

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.Ю. Гаєвський^{1,2}, доктор фіз.-мат. наук, В.Ю. Іванчук^{1,2}, І.О. Корнієнко¹

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
пр-т Перемоги, 37, м. Київ 03056, Україна, тел/факс: +380 44 204 8191,

²Інститут відновлюваної енергетики НАН України
вул. Гната Хоткевича 20-а, м. Київ 02094, Україна, тел/факс: +380 44 206 2809

В роботі представлено реалізацію вимірювально-обчислювальної системи для визначення в реальних умовах електричних характеристик фотоелектричних модулів методом змінного активного навантаження. Теоретичний метод обробки експериментальних даних, розвинутий в роботі, дозволяє на основі отриманих експериментальних вольт-амперних характеристик фотомодулів визначити параметри електричної схеми заміщення фотомодулів: фотострум, зворотний струм насичення р-п-переходу, коефіцієнт неідеальності р-п-переходу, послідовний та паралельний опори електричних втрат. Використання даної системи актуально для тестування та діагностики поточного стану фотомодулів в польових умовах, визначення фактичних електричних параметрів фотомодулів. Слід визначити, що ці параметри не надаються в повному обсязі виробниками, але вони суттєві для задач діагностики фотомодулів в складі фотоелектричних станцій. Знання параметрів фотомодулів необхідно також для коректного вирішення задач оптимізації при проектуванні фотоелектричних станцій, прогнозування роботи фотомодулів в різних зовнішніх умовах. Вимірювальна схема вольт-амперних характеристик фотомодулів реалізована на базі мікроконтролерної плати Arduino Mega 2560, яка здійснює комутацію резисторів навантаження електронними реле, збір та передачу експериментальних даних на ПК через послідовний порт. Елементи схеми заміщення фотоелектричних модулів розраховуються за допомогою оригінального методу рішення системи нелінійних рівнянь за стійким ітераційним алгоритмом, який заснований на розкладанні нелінійних рівнянь за малими параметрами. Виконано ряд вимірювань в різних умовах сонячної радіації і температури, визначено залежності основних параметрів від зовнішніх факторів. Бібл. 14, рис. 6.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, вольт-амперна характеристика, часткове затінення, схема заміщення фотомодуля, визначення параметрів фотомодуля.

A SYSTEM FOR MEASUREMENTS OF THE PV MODULE PARAMETERS IN REAL OPERATIONAL CONDITIONS

A. Gaevskii^{1,2}, doctor of physical and mathematical sciences, V. Ivanchuk^{1,2}, I. Kornienko¹

¹NTUU "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremogy pr. 37, Kyiv 03056, Ukraine, tel/fax: +380 44 204 8191,

²Renewable Energy Institute, NAS of Ukraine,
Gnat Khotkevich str. 20-a, Kyiv 02094, Ukraine, tel/fax: : +380 44 206 2809

The measuring and calculation system for determining of electrical characteristics of photovoltaic (PV) modules in real conditions by the method of alternating active loading is developed. The theoretical method of processing experimental data, developed in this work, allows one to determine on the base of experimental data for current-voltage characteristics the parameters of the electric equivalent scheme of PV module: photocurrent, reverse saturation current of pn junction, coefficient of non-ideality of pn junction, series and parallel resistances of electric losses. Using of this system is actual for testing the current state of PV modules in field conditions, for correct determination of electrical parameters of modules. It should be noted that these parameters are not provided in full by the manufacturers, but they are essential for the diagnostics of modules on PV plants. Knowledge of the module parameters is also necessary for correct solution of optimization problems under design of PV system and for prediction of energy output in different external conditions. The measurement of current-voltage characteristics of PV modules is realized on the basis of the microcontroller board Arduino Mega 2560, which provides switching of load resistors with electronic relays, collection and transfer of experimental data to PC by the serial port. The elements of the equivalent scheme of PV modules are calculated by the original method for solving of nonlinear equations system by a stable iterative algorithm, which is based on the decomposition of nonlinear equations on the small parameters. A number of measurements at various solar radiation and temperature was performed and dependencies of the main PV module parameters on external factors were determined. Ref. 14, fig. 6.

Keywords: PV module, current-voltage characteristic, partial shading, equivalent scheme of PV module, determination of PV module parameters.



