

Безконтактний метод вимірювання шунтового опору окремих сонячних елементів у складі панелі

Для періодичного контролю фотоелектричних сонячних панелей під час їх експлуатації важливим завданням є отримання даних про внутрішній стан пластин сонячних елементів, який може свідчити про початок процесу деградації внаслідок появи і розвитку локальних прихованих дефектів. Об'єктивним критерієм стану сонячної панелі є результати вимірювання її електричних параметрів. Одним із таких важливих параметрів є шунтовий опір. При зменшенні величини шунтового опору в пластинах сонячних елементів починає додатково виділятися тепло Джоуля. Наслідком цього процесу може бути локальне перегрівання панелі, а також зменшення коефіцієнта корисної дії. Значне падіння коефіцієнта корисної дії сонячної панелі є ознакою її деградації. Деградовані панелі виводять із експлуатації. На думку авторів, прогноз початку і подальшого розвитку процесу деградації можливий на основі даних про величину шунтового опору окремих сонячних елементів у складі панелі. Авторами запропоновано безконтактний метод вимірювання шунтового опору сонячних елементів, які вже змонтовані у панель і не мають гальванічних контактів для контролю. Як безконтактні датчики використано плоскі антени прямокутної форми зі склотекстоліту, який вкрито одностороннім шаром міді. Датчики розташовують безпосередньо над сонячними елементами. Сигнал від генератора послідовно проходить через лінійку шунтових опорів усіх сонячних елементів, а його амплітуда поступово спадає. Антенні датчики дозволяють без спотворень зняти сигнал і відобразити його на екрані цифрового осцилографа. За наявності рівномірного спаду сигналу від однієї антени до наступної маємо однакову величину шунтового опору та ідентичність сонячних елементів. На думку авторів, таким методом необхідно перевіряти сонячні панелі, які планують встановлювати у важкодоступних або складних для монтажу і демонтажу місцях: на фасадах висотних будівель, на дахах, навісах тощо. Це зменшить ризики додаткових витрат на заміну тих панелей, які піддаються деградації під час експлуатації. Обґрунтування безконтактного методу вимірювання шунтового опору і його експериментальна перевірка в лабораторних умовах на прикладі сонячної панелі з полікристалічного кремнію номінальною потужністю 270 Вт є предметом цієї роботи.

Ключові слова: прогнозоване технічне обслуговування; безконтактне вимірювання; фотоелектричний сонячний елемент; сонячна панель; шунтовий опір; вольт-амперна характеристика.

Актуальність теми. За результатами вимірювань електричних параметрів фотоелектричних сонячних панелей наразі здійснюють їх контроль та приймають рішення про їх якість і придатність до експлуатації. На думку авторів, періодичний контроль сонячних панелей дозволяє виявити їх приховані дефекти й прогнозувати процеси їх деградації в майбутньому. Такий підхід має забезпечити своєчасне виведення із експлуатації неякісних панелей, а також запобігти монтажу підозрілих на приховані дефекти панелей у відповідальних місцях (дахах, фасадах висотних споруд тощо). Застосування саме безконтактних методів вимірювання дозволяє отримати інформацію про наявність дефектів в окремих сонячних елементах у складі панелі, оскільки ці елементи позбавлені безпосереднього доступу до них гальванічними контактами.

Шунтовий опір сонячної панелі складається із шунтових опорів послідовної лінійки сонячних елементів. Деградований внаслідок прояву зовнішніх пошкоджень або внутрішніх структурних дефектів сонячний елемент має в кілька разів менший шунтовий опір, ніж звичайний елемент. Через зменшений шунтовий опір деградованого елемента починає проходити більший струм і виділятися додаткове тепло Джоуля. Сам елемент піддається впливу процесу деградації і згодом стає паразитним навантаженням для сонячної панелі.

