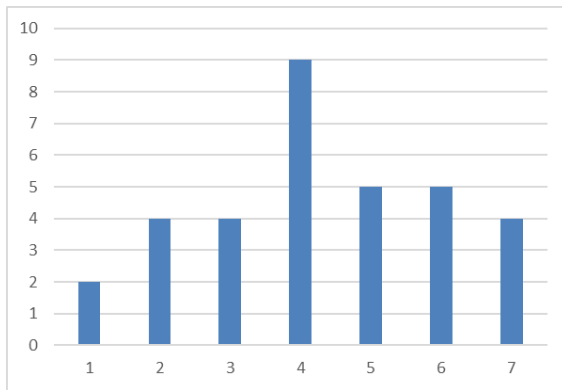


Рис. 6. Кількість мікротріщин у 7 зразках фотоелектричних модулів

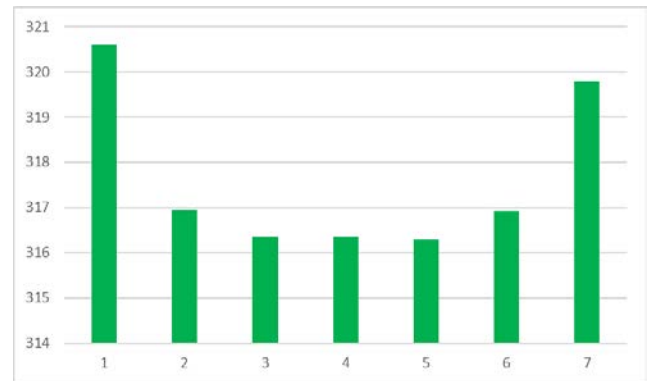


Рис. 7. Значення потужності 7-х зразків фотоелектричних модулів (за наявності мікротріщин у комірках)

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що характеристики фотоелектричних модулів, які мають механічні несправності (мікротріщини, тріщини в елементах, розбиття скла або полонки з'єднань), практично не змінюються під час зберігання за різних умов навантаження. Проте численні мікротріщини призводять до значної деградації продуктивності фотоелектричних модулів, де втрата потужності під час їхнього опромінення була вдвічі більшою, ніж у непошкоджених модулях за прискореного старіння.

Метод ультрафіолетової флуоресценції показав свою ефективність у виявленні механічних пошкоджень, таких як пошкодження сонячних елементів, а також надає корисну інформацію про час утворення тріщин. Встановлено, що флуоресценція змінюється під впливом температури, вологості, що дозволяє локалізувати механічні пошкодження модулів.

Дослідження також показало важливість виявлення мікротріщин у фотоелектричних модулях, що дозволяє здійснити точну оцінку втрат потужності та прийняття рішення щодо необхідності заміни несправних фотомодулів. Різні форми мікротріщин по-різному впливають на потужність фотомодулів, зокрема, для полікристалічних модулів втрата потужності становить від 0,82 % до 3,21%, а для монокристалічних модулів — від 0,55 % до 0,9 %. Дослідження показало, що мікротріщини можуть мати серйозний вплив на потужність, особливо якщо вони поєднуються з іншими пошкодженнями, наприклад, поганим очищенням чи механічними пошкодженнями.

Перспективами подальших досліджень є детальне вивчення взаємозв'язку між характеристиками мікротріщин, такими як їхня форма, розташування та кількість, та їхній вплив на ефективність фотоелектричних модулів. Важливим напрямком досліджень є удосконалення методів візуалізації, таких як електролюмінесценція, для точної ідентифікації не тільки мікротріщин, а й інших дефектів. Подальші дослідження повинні зосередитися на розробці нових матеріалів та технологій, які можуть мінімізувати вплив механічних пошкоджень на продуктивність фотомодулів, а також на створенні точніших методів діагностики, які дозволять оперативно виявляти дефекти.