О.Ю. Гаєвський
O. Gaevskii

Відомості про автора: доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри ВДЕ.
Освіта: НТУУ «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського»
Наукова сфера: відновлювана енергетика, фотоелектричні системи, комп'ютерне моделювання.
Публікації: 125
ORCID: 0000-0001-6144-2441
Контакти: +38 (097) 570-46-43
e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

Autor information: Doctor of Phys. Math. Sci., Professor of the RES Department.
Education: NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
Research area: renewable energy, PV systems, computer simulation.
Publications: 125
ORCID: 0000-0001-6144-2441
Contacts: +38 (097) 570-46-43
e-mail: a.gaevskii@kpi.ua



В.Ю. Іванчук
V. Ivanchuk

Відомості про автора: студент НТУУ «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського»
Наукова сфера: відновлювана енергетика.
Публікації: 10.
ORCID: 0000-0002-0585-9610
Контакти: +38 (096) 533-03-86
e-mail: vlad.ivanchuk.13@gmail.com

Autor information: student of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
Research area: renewable energy.
Publications: 10.
ORCID: 0000-0002-0585-9610
Contacts: +38 (096) 533-03-86
e-mail: vlad.ivanchuk.13@gmail.com



І.О. Корнієнко
I. Korniienko

Відомості про автора: студент НТУУ «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського»
Наукова сфера: відновлювана енергетика.
Публікації: 4.
ORCID: 0000-0001-7856-5544
Контакти: +38 (050) 357-30-37
e-mail: ivan.korniienko@outlook.com

Autor information: student of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
Research area: renewable energy.
Publications: 4.
ORCID: 0000-0001-7856-5544
Contacts: +38 (050) 357-30-37
e-mail: ivan.korniienko@outlook.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

ФМ – фотоелектричний модуль;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ХХ – холостий хід;
КЗ – коротке замикання;
MPP – Maximum Power Point;
STC – Standard Test Conditions;
ВАХ – вольт-амперна характеристика;

АЦП – аналогова-цифровий перетворювач;
SC – short circuit;
OP – open circuit;
ФЕК – фотоелектрична комірка;
ФЕС – фотоелектростанція;
СКВ – середньо-квадратичне відхилення.

Вступ і постановка задачі. Однією з основних тенденцій у використанні відновлюваних джерел енергії є підключення до енергосистеми по технології SmartGrid. Але системи розподіленого генерування на основі фотоелектричних устано-

вок страждають від змін випромінювання і падіння характеристик фотоелектричних модулів (ФМ) через різні ефекти, що може призвести до неоптимального виробництва енергії і проблем для системи SmartGrid.

Ефективність ФМ залежить не тільки від сонячної радіації, затінення об'єктами, але і від процесу старіння при експлуатації в реальних умовах. Результатом старіння фотоелектричних модулів під дією температурних коливань, високої вологості, інтенсивного опромінення стає погіршення їх електричних характеристик і, в першу чергу, зниження ККД [1]. Таким чином, система вимірювання параметрів ФМ на місці може надати цінну інформацію для оптимізації виробітку і резервування енергії в енергосистемі. Така вимірювальна система повинна включати в себе як апаратні засоби для вимірювання в реальному часу в польових умовах, так і алгоритми для інтерпретації результатів вимірювань і отримання параметрів фотоелектричного модуля.

Також варто відзначити, що виробники ФМ зазвичай приводять обмежений набір характеристик – це, як правило: напруга холостого ходу (ХХ) V_{oc} , струм короткого замикання (КЗ) I_{sc} і напруга та струм в точці максимальної потужності (Maximum Power Point, МРР) V_m , I_m [2]. Ці та інші параметри ФМ зазвичай оцінюються виробниками в стандартних умовах випробувань (Standard Test Conditions, STC) [3]. Але для опису поточного стану ФМ, особливо, після їх довгострокової експлуатації, необхідне знання більш повного набору параметрів. При чому необхідна оцінка відповідності параметрів, які визначені на основі вимірювань у польових умовах, параметрам STC.

Існують різноманітні методи і апаратне забезпечення, призначені для отримання параметрів ФМ [4]. Вони полягають, як правило, у вимірюванні ВАХ за допомогою керування струмом, який проходить через ФМ. Найбільш простим і дешевим методом вимірювання ВАХ модуля є метод змінного опору навантаження [5]. Величина опору змінюється покроково від 0 до великої величини, щоб охопити всі точки ВАХ від режиму КЗ до режиму ХХ. Другий відомий метод – метод ємнісного навантаження – базується на заряджанні конденсатора, струм через який падає зі зростанням заряду конденсатора [6]. Можливо також використовувати в якості навантаження польові транзистори (MOSFET), в яких опір між стоком і витокм змінюється шляхом регулювання напруги на затворі. В даній роботі для вимірювання ВАХ фотомодулей був використаний метод змінного опору навантаження, як такий, що забезпечує надійність зняття показань струму та напруги навантаження, простоту реалізації методу в польових умовах, а також високу швидкість вимірювань, тобто малий час між відліками, який набагато менше характерного часу зміни зовнішніх умов – радіації та температури.

Експериментальні результати вимірювання

ВАХ потребують подальшої програмної обробки, яка складається зазвичай з апроксимації отриманих даних та моделювання ВАХ за допомогою того чи іншого типу функцій, наприклад, експоненціальної, як в формулі Шоклі [7], функції Ламберта [8, 9], сплайнів [10] та інших. Фізичні моделі, які враховують поведінку освітленого р-n-переходу фотомодуля, оснований на представлені ФМ за допомогою одностійової або двохстійової схем заміщення з описанням ВАХ діодів формулою Шоклі. Демонстрація можливостей розвинутого в даній статі методу визначення параметрів ФМ виконана на основі одностійової схеми заміщення.