Автори вважають важливим здійснювати періодичний контроль сонячної панелі саме на основі безконтактного методу вимірювання шунтового опору усіх сонячних елементів під час експлуатації панелей. Цей метод може бути впроваджений також під час вхідного контролю фотоелектричних сонячних панелей перед їх монтажем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Концепція прогнозованого технічного обслуговування технічних об'єктів і систем різного рівня складності наведена в [1]. Відповідно

до неї безконтактний метод вимірювання шунтового опору можна розглядати як основу для прогнозування розвитку негативних процесів у сонячних панелях та прийняття рішення про вчасне виведення їх із експлуатації і заміну на нові.

Фізичні основи роботи фотоелектричних сонячних елементів на основі кристалічного кремнію розглянуто у монографії [2]. Метод еквівалентних електричних схем є наразі ефективним засобом аналізу електричних параметрів та характеристик фотоелектричних сонячних елементів і панелей [2, 3]. Той самий підхід не втрачає актуальності під час розгляду параметрів масивів сонячних панелей і автономних електричних мереж на їх основі [4].

Базова модель сонячного елемента містить один фотодіод, а її вдосконалена версія – два фотодіоди [5, 6]. Діод, джерело напруги, послідовний і шунтовий опори є основними елементами еквівалентної електричної схеми сонячного елемента. Параметрами схеми є фотострум, прямий струм діода, вихідний струм і вихідна напруга. Дослідження шунтового опору виконують не тільки на основі електричних вимірювань, а також оптичними та оптико-електронними методами [7]. Одним із шляхів вдосконалення моделей є застосування в моделі трьох діодів [8]. Така ускладнена модель надає найбільшу сумісність теоретичних вольт-амперних характеристик сонячних елементів із її експериментальними формами. Ґрунтовний огляд результатів моделювання фотоелектричних сонячних елементів можна знайти в [9]. Довідник з фотовольтаїки [10] також наразі не втрачає своєї актуальності в питаннях моделювання сонячних елементів і панелей. Математичні моделі супроводжують розгляд еквівалентної електричної схеми сонячного елемента [11]. Найбільш поширеним є моделювання на основі еквівалентної схеми із одним діодом. Приклади таких досліджень можна знайти зокрема в [12, 13].

Основою експериментального отримання вольт-амперних характеристик (ВАХ) сонячних елементів наразі є вимірювання із застосуванням спеціалізованих приладів (наприклад, характерографа 4200-SCS) від компанії Keithley Instruments [14]. На основі отриманих ВАХ розраховують послідовний і шунтовий опори. При цьому функції з розрахунку покладені на сам прилад. Із сімейства ВАХ для світлової (прямої) гілки отримують значення послідовного опору, а із темної (зворотної) гілки визначають шунтовий опір за формулою (1). Шунтовий опір дорівнює котангенсу кута нахилу зворотної гілки ВАХ:

$$Rsh = \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (1)$$

де ΔU – приріст зворотної напруги; ΔI – приріст зворотного (темного) струму.

В результаті науково-дослідної роботи колективу, до якого належать автори, було розроблено динамічний метод отримання ВАХ сонячних елементів і панелей на основі принципу лінійної розгортки струму. На екрані осцилографа при цьому отримують ВАХ у координатах «струм – напруга». Таким чином, осцилограф тут використано як характерографа [15, 16]. На основі отриманих ВАХ далі розраховують електричні параметри панелі, зокрема шунтовий опір Rsh за формулою (1). Проте виміряти параметри окремих сонячних елементів у складі панелі описаними методами неможливо, оскільки немає можливості встановити гальванічний контакт із ними.

Таким чином, розробка методу безконтактного вимірювання шунтового опору окремого сонячного елемента є нагальним завданням, вирішення якого дозволить вдосконалити ранню діагностику процесу деградації сонячної панелі на принципах неруйнівного контролю.

Метою статті є обґрунтування безконтактного методу вимірювання шунтового опору сонячних елементів на основі збудження в сонячній панелі імпульсного сигналу від зовнішнього генератора і прийому сигналу від кожного із елементів за допомогою антенного датчика та з наступним розрахунком шунтового опору як частини від сумарного шунтового опору панелі, що є пропорційною до приросту (спаду) амплітуди вимірювального сигналу.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо еквівалентну електричну схему сонячного елемента на основі одного діода (рис.1).