Таким чином, подальші кроки повинні включати як теоретичні дослідження для більшого розуміння процесів деградації фотоелектричних модулів, так і практичні випробування, для вдосконалення технологій діагностики та конструкцій фотомодулів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. С. Цих, А. М. Кульчак, і А. В. Яворський, «Аналіз досліджень впливу температури на деградацію та ефективність роботи сонячних панелей», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, с. 77-83, 2024.
- [2] В. І. Мартинюк, К. С. Клен, і В. Я. Жуйков, «Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними», *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, № 26 (2), с. 1-9, 2021.
- [3] 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.
- [4] Р. В. Зайцев, М. В. Кіріченко, К. О. Мінакова, і А. М. Дроздов, «Підвищення ефективності промислових зразків кремнієвих сонячних елементів», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, № 2 (3), с. 75-83, 2021.
- [5] К. М. Божко, В. І. Дунасвський, 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.
- [6] В. В. Панченко, і Р. О. Харін, «Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи соняч-

ної електростанції.» *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, т. 28, № 3, с. 73-82, 2023.

[7] 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>.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.12. 2024

Дядюра Костянтин Олександрович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри біомедичної інженерії, e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ;

Національний університет «Одеська політехніка», Одеса;

Пономаренко Олена Михайлівна — асистент кафедри електротехніки і електроенергетики, e-mail: budanov@karazin.ua .

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

К. О. Dyadyura¹
О. М. Ponomarenko²

Characteristic Features of the Methods of Solar Elements Parameters Estimation

¹Odesa Polytechnic National University;

²V. N. Karazin Kharkiv National University, NNI "Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy"

The article analyzes the mechanisms that affect the degradation of photovoltaic modules, in particular the role of microcracks, which reduce the efficiency of these systems during their service life. Due to the increasing availability and competitiveness of the price of photovoltaic systems, these technologies have become an important source of renewable energy worldwide. However, one of the main problems is ensuring the reliability of photovoltaic modules in the conditions of the environmental. The research focuses on the study of microcracks as the main factor causing energy losses during the operation phase of photovoltaic modules. Microcracks can have different shapes and orientations, depending on their origin. The results showed that microcracks have different effects on power loss, in particular for polycrystalline panels the power reduction is from 0.82 % to 3.21 %, and for monocrystalline panels — from 0.55 % to 0.9 %.

The study also includes testing of test photovoltaic modules with intentionally created defects, such as microcracks, cracks in the elements, glass breakage and connection defects. The modules were subjected to various stress conditions in climatic chambers to evaluate the effect of these factors on performance. For comparison, some of the modules were also tested in an open field. All modules were tested using electroluminescence and performance measurements before and after the tests. In addition, changes in the fluorescence of the polymer encapsulant during accelerated aging tests were investigated, which allowed to reveal the degree of degradation of the materials under the influence of climatic factors. The induction period for detecting the effects of the fluorescence of the polymer encapsulant was about one year of outdoor weathering or 300 hours of artificial irradiation.

The practical application of the results of this study may be extremely useful for manufacturers and operators of photovoltaic installations. Early detection and monitoring of microcracks allows for the prediction of potential power losses and effective management of the maintenance process of photovoltaic modules. The use of ultraviolet imaging techniques to monitor the condition of photovoltaic modules without the need to dismantle them on site allows for significant reduction of inspection costs and timely detection of defects that can lead to serious damage or power loss. The data obtained from the study can be used to develop recommended practices for the evaluation and quality control of photovoltaic modules, which will increase their reliability and durability. In addition, these results can contribute to the improvement of the selection processes for materials for the production of photovoltaic modules with improved resistance to mechanical damage and environmental conditions.

Further research can be focused on a detailed study of the relationship between different types of mechanical damage, in particular microcracks, and their impact on the overall efficiency of photovoltaic modules over time. The article examines how different climatic conditions (temperature, humidity, irradiance) can accelerate or change degradation mechanisms depending on the type of technology (monocrystalline or polycrystalline). The study may also contribute to the development of new methods for predicting the service life of photovoltaic modules based on their mechanical characteristics, which will allow for improved warranty and maintenance processes. Of particular importance is the development of more accurate and accessible methods for visualizing and monitoring damage at early stages of their development, such as improved ultraviolet and electroluminescent imaging technologies, which will allow for prompt diagnosis and minimization of potential energy losses during the operation of photovoltaic modules.

Keywords: control method, assessment, photovoltaic module, quality and quantity system, surface measurement.

Dyadyura Kostiantyn O. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Biomedical Engineering, e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ;

Ponomarenko Olena M. — Assistant of the Chair of Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: budanov@karazin.ua