Для знаходження параметрів ФМ необхідно вирішувати систему нелінійних рівнянь, як в задачі безпосереднього знаходження параметрів, так і в задачі підгонки параметрів під експериментальні дані шляхом нелінійної оптимізації. При вирішенні таких систем необхідно задання початкових значень параметрів, від яких в вирішальній мірі залежить результат ітераційного процесу. Незначні зміни стартових значень параметрів можуть призводити до великих розбіжностей в результатах розрахунку параметрів. Тому важливо побудувати метод і стійкий алгоритм отримання параметрів ФМ, які можна використовувати, коли не відомі параметри схем заміщення. Такий метод, який не потребує стартових значень параметрів, що розраховуються, був розвинутий в роботі [11].

Розроблена в даній роботі система вимірювання ВАХ була застосована для визначення параметрів фотомодулів з монокристалічного та полікристалічного кремнію, які працюють в умовах повного освітлення та часткового затінення. Показано, що дана система може бути успішно застосована для вимірювання впливу затінення на фізичні параметри фотомодулів.

Експериментальна установка та алгоритм обробки даних. Як визначалось вище, для вимірювання ВАХ фотомодулей був використаний метод змінного опору навантаження. Опори, які розраховані на навантаження для ФМ максимальної потужності 250 Вт, складають магазин послідовно з'єднаних резисторів і реалізують ступінчасту зміну навантаження від 0 до 640 Ом. Комутації резисторів здійснюються за допомогою системи з 16-ти реле марки Songle SRD-05VDC-SL-C, що керуються платою Arduino Mega 2560 на базі мікроконтролера Atmel 328. Дані поступають на плату через 4-х канальний 16-розрядний АЦП ADS1115, який дає можливість суттєво підвищити точність вимірювань порівняно з використанням АЦП, вбудованого в плату Arduino. Електрична схема вимірювального пристрою показана на Рис.1.

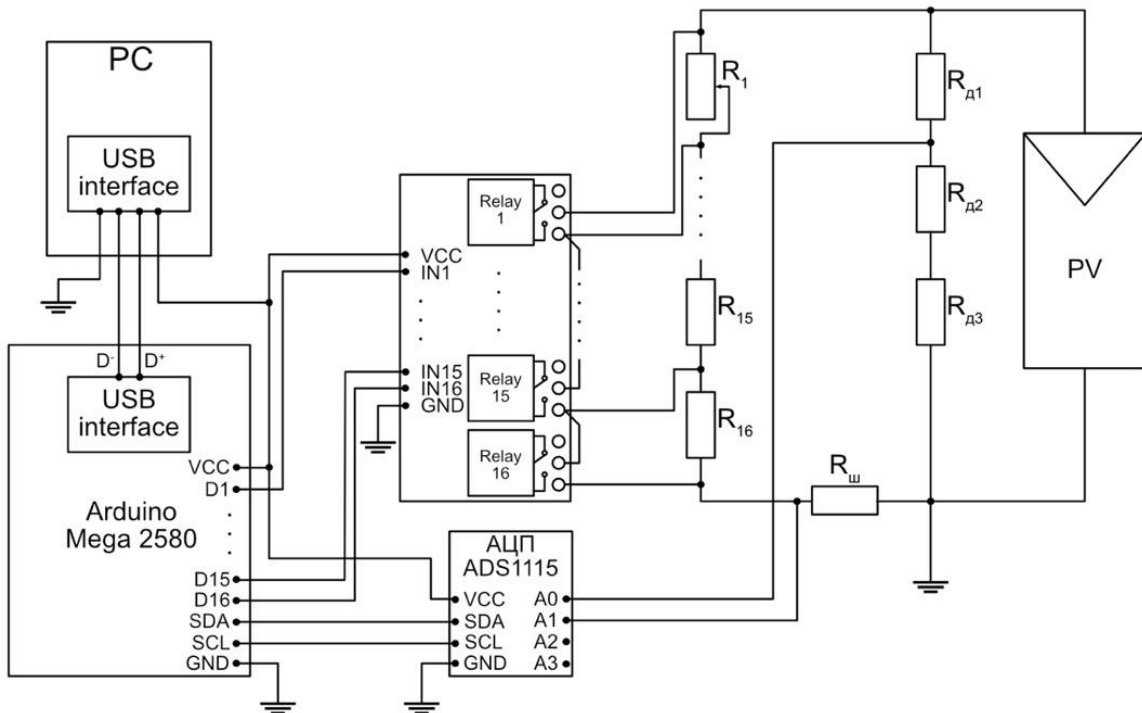


Рис. 1. Електрична схема вимірювального пристрою.

Fig. 1. Electric scheme of the measuring device.