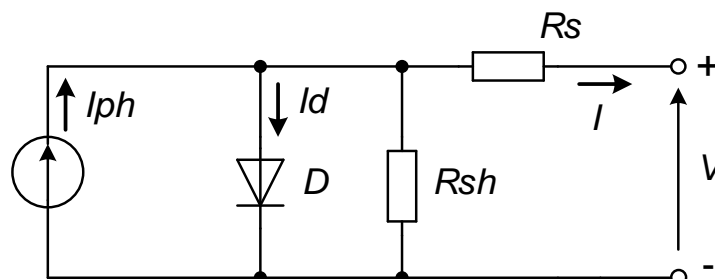


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема сонячного елемента: I_{ph} – фотострум; I_d – струм діода; I – вихідний струм; V – вихідна напруга; D – діод; R_s – послідовний опір; Rsh – шунтовий опір

Еквівалентну електричну схему сонячної панелі утворює послідовне з'єднання кількох десятків однакових кіл сонячних елементів (рис. 1). Шунтовий опір панелі є сумою шунтових опорів усіх

послідовно з'єднаних сонячних елементів. Для 48-вольтової панелі типовий шунтовий опір становить 1000 Ом [4]. Аналогічно для панелі із номінальною вихідною напругою 24 В, яка побудована на масиві із 60 сонячних елементів, типова величина шунтового опору дорівнює 500 Ом. Кожний із сонячних елементів панелі має типовий шунтовий опір приблизно 8 Ом. Для безконтактного вимірювання шунтового опору авторами запропоновано спеціальний вимірювальний стенд.

Вимірювальний стенд для безконтактного вимірювання шунтового опору окремих фотоелектричних сонячних елементів у складі сонячної батареї містить масив із плоских прямокутних антен, максимальна кількість яких дорівнює кількості сонячних елементів у панелі, генератора імпульсних сигналів і цифрового двоканального осцилографа. Стенд забезпечує безконтактне вимірювання шунтового опору кожного із сонячних елементів на основі порівняння за допомогою осцилографа амплітуди сигналу від антени, яка розташована над будь-яким із сонячних елементів, із амплітудою сигналу від імпульсного генератора. Під час використання цифрового осцилографа осцилограми сигналів зберігаються у пам'яті типу флеш і можуть бути надалі оброблені як табличні масиви формату EXEL. Обґрунтування безконтактного методу вимірювання шунтового опору побудовано на розгляді еквівалентної електричної схеми сонячної панелі в режимі малого змінного сигналу.

Для імпульсних сигналів малої амплітуди, якої недостатньо для відкриття діода D (рис. 1), та за відсутності освітлення еквівалентна електрична схема сонячної панелі складається лише із послідовного з'єднання шунтових опорів усіх сонячних елементів.

Антенний датчик можна представити у вигляді конденсатора Ca , верхня обкладинка якого – це пластина сонячного елемента, а нижня обкладинка – сама антена прямокутної форми, яка виготовлена із металізованого склотекстоліту. Нижню обкладинку конденсатора Ca приєднано до високоомного навантаження $R1$, сигнал з якого відображають на екрані цифрового осцилографа. Еквівалентна електрична схема сонячної панелі разом із стендом для безконтактного вимірювання шунтового опору наведена на рисунку 2.

