

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ПРИ ПОШКОДЖЕННІ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

© Мельников В. Є.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Мельников В'ячеслав Євгенович (Melnykov Viacheslav): ORCID: <https://orcid.org/0000-000-6427-6805>; e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com, кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті проведено дослідження чинників і причин, що спричиняють пошкодження поверхні фотоелектричного модуля та їх вплив на характеристики сонячних елементів. Проаналізовані різні види пошкоджень поверхні фотоелектричного модуля та причини їх виникнення. Серед пошкоджень фотоелектричних модулів найбільш поширені: сліди від пропалу на лицевій та задній панелі, зміна кольору герметика, розшарування мультикристалічного модуля, електрохімічна корозія тонкоплівкового модуля, прогар етиленвінілацетної плівки в різних частинах комірки, розшарування заднього листа та розбиття тонкоплівкового скла фотоелектричного модуля. Відзначено, що при тривалій експлуатації фотоелектричних модулів відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії та вихідної потужності. Виявлено, що пошкодження поверхні фотоелектричного модуля виникають в наслідок екстремальних погодних умов: граду, вітру, температури; виробничого браку; неправильної експлуатації; зношування та деградації сонячних елементів протягом часу. Проведено аналіз видів деградації фотоелектричного модуля та її наслідки. Показано, що деградація виникає внаслідок хімічних реакцій між активними металами у складі фотоелектричного модуля, екстремальних погодних умов: різких перепадів температур, вологості, постійного змерзання або відтавання. Виявлено, що деградація призводить до зменшення провідності струму фотоелектричного модуля, появи паразитного опору фотомодуля, виникнення тріщин, мікропор та неоднорідностей на поверхні фотоелектричного модуля. Запропоновані заходи, які попереджають появу дефектів на усіх стадіях виробництва, монтажу та доставки фотоелектричних модулів. До таких заходів відносяться: вибір фотоелектричних модулів для спорудження сонячної станції, серед відомих виробників; здійснення ремонтних робіт на фотоелектричних модулях у спеціалізованих фірмах; організація регулярного технічного огляду фотоелектричних модулів; моніторинг параметрів фотоелектричних модулів в процесі експлуатації; дотримання головних правил експлуатації фотоелектричних модулів.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, сонячний елемент, поверхня фотоелектричного перетворювача, фотоелемент, сонячна енергія, коефіцієнт корисної дії сонячного елемента.

Melnykov V. “Study of characteristics of a solar cell when damaging the surface of a photovoltaic module”

The article examines the factors and causes leading to damage to the surface of a photovoltaic module and their impact on the characteristics of solar elements. Various types of surface damage to photovoltaic modules and the reasons for their occurrence are analyzed. Among the most common damages to photovoltaic modules are: traces of burning on the front and back panels, color change of

sealant, delamination of multicrystalline modules, electrochemical corrosion of thin-film modules, burning of ethylene vinyl acetate film in different parts of the cell, delamination of the backsheet, and breakage of thin-film glass of the photovoltaic module. It is noted that during prolonged operation of photovoltaic modules, there is a significant decrease in their productivity due to deterioration of key parameters: the efficiency coefficient and output power. It has been found that surface damage to photovoltaic modules occurs due to extreme weather conditions such as hail, wind, and temperature; manufacturing defects; improper operation; wear and degradation of solar elements over time. An analysis of types of photovoltaic module degradation and its consequences is conducted. It is shown that degradation occurs due to chemical reactions between active metals in the photovoltaic module, extreme weather conditions such as sharp temperature fluctuations, humidity, constant freezing and thawing. It has been revealed that degradation leads to a decrease in the current conductivity of the photovoltaic module, the appearance of parasitic resistance of the photomodule, the occurrence of cracks, micropores, and surface irregularities on the photovoltaic module. Measures to prevent the appearance of defects at all stages of production, installation, and delivery of photovoltaic modules are proposed. These measures include: selection of photovoltaic modules for the construction of a solar station from reputable manufacturers; carrying out repair work on photovoltaic modules in specialized companies; organization of regular technical inspection of photovoltaic modules; monitoring of photovoltaic module parameters during operation; adherence to the main rules for operating photovoltaic modules.

Key words: photovoltaic module, solar cell, photovoltaic converter surface, photoelement, solar energy, solar cell efficiency coefficient.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

При тривалій експлуатації фотоелектричних модулів (ФЕМ), відзначається значне зниження їхньої продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії й вихідної потужності [1, 2]. Так, по оцінці закордонних фахівців [3], близько 90% ринку фотоелектричних модулів, у цей час, становлять кристалічні кремнієві фотоелектричні модулі, які втрачають від 10% до 40% вихідної потужності, у перші два роки експлуатації.