Оскільки вхідна напруга АЦП не повинна перевищувати 6 вольт, в контур вимірювання напруги V навантаження додано дільник напруги у співвідношенні 1,22 до 9 кОм. Струм I

у навантаженні вимірюється через падіння напруги на низькоомному струмовому шунті ($\sim 0,25$ Ом). Низький опір шунта дозволяє максимально наблизитись до точки короткого замикання.

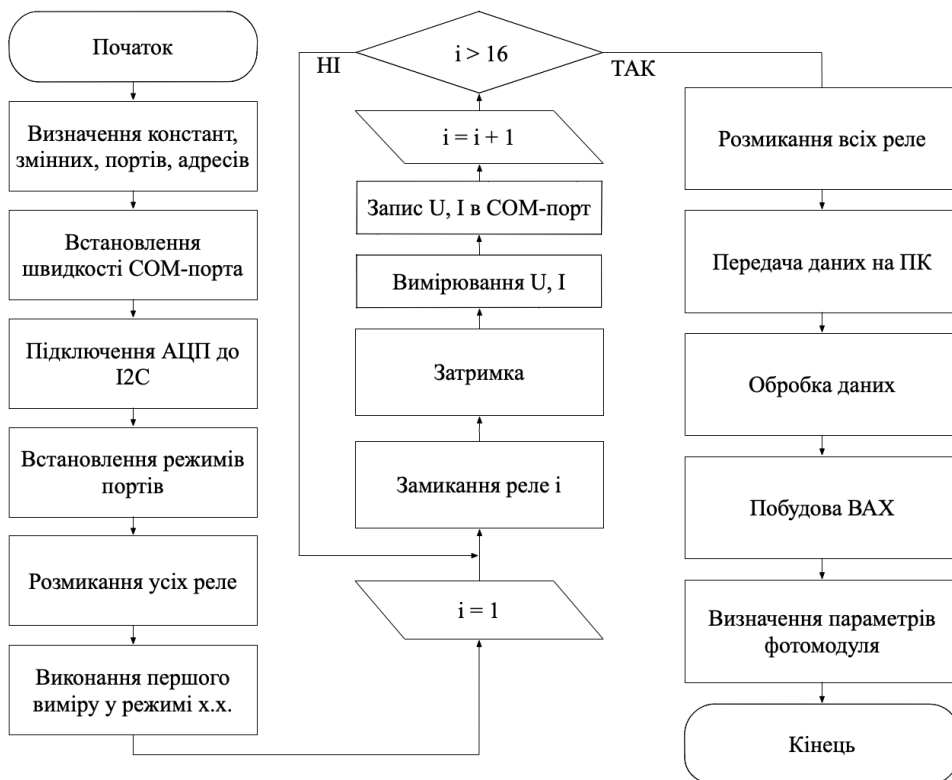


Рис. 2. Блок схема алгоритму роботи програми.

Fig. 2. Block diagram of the algorithm.

Збір та обробка експериментальних даних здійснюється за алгоритмом, основні етапи якого відображені на рис.2. Операції від початку до передачі даних на ПК виконуються сценарієм, який вже записаний у постійну пам'ять мікроконтролера. Передані через USB-інтерфейс дані піддаються попередньої обробці у середовищі MATLAB за допомогою спеціалізованої програми, в ході якої виконується сортування пар значень (V, I) й апроксимація ВАХ на певних відрізках поліномами від 1-го до 4-го ступеня. Від вибору точок зшивання відрізків апроксимант критичним чином залежить якість апроксимації. Тому координати точок зшивання також знаходяться в ході процедури апроксимації, яка будується на алгоритмі нелінійної оптимізації. В результаті отримується гладка неперервно-диференційована функція $I(V)$ – саме вона використовується на наступному етапі – визначення параметрів ФМ.

За отриманими результатами апроксимації визначаються струм короткого замикання (short circuit, SC), напруга холостого ходу (open circuit, OC), точка максимуму потужності (Maximum Power Point, MPP), яка характеризується парою величин V_m, I_m . Обчислюються також тангенси кутів нахилу апроксимант в області КЗ і ХХ та пов'язані з ними динамічні провідності G_{sc} і G_{oc} відповідно:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow 0} = G_{sc} \equiv -\frac{1}{R_{sc}}, \quad \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow V_{oc}} = G_{oc} \equiv -\frac{1}{R_{oc}}. \quad (1)$$

Розраховані величини дорівнюють:

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 4.39 \text{ A}, \quad V_{oc} = 20.09 \text{ B}, \\ V_m &= 15.58 \text{ B}, \quad I_m = 4.07 \text{ A}, \\ R_{sc} &= 135.15 \text{ Ом}, \quad R_{oc} = 0.64 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Цих величин досить для однозначного визначення параметрів ФМ однодіодної схеми заміщення за розробленим алгоритмом.