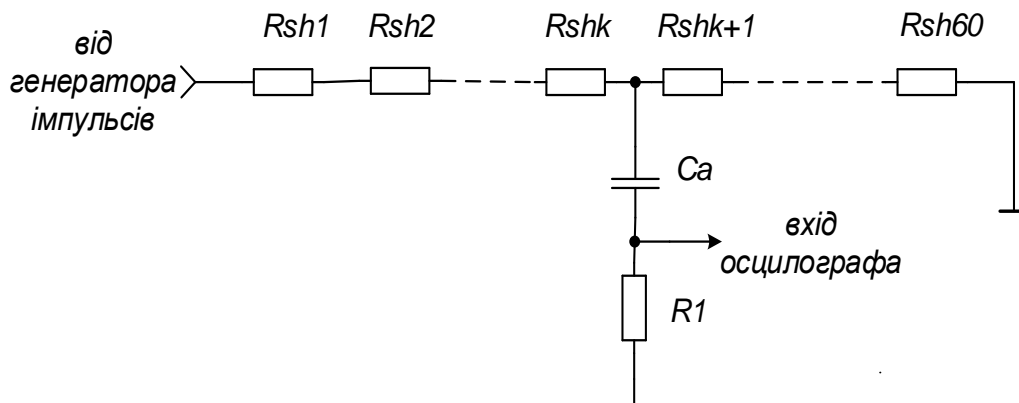


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема сонячної панелі потужністю 270 Вт із 60 елементів у складі вимірювального стенду в режимі малого змінного сигналу:

$Rshk$ – шунтовий опір k -го сонячного елемента; Ca – антенний датчик; $R1$ – резистор 1 МОм

Безконтактний метод вимірювання шунтового опору реалізований за допомогою відповідного засобу. Автори запропонували формулу для опису цього засобу.

Засіб безконтактного вимірювання шунтового опору окремих фотоелектричних сонячних елементів у складі сонячної панелі містить масив із плоских антен, які розташовані безпосередньо над поверхнею панелі і максимальна кількість яких дорівнює кількості сонячних елементів, перемикача контактів, генератора імпульсних сигналів і цифрового осцилографа, відрізняється тим, що після подачі сигналів від генератора до сонячної панелі шунтовий опір кожного із сонячних елементів вимірюють осцилографом на основі порівняння амплітуд, отриманих від антен сигналів із амплітудою сигналу генератора і наступним розрахунком опору за результатом множення відносного значення зміни амплітуди на шунтовий опір всієї панелі. В наведеній формулі необхідним для розрахунку параметром є шунтовий опір всієї сонячної панелі.

Для визначення шунтового опору Rsh сонячної панелі автори пропонують застосувати динамічний метод вимірювання, в якому шунтовий опір панелі і додатковий резистор $R0$ утворюють дільник. При подачі на цей дільник імпульсної напруги відомої амплітуди і вимірюванні за допомогою осцилографа падіння напруги на додатковому резисторі $R0$ розраховують шунтовий опір панелі як величину опору $R0$ помножену на відношення падіння імпульсної напруги на сонячній панелі і в додатковому резисторі:

$$R_{sh} = R_0 \frac{\Delta U_{R_{sh}}}{\Delta U_{R_0}} \quad (2)$$

Шунтовий опір сонячної панелі дорівнює сумі шунтових опорів сонячних елементів:

$$R_{sh} = \sum_{i=1}^N R_{shi}, \quad (3)$$

де N – кількість сонячних елементів у панелі; R_{shi} – шунтовий опір i -го елемента.

Для панелі на основі 60 сонячних елементів із полікристалічного кремнію номінальною потужністю 270 Вт, яку дослідили автори, величина шунтового опору, що була отримана за результатами динамічних вимірювань та розрахунку за формулою (2) дорівнює 210 ± 15 Ом або в середньому по $3,5 \pm 0,25$ Ом на кожен із сонячних елементів.

Осцилограми сигналів на сонячній панелі (фактично на її шунтовому опорі) і додатковому опорі дільника R_0 , на основі яких виміряли шунтовий опір цієї панелі, наведено на рисунку 3.