Тому, необхідно враховувати такі зовнішні фактори, що впливають на продуктивність сонячної панелі, як нормальна деградація фотоелектричного модуля із часом, зниження потужності за рахунок надмірного нагрівання панелей або їхнього затінення й т.п. [4]. Вплив цих і інших факторів, може мінятися залежно від сезону, географічного положення, способу монтажу, азимута й нахилу фотоелектричного модуля [5]. Практика експлуатації фотоелектричних модулів показує, що в реальних умовах, фотоелектричний модуль буде виробляти близько 75...85% від її пікової потужності, зазначеної виробником. Наприклад, фотоелектричний модуль з потужністю 100 Вт, розташований під оптимальним кутом і орієнтований на південь, буде видавати влітку в середньому 75...85 Вт, залежно від методу установки. Тому, при проектуванні сонячної електростанції і зборці фотоелектричних модулів, необхідно враховувати реальні характеристики фотоелектричного модуля.

На сьогоднішній день дуже багато уваги приділяється відновлювальним джерелам енергії, оскільки закінчуються запаси традиційних викопних джерел енергії: вугілля, газу, нафти. У майбутньому видобуток традиційних джерел енергії буде дуже дорогим, через те, що енергетичним компаніям треба буде використовувати більш складніші і дорогі технології видобутку ресурсів [1]. Враховуючи ці проблеми є актуальним дослідження характеристик та режимів роботи відновлювальних джерел енергії, особливе місце серед яких займає сонячна енергетика. Сонячна енергія є одним з найдоступнішим джерелом енергії. Саме тому вже зараз можна спостерігати великі фінансові вкладення енергетичних компаній у розвиток сонячної енергетики [4].

Серед основних причин різкого падіння генерації енергії на сонячній станції пошкодження фотоелектричних модулів. При цьому далеко не завжди вони можуть бути спричинені втручанням людини, а спричинені впливом навколишнього середовища. До зовнішніх природних факторів, які можуть спричинити пошкодження фотоелектричних модулів відносяться: град, підвищена температура, тощо. Дію навколишнього середовища на фотоелектричний модуль неможливо зменшити, оскільки ефективних методів впливу на природні явища не існує. Тому дослідження впливу пошкоджень поверхні фотоелектричних модулів на характеристики сонячних елементів є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженням впливу пошкоджень фотоелектричних модулів на їх параметри присвячено багато робіт [3-15]. В роботі [1] досліджується вплив різних параметрів, характеристик та факторів на ефективність та надійність сонячних елементів у складі фотоелектричних модулів. Автори роблять висновок, що такі фактори, як затінення, пошкодження та перегрівання мають критичні наслідки, що погіршують ефективність роботи сонячних елементів. В роботі [2] розглядається вплив локальних неоднорідностей, мікротріщин та мікропор на стабільність та ефективність роботи сонячних елементів. Автори приходять до висновку, що при розрахунку номінальної потужності та ефективності сонячних елементів потрібно враховувати реальну площу сприймаючої поверхні сонячного елемента.

У роботі [15] показано, що на вихідну потужність фотоелектричних модулів впливають різні фактори, такі як затінення, сонячна інсоляція, температура і конфігурація ФЕМ. Ці фактори, викликають зниження ефективності та надійності вироблення електроенергії у ФЕМ. В роботі проведено дослідження впливу неоднорідного часткового затінення на показники ФЕМ. За цих умов, фотоелектричні вольт-амперні характеристики ФЕМ стають складнішими. Тому, дуже важливо за цих умов розрахувати максимально можливу потужність. Для цього у роботі [15] використовувалося моделювання характеристик ФЕМ на основі Matlab. Як недолік, у роботі наголошується, що в умовах часткового затінення зменшуються струм навантаження та теплові втрати, проте не досліджено причини такого зниження стану поверхні ФЕМ.

Метою роботи є аналіз впливу пошкоджень поверхні фотоелектричних модулів на зміни характеристики сонячного фотоелемента. За допомогою даного дослідження можна оцінити вплив пошкоджень на характеристики сонячного елемента, а саме струм короткого замикання, напруги холостого ходу, ККД. При пошкодженнях фотоелектричних модулів відбувається зменшення її ККД, що впливає на ефективність та стабільність її роботи. Тому дослідження впливу пошкодження фотоелектричних модулів є актуальною проблемою.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення максимальної потужності фотоелектричних модулів, необхідно забезпечити відповідні умови експлуатації, для цього необхідно розміщувати ФЕМ під певним кутом нахилу, щоб установка знаходилася під прямим та постійним сонячним світлом протягом року [1].