Визначення параметрів ФМ. Вважаємо, що ФМ складається з n_p паралельних серій фотоелектричних комірок (ФЕК), причому в кожній серії є n_s послідовно включених осередків, кожна з ФЕК представляється однодіодною схемою заміщення (Рис.3). Джерело струму моделює фотострум i_{ph} , послідовний опір r_s , відповідає омичним втратам на контактах і в об'ємному шарі напівпровідників, паралельний (шунтуючий) опір r_p відповідає поверхневим струмам витоків [12]. Діод описує струм через pn-перехід, що знаходиться під прямим зміщенням при освітленні ФМ.

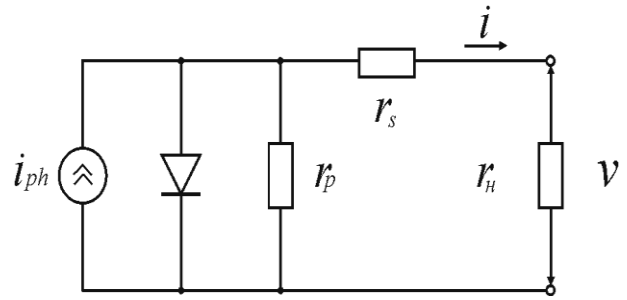


Рис. 3. Однодіодна схема заміщення фотоелектричної комірки.

Fig. 3. Single-diode equivalent scheme of PV cell.

Результуюча ВАХ фотомодуля описується рівнянням:

$$F(I, V) = I \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - I_{ph} + \frac{V}{R_p} + I_0 \left[\exp \left(\frac{\beta V + I R_s}{A n_s} \right) - 1 \right] = 0, \quad (2)$$

де $\beta = q / kT$, q – заряд електрона, k – постійна Больцмана, T – температура, $V = \nu n_s$ і $I = i n_p$ – напруга та струм в навантаженні; $I_{ph} = i_{ph} n_p$ – фотострум, $I_0 = i_0 n_p$ – зворотний струм насичення діода, $R_s = r_s n_s / n_p$ і $R_p = r_p n_s / n_p$ – послідовний та паралельний еквівалентні опори втрат, A – коефіцієнт неідеальності діода, значення якого лежать в інтервалі від 1 до 2 [12].

За допомогою коефіцієнта неідеальності діода ефективно описуються дифузна і рекомбінаційна компоненти струму: чим менше внесок рекомбінації в струм, тим ближче коефіцієнт A до 1. В моделі ФМ фотоелектричні комірки є ідентичними і знаходяться при однакових температурах і освітленості, що є важко здійснимо для реальних ФМ ФЕС, тому пропонується методика побудови модельної функції для ВАХ ФМ, що працюють в польових умовах.

Опис методу визначення загальних параметрів ФМ. Завдання визначення характеристик ФМ полягає в обчисленні набору параметрів $\Theta = I_{ph}, R_s, R_p, I_0, A$, які описують основні електричні властивості і поточний стан ФМ. В даній статті запропонована процедура екстракції параметрів Θ з одного набору експериментальних даних (I, V) , яка заснована на однодіодній моделі ФЕК, що працює в статичному режимі, близькому до STC, при активному навантаженні і прямому зміщенні pn-переходу.

Для знаходження набору θ з п'яти параметрів в даній роботі використана система рівнянь, в яку входять рівняння типу (2), записані для точок

КЗ ($V = 0, I = I_{sc}$), ХХ ($V = V_{oc}, I = 0$), і максимальної потужності ($V = V_m, I = I_m$):

$$I_{ph} - I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - \frac{An_s}{\beta} Q_{sc} = 0, \tag{3a}$$

$$Q_{sc} = \frac{\beta I_0}{An_s} \exp \left(\frac{\beta I_{sc} R_s}{An_s} \right),$$

$$I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p} - \frac{An_s}{\beta} Q_{oc} = 0, \tag{3б}$$

$$Q_{oc} = \frac{\beta I_0}{An_s} \exp \left(\frac{\beta V_{oc}}{An_s} \right),$$

$$I_{ph} - I_m \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - \frac{V_m}{R_p} - \frac{An_s}{\beta} Q_m = 0, \tag{3в}$$

$$Q_m = I_0 \exp \left(\frac{\beta (V_m + I_m R_s)}{An_s} \right).$$

Ці рівняння доповнені також рівняннями для нахилів кривої ВАХ поблизу КЗ, ХХ:

$$\frac{R_p + R_s - R_{sc}}{R_{sc} - R_s} - R_p Q_{sc} = 0, \tag{4a}$$

$$\frac{R_p + R_s - R_{oc}}{R_{oc} - R_s} - R_p Q_{oc} = 0. \tag{4б}$$

З нахилом кривої ВАХ поблизу точок ХХ і КЗ, що визначаються величинами R_{oc} та R_{sc} , пов'язані,

в першу чергу, оцінки опорів втрат R_s та R_p [9, 12].