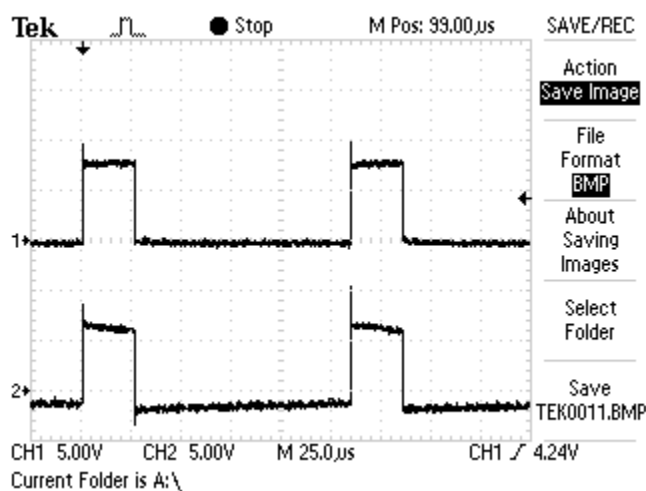


Рис. 3. Осцилограми сигналів процесу вимірювання шунтового опору сонячної панелі:
канал 1 – сумарний сигнал на обох плечах дільника (сонячної панелі і додаткового резистора);
канал 2 – сигнал на додатковому резисторі 1500 Ом

На першому етапі дослідження безконтактного методу вимірювання шунтового опору площиною вимірювання була обрана робоча (лицьова) поверхня сонячної панелі. Зовнішній вигляд антенних датчиків, які були розташовані над елементами сонячної панелі, наведено на рисунку 4.



Рис. 4. Лінійка антенних датчиків зі щупами від 4-канального осцилографа на лицьовій стороні сонячної панелі: світловий екран тимчасово прибрано

На лицьовій поверхні між датчиком і пластиною розташоване скло товщиною приблизно 3 мм. У результаті проведених досліджень встановлено, що більшу чутливість запропонованого методу забезпечують вимірювання на тильній стороні сонячної панелі (рис. 5), де відстань між поверхнею датчика і пластиною сонячного елемента є найменшою, оскільки датчик і елемент розділяє шар клею і тонка полімерна плівка сумарною товщиною меншою за 100 мікрон.



Рис. 5. Вимірювання сигналу від антенного датчика над 47-м сонячним елементом на тильній стороні панелі: зафарбовано місце розташування механічного uszkodження пластини; використано двоканальний осцилограф Tektronix 1002

При послідовному вимірюванні імпульсного сигналу антенного датчика (сенсора) на кожен із 60 елементів сонячної панелі його амплітуда має рівномірно зменшуватися. Порушення рівномірності свідчать про відхилення шунтового опору від середнього значення. В зоні uszkodження (47-й елемент) вдалося зафіксувати значно меншу величину відносної зміни амплітуди сигналу порівняно із сусідніми елементами. Таким чином локалізація елемента із малим шунтовим опором збігається із місцем механічного uszkodження панелі. Осцилограми вимірювальних сигналів наведено на рисунку 6.

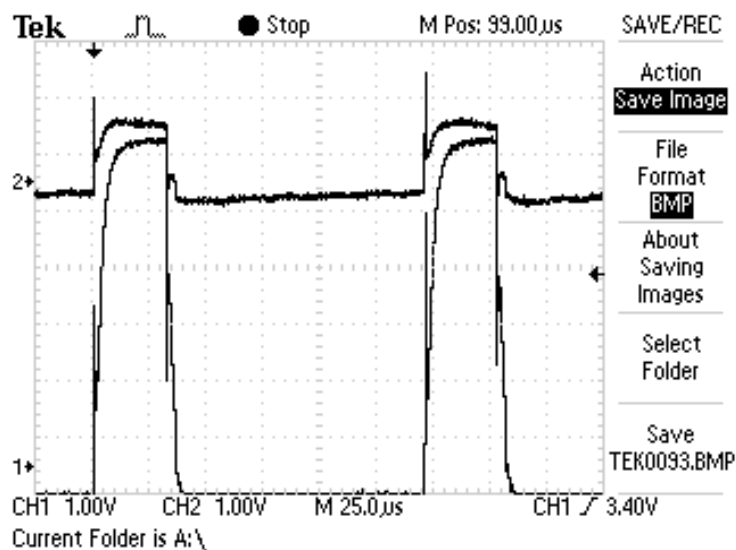


Рис. 6. Осцилограми сигналів: канал 1 – від генератора; канал 2 – від сенсора над 47-м елементом сонячної панелі