Причиною зниження потужності та генерації фотоелектричних модулів є пошкодження її поверхні. Причиною цього може бути: екстремальні погодні умови (град, вітер, підвищена температура), виробничий брак, неправильна експлуатація, зношування та деградація ФЕМ протягом певного часу.

До деградації ФЕМ відноситься зменшення виробництва електроенергії фотоелектричними модулями через фізичні зміни в її структурі. Процес деградації може відбуватися поступово протягом терміну експлуатації, в результаті чого результуюча потужність фотоелектричних модулів буде знижуватися. Але цей процес може бути прискорений через вплив зовнішніх і внутрішніх чинників.

Причиною прискореної деградації сонячних елементів може стати натрій чи інші активні метали, які є в складі матеріалів, з яких виготовлений ФЕМ, і це призводить до зменшення провідності струму фотоелектричного модуля. Також іншою причиною деградації може бути екстремальна погода: різкі перепади температури, вологість, цикли замерзання або відтавання фотоелемента, що часто повторюються. Зовнішні фактори підсилюють паразитний опір ФЕМ, який розсіює потужність і таким чином зменшує загальну ефективність генерації електроенергії у фотоелектричних модулях.

Зменшення виробництва електроенергії фотоелектричними модулями може бути спричинено наступними факторами.

1. Фотоелектричні модулі з часом починають зменшувати первинну потужність та продуктивність сонячної електростанції через активність ультра-фіолетового випромінювання та впливу екстремальних погодних умов. Якщо активність УФ-випромінювання не надто висока, то процеси зниження продуктивності фотоелектричних модулів сповільнюються.

До кліматичних умов, що мають вплив на термін експлуатації фотоелектричних модулів, можна віднести: високі температури повітря при експлуатації фотоелектричного модуля; сильні опади(град) , які можуть пошкодити сонячну батарею; замерзання води на поверхні захисного скла.

2. Тріщини на фотоелектричних модулях.

3. Відокремлення ламінуючої плівки від сонячного елемента.

4. Розгерметизація загартованого скла.

5. Деформація фотомодуля під дією погодних умов та зовнішніх механічних пошкоджень.

Оскільки основним елементом фотоелектричних модулів в якому відбувається перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію є фотоелектричний перетворювач, тому при впливі на його поверхню зовнішніх і внутрішніх чинників, в ньому відбуваються фізичні процеси, які призводять до утворення дефектів у виді: локальних неоднорідностей, мікропор, мікро і макротріщин [2,5].

У роботі [8] наведені виміри потужність сонячних модулів після 7 років експлуатації

Рис.1.

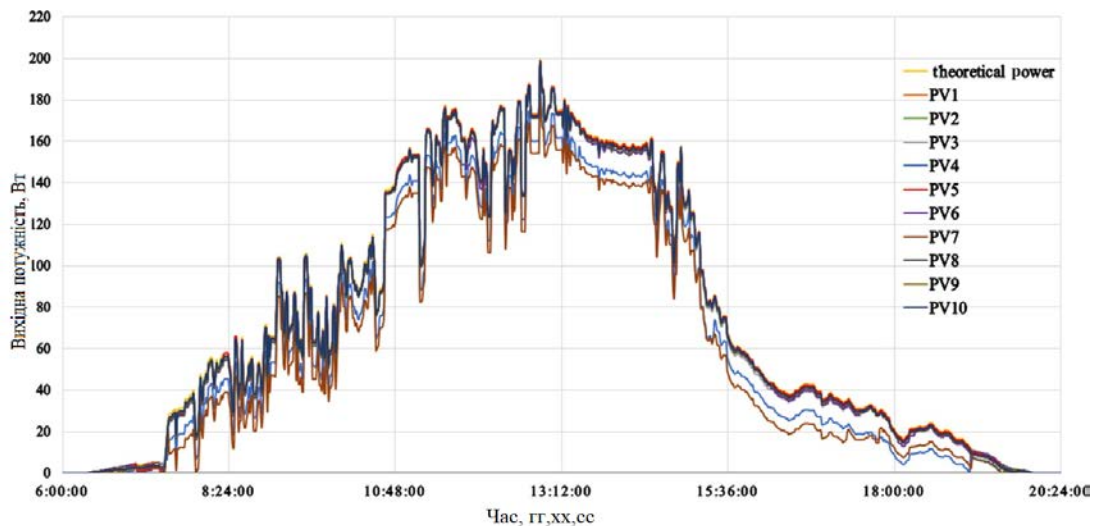


Рис.1 – Вимірjana вихідна потужність фотоелектричних модулів, порівняно з теоретичною вихідною потужністю[8]

Неможливо простежити весь процес вироблення, монтажу та доставки фотоелектричних модулів. Наприклад порушення умов монтажу може призвести до зниження роботи сонячної станції.