В даній роботі рівняння типу (2)–(4) розв'язуємо за методом [11], що базується на розкладанні рівнянь по малим параметрам, які є функціями шуканих змінних I_{ph}, R_s, R_p, I_0, A . У цьому методі використовуються знайдені за експериментальними ВАХ значення $V_{oc}, I_{sc}, V_m, I_m, R_{oc}, R_{sc}$ і не потрібно завдання стартових значень для шуканих величин.

Результати вимірювань і розрахунків.

Отримані раніше параметри однодіодної схеми заміщення використовувалися для побудови теоретичної ВАХ шляхом вирішення нелінійного рівняння (1) для множини значень V з інтервалу $[0, V_{oc}]$. Середньо-квадратичне відхилення (СКВ) апроксиманти від модельної функції (розрахункових значень) для монокристалічного модуля складає 0,34%, а полікристалічного – 0,2%.

На основі вимірювань при інтенсивності радіації 840 Вт/м², які показані на Рис.4., були обчислені параметри ФМ за методом, викладеним у попередньому розділі. Було отримано наступні значення:

для полі-Si модуля

$$I_{ph} = 5.73 \text{ A}, I_0 = 2.05 \cdot 10^{-10} \text{ A},$$

$$R_s = 0.47 \text{ Ом}, R_p = 132.33 \text{ Ом}, A = 1.99,$$

для моно-Si модуля

$$I_{ph} = 4.69 \text{ A}, I_0 = 5.54 \cdot 10^{-12} \text{ A},$$

$$R_s = 0.48 \text{ Ом}, R_p = 102.59 \text{ Ом}, A = 1.72.$$

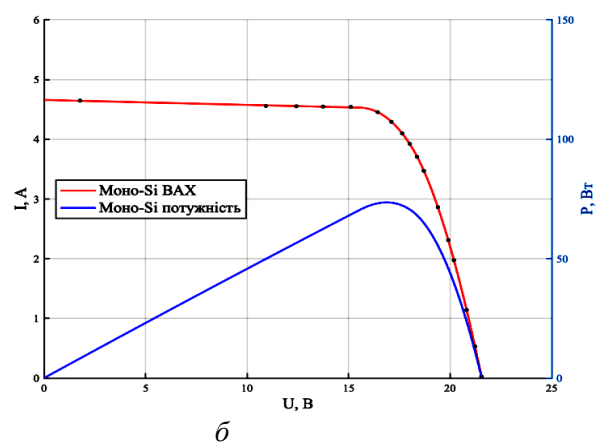
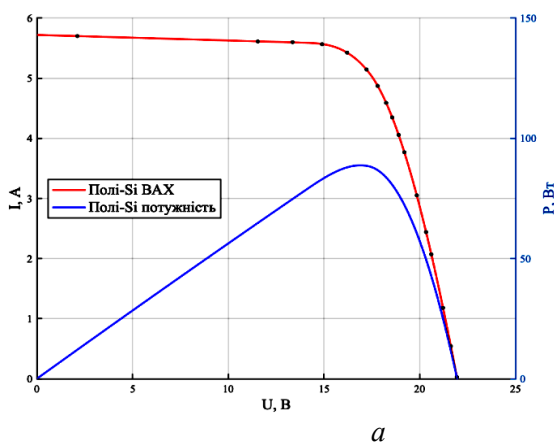


Рис. 4. ВАХ та крива потужності ФМ з полікристалічного кремнію Kvazar KV-100W (а) і монокристалічного кремнію SunRise SR 100W (б). Експериментальні відліки – точки, модельна функція – суцільна лінія.

Fig. 4. CVC and power-voltage curve of polycrystalline silicon PV module Kvazar KV-100W (a) and monocrystalline silicon PV module SunRise SR 100W (b). Experiment – points, model function – solid line.

Створений вимірювальний пристрій був також використаний для дослідження ВАХ та параметрів ФМ при різних ступенях затінення модулів. Затінення усіх серій комірок ФМ в портретній орієнтації призводить до значного зростання послідовного опору втрат R_s , обумовленого в першу чергу омічними втратами в шарах напівпровідників та процесами рекомбінації носіїв. Цей ефект можна оцінити за нахилом кривих ВАХ

поблизу ХХ (Рис.5а), який згідно з (1) характеризується параметром R_{oc} .

Опір втрат R_s пов'язаний з R_{oc} формулою [11]:

$$R_s = R_{oc} - \frac{1}{Q_{oc}} \quad (5)$$

Розрахунки R_{oc} на основі кривих інтерполяції при різних ступенях затінення показані на Рис.5б