Експерименти довели, що амплітуда імпульсного сигналу наразі не є високо стабільною. Тому запропоновано вимірювати шунтовий опір окремих сонячних елементів через відношення амплітуд сигналів генератора і сенсора. Результати розрахунку відносної величини спаду сигналу сенсора над сонячними елементами на основі отриманих осцилограм наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахунок відношення амплітуд сигналів генератора і сенсора

№ елемента	Амплітуда сигналу генератора $U_g, В$	Амплітуда сигналу сенсора $U_s, В$	Коефіцієнт відношення амплітуд сигналів сенсора і генератора $k, \%$	Зміна коефіцієнта відношення амплітуд $\Delta k, \%$
44	$5,76 \pm 0,02$	$1,36 \pm 0,02$	23,6	
45	$5,8 \pm 0,02$	$1,24 \pm 0,02$	21,4	- 2,2
46	$5,64 \pm 0,02$	$1,08 \pm 0,02$	19,1	- 2,3
47	$5,64 \pm 0,02$	$1,04 \pm 0,02$	18,4	- 0,7
48	$5,76 \pm 0,02$	$0,96 \pm 0,02$	16,3	- 2,1

Відповідно до результатів розрахунків (табл. 1) шунтовий опір 47-го сонячного елемента виявився приблизно втричі меншим від середнього значення і склав $1,1 \pm 0,1$ Ом. Додаткове виділення тепла Джоуля на цьому елементі можна оцінити у $0,2$ Вт, що не впливає на робочі характеристики сонячної панелі. Проте слід вважати важливим періодичний контроль елементів панелі під час її експлуатації з метою попередження прискореного розвитку процесу її деградації внаслідок наявності дефекту.

ВАХ сонячної панелі, яка була отримана в координатах «струм – напруга» в режимі лінійної розгортки струму від нуля до струму короткого замикання [15, 16] і шунтовий опір елементів якої був вимірний безконтактним методом, наведено на рисунку 7.

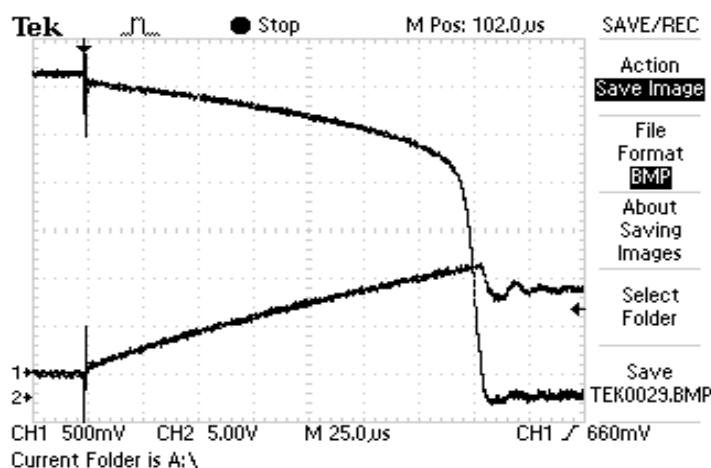


Рис. 7. ВАХ сонячної панелі номінальною потужністю 270 Вт: канал 1 – осцилограма лінійно зростаючого струму на вимірювальному резисторі 100 мОм; канал 2 – осцилограма вихідної напруги сонячної панелі; тривалість розгортки 175 мкс; овітлення сонячне

Експериментально були отримані такі параметри досліджуваної сонячної панелі:

- струм короткого замикання 8,94 А;
- напруга холостого ходу 33,6 В;
- напруга точки максимальної потужності 27,5 В;
- струм точки максимальної потужності 8,75 А;
- максимальна потужність в умовах реальної сонячної освітленості 240 Вт;
- форм-фактор 0,8.