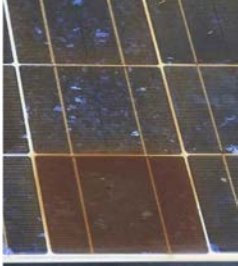




Щоб попередити появу дефектів на усіх стадіях виробництва, монтажу та доставки фотоелектричних модулів необхідно:

- вибирати фотоелектричні модулі серед відомих виробників та здійснювати ремонтні роботи на фотоелектричних модулях у спеціалізованих фірмах;
- регулярно організовувати своєчасний технічний огляд та аналізувати якість роботи фотоелектричних модулів;
- додержуватися головних правил експлуатації та слідкувати за приладами та обладнанням.

В таблиці 1 наведено характерні пошкодження фотоелектричних модулів в процесі експлуатації.

Таблиця 1. Пошкодження поверхні фотоелектричних модулів в процесі експлуатації

Опис	Зображення	Вплив пошкоджень на параметри фотоелектричних модулів
Сліди від пропалу на задній панелі внаслідок нагрівання вздовж шини		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля
Сліди пропалу лицевої поверхні, зміна кольору герметика, пов'язана з перегрівом уздовж металевих з'єднань		Впливає на опір
Розшарування мультикристалічного модуля		Впливає на потужність напругу та стум
Розшарування c-Si модуля		Впливає на потужність напругу та стум
Електрохімічна корозія фотомодуля, яке спричинило розшарування		Впливає на потужність напругу та стум
Пригоріла етиленвінілацетатна плівка в центрі сонячного елемента		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля

Підвищене нагрівання сонячного елемента, що спричинило зміну кольору сонячного елемента на коричневий		Впливає на потужність, опір, напругу та стум
Прогар етиленвінілацетатної плівки на верхній частині сонячного елемента з двома тріщинами в комірці.		Впливає на потужність та опір
Зміна кольору срібної пасти, яка використовується для ліній сітки на сонячному елементі, зміна кольору з'являється вздовж тріщин комірки.		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля
Розшарування заднього листа		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля
Розбиття тонкоплівкового скла		Впливає на потужність напругу та стум

Висновки

В статті проаналізовані фактори та причини пошкодження фотоелектричних модулів в процесі експлуатації та показано їх вплив на основні характеристики фотомодуля. Проаналізовані різні види пошкоджень на поверхні фотоелектричних модулів та причини їх виникнення. Виявлено, що причинами пошкодження поверхні фотоелектричних модулів є: екстремальні погодні умови, виробничий брак, неправильна експлуатація, деградація фотомодулів протягом часу.

Відзначено, що при тривалій експлуатації фотоелектричних модулів відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії та вихідної потужності.

Список використаних джерел:

1. Глушко О. Параметри, характеристики і фактори, що впливають на ефективність та надійність роботи фотоелектричних перетворювачів у складі електроенергетичних систем / О. Глушко, С. Степенко // *Технічні науки та технології*. – 2021. – №. 1 (23). – С. 249-264.
2. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory / Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko P., Nosyk A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – № 3/8(111). – P. 75-89.
3. Кирисов І. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів / І. Кирисов, П. Буданов // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2022. – Вип 29. – С. 104-117.
4. Олійник Ю. С. Використання сонячних батарей у сучасних умовах / Ю. С. Олійник // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2018. – № 29 (68). – С. 220-224.
5. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента / І. Г. Кирисов, П. Ф. Буданов, Е. О. Хом'як, К. Ю. Бровко // *Вісник ВПІ*. – 2022. – Вип. 1. – С. 35–38.
6. Jorgensen M. Stability/degradation of polymer solar cells / Jorgensen M., Norrman K., Krebs F. C. // *Solar energy materials and solar cells*. – 2008. – Т. 92, № 7. – P. 686-714.
7. The impact of cracks on photovoltaic power performance / Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., Dales M. // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices 2.2*. – 2017. – P. 199-209.
8. Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real time long term data measurements / Dhimish M., Holmes V., Dales M., Mehrdadi B. // *Micro & Nano Letters*. – 2017. – № 12(10). – P. 803-807.
9. Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells / Li Y., Huang W., Huang H., Hewitt C., Chen Y., Fang G., Carroll D. L. // *Sol. Energy*. – 2013. – Vol. 90. – P. 51-57.
10. Laudani A. High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms / Laudani A., Riganti Fulginei F., Salvini A. // *Sol. Energy*. – 2014. – Vol. 103. – Pp. 316-326.
11. Lineykin S. An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel / Lineykin S., Averbukh M., Kuperman A. // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2014. – Vol. 30. – Pp. 282-289.
12. Modeling of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four- and Five-Parameter Models / Dongue S. B., Njomo D., Tamba J. G., Ebengai L. // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2012. – Vol. 2. – P. 612-619.
13. Cubas J. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior / Cubas J., Pindado S., Victoria M. // *Power Sources*. – 2014. – Vol. 247. – P. 467-474.
14. A new method for determining the characteristics of solar cells / Peng L., Sun Y., Meng Z., Wang Y., Xu Y. // *Power Sources*. – 2013. – Vol. 227. – P. 131-136.
15. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox / Said S., Massoud A., Benammar M., Ahmed S. // *Journal of Energy and Power Engineering*. – 2012. – Vol. 6. – P. 1965-1975.
16. Cubas J. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function / Cubas J., Pindado S., Manuel C. // *Energies*. – 2014. – Vol. 7. – P. 4098-4115