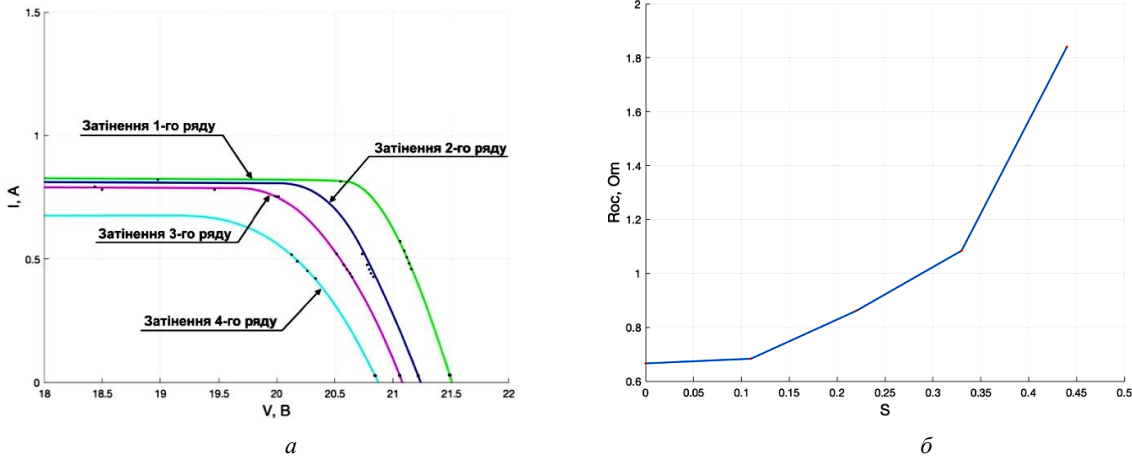


Рис. 5. Вплив ступеня затінення на ВАХ поблизу ХХ та на омічні втрати: а - ВАХ експериментальних даних та модельна функція при різних значеннях ступеня затінення S для ФМ Kvaazar KV-100W в портретній орієнтації, б - залежність параметру втрат R_{oc} від S .

Fig. 5. Influence of shading degree on the CVC near OC and on the ohmic losses: а – CVC for the experimental data and for the model function at different degrees of shading S for PV module Kvaazar KV-100W in portrait orientation; б - the dependence of the loss parameter R_{oc} on S .

Висновки. Розроблений вперше на основі мікроконтролерної плати Arduino пристрій бюджетного рівня дозволяє вимірювати характеристики фотоелектричних модулів у реальних польових умовах при змінному рівні сонячної радіації. Створена вимірювальна система дозволяє швидко і з високим ступенем точності отримувати ВАХ ФМ при змінних умовах сонячної радіації і температури, та проводити тестування ФМ в реальних умовах на ФЕС. Актуальність розробки даної вимірювальної системи полягає в тому, що вона дозволяє проводити тестування та діагностику поточного стану ФМ, а також визначити фактичні електричні параметри ФМ, які необхідні для задач оптимізації проектних рішень для ФЕС. Окремими задачами, які можуть вирішуватися за допомогою розробленої системи, є визначення дефектного модулю в масиві, ступеня старіння модулів, прогнозування терміну їх служби. Набір параметрів, який визначається за допомогою розробленої системи, дозволяє коректно визначити електричні характеристики ФМ, які не надаються виробниками, а також отримувати залежності цих характеристик від зовнішніх факторів: рівня сонячної радіації, температури, часткового затінення та інших.

1. Nehme B., Sirdi N., Akiki T., Naamane A., Contribution to the modeling of ageing effects in PV cells and modules. Energy Procedures. 2014. Vol. 62. Pp. 565–575.
2. Jia Q.X., Ebiharaand K., Ikegami T. Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics. Philosophical MagazineB. 1995. Vol. 7. Pp. 375–382.
3. Zuhail E.R., Rouabah Z., Kizilkanetal G. Standard sand Testing Experiments for a Photovoltaic Module. European Journal of Science and Technology. Special Issue. January 2018. Pp. 12-15.
4. Humada A. M.. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. Pp. 494-509.
5. Duran E., Piliouguine M., Sidrach-de-Cardona M., Galan J., Andujar J.M. Different methods to obtain the I-V curve of pv module: A review. 2008. Retrived from https://www.researchgate.net/publication/224445394_Different_methods_to_obtain_the_I-V_curve_of_PV_modules_A_review,
6. Duran E., Ferrera M.B., Andújar J.M., Mesa M.S. I-V and P-V Curves Measuring System for PV Modules based on DC-DC Converters and Portable Graphical Environment. , 2010. Retrived from https://www.researchgate.net/publication/224195822_I-V_and_P-V_curves_measuring_system_for_PV_modules_based_on_DC-DC_converters_and_portable_graphical_environment.
7. Bashahu M., Nkundabakura P. Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors. Solar Energy. 2007. Vol. 81. Pp. 856-863.
8. Zhang C., Zhang J., Hao Y. A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curv. Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 110. 064504 p.

9. Gaevskii A.Yu. Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ. Відновлювана енергетика. 2012. №4. С. 32-39.

10. Kong K.C., Mamat M., Ibrahim M.Z. New Approach on Mathematical Modeling of Photovoltaic Solar Panel. Applied Mathematical Sciences. 2012. Vol. 6, Pp. 381-401.

11. Gaevskii A. Method for determining parameters of PV modules in field conditions. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. Kyiv. Ukraine. 2019.

12. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л. Наука. 1989. 310 с.

13. Woyte A., Nijs J., Belmans R. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature survey and field results. Solar Energy. 2003. Vol.74. Pp.217-233.

REFERENCES

1. Nehme B., Sirdi N., Akiki T., Naamane A., Contribution to the modeling of ageing effects in PV cells and modules. Energy Procedures. 2014. Vol. 62. Pp. 565–575. [in English].

2. Jia Q.X., Ebiharaand K., Ikegami T. Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics. Philosophical MagazineB. 1995. Vol. 7. Pp. 375–382. [in English].

3. Zuhail E.R., Rouabah Z., Kizilkanetal G. Standard sand Testing Experiments for a Photovoltaic Module. European Journal of Science and Technology. Special Issue. January 2018. Pp. 12-15. [in English].

4. Humada A. M.. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. Pp. 494-509. [in English].

5. Duran E., Piliouguine M., Sidrach-de-Cardona M., Galan J., Andujar J.M. Different methods to obtain the I-V curve of pv module: A review. 2008. Retrived from https://www.researchgate.net/publication/224445394_Different_methods_to_obtain_the_I-V_curve_of_PV_modules_A_review, [in English].

6. Duran E., Ferrera M.B., Andujar J.M., Mesa M.S. I-V and P-V Curves Measuring System for PV Modules based on DC-DC Converters and Portable Graphical Environment, 2010. Retrived from https://www.researchgate.net/publication/224195822_I-V_and_P-V_curves_measuring_system_for_PV_modules_based_on_DC-DC_converters_and_portable_graphical_environment. [in English].

7. Bashahu M., Nkundabakura P. Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors. Solar Energy. 2007. Vol. 81. Pp. 856-863. [in English].

8. Zhang C., Zhang J., Hao Y. A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curv. Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 110. 064504 p. [in English].

9. Gaevskii A. Opredelenie parametrov fotoelektricheskikh moduley na osnove tochnogo resheniya uravneniya dlya VAH. [Determination of the PV modules parameters on the base of exact solution for the CVC equation]. VIdnovluyana energetika. 2012. No.4. Pp. 32-39. [in Russian].

10. Kong K.C., Mamat M., Ibrahim M.Z. New Approach on Mathematical Modeling of Photovoltaic Solar Panel. Applied

Mathematical Sciences. 2012. Vol. 6, Pp. 381-401. [in English].

11. Gaevskii A. Method for determining parameters of PV modules in field conditions. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. Kyiv. Ukraine. 2019. [in English].

12. Andreev V., Grilihes V., Rumyantsev V. Fotoelektricheskoe preobrazovanie kontsentrirrovannogo solnechnogo izlucheniya. [Photoelectric conversion of concentrated solar radiation]. L. Nauka. 1989. 310 p. [in Russian].

13. Woyte A., Nijs J., Belmans R. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature survey and field results. Solar Energy. 2003. Vol.74. Pp.217-233.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.Ю. Гаевский^{1,2}, В.Ю. Иванчук^{1,2}, И.О. Корниченко¹

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» 03056 м. Киев, пр-т Победы, 37

²Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094 м. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А

В работе представлены реализацию измерительно-вычислительной системы для определения в реальных условиях электрических характеристик фотоэлектрических модулей методом переменной активной нагрузки. Теоретический метод обработки экспериментальных данных, развитый в работе, позволяет на основе полученных экспериментальных вольт-амперных характеристик фотомодулей определять параметры электрической схемы замещения фотомодулей: фототок, обратный ток насыщения рп-перехода, коэффициент неидеальности рп-перехода, последовательный и параллельный опоры электрических потерь. Использование данной системы актуально для тестирования и диагностики поточного состояния фотомодулей в полевых условиях, определение фактических электрических параметров фотомодулей. Следует определить, что эти параметры не предоставляются в полном объеме производителями, но они существенные для задач диагностики фотомодулей в составе фотоэлектрических станций. Знание параметров фотомодулей необходимо также для корректного решения задач оптимизации при проектировании фотоэлектрических станций, прогнозирования работы фотомодулей в различных внешних условиях. Измерительная схема ВАХ фотомодулей реализована на базе микроконтроллерной базе Arduino Mega 2560, которая осуществляет коммутацию резисторов нагрузки электронными реле, сбор и передачу экспериментальных данных на ПК через последовательный порт. Элементы схемы замещения фотоэлектрических модулей рассчитываются с помощью оригинального метода решения системы нелинейных уравнений устойчивым итерационным алгоритмом, который основан на разложении нелинейных уравнений малыми параметрами. Выполнен ряд измерений в различных условиях солнечной радиации и температуры, определены зависимости основных параметров от внешних факторов. Библ. 14, рис. 6.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, вольт-амперная характеристика, частичное затенение, схема замещения фотомодуля, определение параметров фотомодуля.

Стаття надійшла до редакції 29.05.19

Остаточна версія 10.06.19