Дослідження безконтактного методу вимірювання шунтового опору сонячних елементів виявили такі його особливості:

- метод є дієвим навіть в умовах денного освітлення;
- полярність вимірювальних імпульсів може бути довільною, а сигнал можна подавати як на шину «плюс», так і на шину «мінус» сонячної панелі;
- оптимальним є діапазон частоти вимірювальних імпульсів від 0,4 до 8 кГц;

- при збільшенні частоти вимірювальний сигнал починає спотворюватись внаслідок впливу електричної ємності сонячної панелі;
- основний внесок у похибку методу надає похибка аналого-цифрового перетворювача осцилографа;
- опір навантаження антенного датчика залежить від його площі і частоти сигналу, його величина знаходиться в межах (0,3–10) МОм;
- необхідно вдосконалювати метод у напрямі автоматичного почергового перемикання антенних датчиків і запису даних у пам'ять осцилографа.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі обґрунтовано безконтактний метод вимірювання шунтового опору сонячних елементів у складі панелі. Експериментально доведено, що цей метод надає можливість здійснювати неруйнівний контроль сонячних панелей під час їх експлуатації, що є важливим для ранньої діагностики процесів деградації і попередження раптових відключень, аварій і руйнацій сонячних модулів у складі сонячних електростанцій та автономних джерел живлення. Запропоновано засіб безконтактного вимірювання, апробацію якого здійснено в лабораторних умовах.

Наступним етапом дослідження безконтактного методу вимірювання шунтового опору є вирішення таких завдань:

- розробка і аналіз моделі вимірювального тракту;
- аналіз джерел і оцінка величини похибок;
- розробка нечітких моделей оцінювання результатів вимірювання шунтового опору;
- автоматизація процесу вимірювання.

References:

1. Aksjutenko, I.S. & Aksjutenko, P.S. (2021), «Tekhnologii ta zasoby organizacii systemy tekhnichnoho obsluhovuvannja», *Tekhnichna inženierija*, No 2, pp. 72–76.
2. Priambodo, P.S., Poespawati & N.R., Hartanto, D. (2011), «Solar cells – silicon wafer-based technologies», *Intechopen*, pp. 1–28, doi: 10.5772/19935
3. Long, W. (2021), «On the limiting efficiency for silicon heterojunction solar cells», *Solar energy materials and solar cells*, Vol. 231, 111291, doi: 10.1016/j.solmat.2021.111291.
4. Swarnkar, N.K., Lalwani, M., Mahela, O.P. & Khan, B. (2021), «Multivariable passive method for detection of islanding events in renewable energy based power grids», *IET renewable power generation*, No 16, pp. 497–516, doi: 10.1049/rpg2.12355
5. Afghan, S.A., Almusawi, H. & Gega, H. (2017), «Simulating the electrical characteristics of a photovoltaic cell based on a single-diode equivalent circuit model», *Annual session of scientific papers IMT ORADEA*, 6 p., doi: 10.1051/mateconf/201712603002
6. Humada, A.M., Mekhleif, S. & Hamada, H.M. (2016), «Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review», *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 56, pp. 494–509, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.051
7. Somasundaran, P. & Gupta, R. (2016), «Influence of local shunting on the electrical performance in industrial silicon solar cells», *Solar energy*, Vol. 139, pp. 581–590, doi: 10.1016/j.solener.2016.10.020
8. Qais, M.H., Hasanien, H.M. & Alghuwainem, S. (2019), «Identification of electrical parameters for three-diode photovoltaic model using analytical and sunflower optimization algorithm», *Applied energy*, Vol. 250, pp. 109–117, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.05.013
9. Chin, V.J., Salam, Z. & Ishaque K. (2015), «Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review», *Applied energy*, Vol. 154, pp. 500–519, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.035
10. Luque, A. & Hegedus, S. (2003), «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», New York, Wiley, 1180 p.
11. Rawa, M. et al. (2022), «Single diode solar cells – improved model and exact current-voltage analytical solution based on Lambert's W function», *Sensors*, Vol. 22(11), 4173, pp. 1–34, doi: 10.3390/s22114173
12. Yaqoob, S.J. et al. (2021), «Comparative study with practical validation of photovoltaic monocrystalline module for single and double diode models», *Scientific reports*, 14 p., doi: 10.1038/s41598-021-98593-6
13. Azzouzi, M., Popescu, D. & Bouchahdane, M. (2016), «Modeling of electrical characteristics of photovoltaic cell considering single-diode model», *Journal of clean energy technologies*, Vol. 4, No 6, pp. 414–419, doi: 10.18178/jocet.2016.4.6.323
14. «Pulsed I-V testing for components and semiconductor devices. Applications guide» (2014), *Keithley Instruments*, 75 p., [Online], available at: <https://download.tek.com/document/4200%20Pulsed-IV%20ApplicaitonsGuide.pdf>
15. Bozhko, K.M., Zashchepkina, N.M., Markin, M.O. & Markina, O.M. (2019), «Singl-pulse method for measuring the current-voltage characteristics of solar panels», *Archives of Materials Science and Engeneering*, Vol. 99, Issues 1–2, pp. 24–29, doi: 10.5604/01.3001.0013.5879
16. Bozhko, K., Zashchepkina, N. & Bozhko, I. (2021), «Linear current sweep and measuring the current-voltage characteristics of the solar panels», *Actual problems of modern science*, Bydgoszcz, Poland, pp. 747–756, doi: 10.31891/monograph/2021-10-1