References:

1. Glushko, O & Stepenko, S 2021, 'Parametri, harakteristiki i faktori, scho vplyvayut na efektyvnist ta nadiynist roboti fotoelektrichnih peretvoryuvachiv u skladi elektroenergetichnih sistem' [*Parameters, characteristics, and factors influencing the efficiency and reliability of photovoltaic converters within electric power systems*], *Tekhnichni nauki ta tekhnologiyi*, no 1 (23), pp. 249-264.
2. Budanov, P, Kyrysov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory' *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3/8(111), pp. 75-89.
3. Kirisov, I & Budanov, P 2022, 'Metodi doslidzhen poglinayuchoyi poverhni sonyachnih elementiv' [*Methods for investigating the absorbing surface of solar cells*], *Mashinobuduvannya*, iss. 29, pp. 104-117.
4. Oliynik, YuS 2018, 'Vikoristannya sonyachnih batarey u suchasnih umovah' [*Using solar panels in modern conditions*], *Vcheni zapiski Tavriyskogo natsionalnogo universitetu imeni V.I.Vernadskogo. Seriya: Tekhnichni nauki*, no 29, Pp. 220-224
5. Kirisov, IG, Budanov, PF, Hom'yak, EO & Brovko, KY 2008, 'Pidhodi ta vimogi do modelyuvannya strukturi napivprovodnikovogo sharu sonyachnogo elementa' [*Approaches and requirements for modeling the structure of a semiconductor layer in a solar cell*], *Visnik VPI*, iss. 1, Pp. 35–38.
6. Jorgensen, M, Norrman, K & Krebs, FC 2008, 'Stability/degradation of polymer solar cells', *Solar energy materials and solar cells*, vol. 92, no 7, pp. 686-714.
7. Dhimish, M, Holmes, V, Mehrdadi, B & Dales, M 2017, 'The impact of cracks on photovoltaic power performance', *Journal of Science: Advanced Materials and Devices 2.2*, pp. 199-209.

8. Dhimish, M, Holmes, V, Dales, M & Mehrdadi, B 2017, 'Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real time long term data measurements', *Micro & Nano Letters*, no 12(10), pp. 803-807.
9. Li, Y, Huang, W, Huang, H, Hewitt, C, Chen, Y, Fang, G & Carroll, DL 2013, 'Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells', *Sol. Energy*, Vol. 90, P. 51-57.
10. Laudani, A, Riganti Fulginei, F & Salvini, A 2014, 'High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms', *Sol. Energy*, Vol. 103, Pp. 316-326.
11. Lineykin, S, Averbukh, M & Kuperman, A 2014, 'An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel', *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 30, P. 282-289.
12. Dongue, SB, Njomo, D, Tamba, JG & Ebengai, L 2012, 'Modeling of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four- and Five-Parameter Models', *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, P. 612-619.
13. Cubas, J, Pindado, S & Victoria, M 2014 'On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior', *Power Sources*, Vol. 247, P. 467-474.
14. Peng, L, Sun, Y, Meng, Z, Wang, Y & Xu, Y 2013, 'A new method for determining the characteristics of solar cells', *Power Sources*, Vol. 227, P. 131-136.
15. Said, S, Massoud, A, Benammar, M & Ahmed, S 2012, 'A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox' *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 6, P. 1965-1975.
16. Cubas, J, Pindado, S & Manuel, C 2014, 'Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function', *Energies*, Vol. 7, P. 4098-4115.

Стаття надійшла до редакції 12 січня 2024 року.