Божко Костянтин Михайлович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-6347-7442>.

Наукові інтереси:

- фотоелектричні сонячні елементи і панелі;
- коронний розряд;
- забруднення повітря;
- нечіткі моделі.

Мушкет Костянтин Ярославович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0009-0005-9218-5835>.

Наукові інтереси:

- фотоелектричні сонячні елементи і панелі;
- нечіткі моделі.

Bozhko K.M., Mushket K.Ya.

Non-contact measurements method of solar cells shunt resistance in panel

For the periodic control of photovoltaic solar panels during their operation, an important task is to obtain data on the internal condition of the solar cells' plates, which may indicate the beginning of the degradation process due to the appearance and development of hidden local defects. An objective criterion for the condition of a solar panel is the results of measuring its electrical parameters. One of these important parameters is the shunt resistance. When the value of the shunt resistance is reduced in the solar cells' plates, an additional Joule heat begins to be released. The result of this process can be local overheating of the panel, as well as a decrease of its efficiency. A significant drop in the efficiency of a solar panel is a sign of its degradation. Degraded panels are decommissioned. According to the authors, the forecast of the beginning and further development of the degradation process is possible and could be performed based on data on the value of the shunt resistance of individual solar cells in the panel. The authors proposed a non-contact method of measuring the shunt resistance of solar cells that are already mounted in the panel and do not have galvanic contacts for control. As non-contact sensors, flat rectangular antennas made of fiberglass, which is covered with a one-sided layer of copper, were used. The sensors are placed directly above the solar cells. The signal from the generator successively passes through the line of shunt resistances of all solar cells, and its amplitude gradually decreases. Antenna sensors allow you to capture a signal without distortion and display it on the screen of a digital oscilloscope. When a uniform decline of the signal from one antenna to the next is present, we have the same value of the shunt resistance and the identity of the solar cells. According to the authors, this method should be used to check solar panels that are planned to be installed in hard-to-reach or difficult-to-mount and dismantle places: on the facades of high-rise buildings, on roofs, canopies, etc. This method will reduce the risks of allocation of additional costs for replacing those panels that are subject to degradation during operation. The aim of this work is the justification of the non-contact method of measuring shunt resistance and its experimental verification in laboratory conditions on the basis of a solar panel made of polycrystalline silicon with a nominal power of 270 W.

Keywords: predictive maintenance; non-contact measurement; photovoltaic solar cell; solar panel; shunt resistance; current-voltage characteristic

Стаття надійшла до редакції 29.09.2023.