

Розділ 4

ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 004.43:621.381

МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ПАНЕЛІ В СЕРЕДОВИЩІ LABVIEW

**Віталій Боярчук, к. т. н., Сергій Сиротюк, к. т. н., Валерій Сиротюк, к. т. н.,
Сергій Коробка, к. т. н., Вадим Пташник, к. т. н., Сергій Баранович, к. т. н.,
Роман Шеремета, к. т. н.**

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: ssyr@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.071>

Боярчук В., Сиротюк С., Сиротюк В., Коробка С., Пташник В., Баранович С., Шеремета Р. Моделювання фотоелектричної панелі в середовищі LabVIEW

У праці здійснено опрацювання теоретичних основ та розробку комп'ютерної моделі фотоелектричної установки в середовищі LabVIEW. Теоретична модель ідеальної фотоелектричної панелі сформована на базі джерела струму з паралельним увімкненням діода. Для наближення цієї моделі до реальної в неї внесено опори послідовного та паралельного включення. Для врахування впливу на електричні параметри фотоелектричної панелі температури цей чинник відображений у моделі. Обґрунтовані характеристики фотоелектричної панелі щодо взаємозв'язку потоку сонячної радіації, струму та напруги становили теоретичну основу розробленої комп'ютерної моделі. Для дослідження вольт-амперної та вольт-потужнісної характеристик фотоелектричної панелі сформовані двокоординатні віртуальні осцилографи, які дозволяють у режимі зміни впливових чинників відстежити рівень їх впливу. Окремо для оцінки впливу на вихідні характеристики фотоелектричної панелі температури здійснено побудову двокоординатних віртуальних осцилографів, які відображають зміну вольт-амперної та вольт-потужнісної характеристик за рахунок цього впливу. Використання паспортних даних реальної фотоелектричної панелі дало змогу оцінити відповідність розробленої комп'ютерної моделі. Розроблена комп'ютерна модель дозволяє здійснювати дослідження впливу рівня сонячної радіації, температури та режиму відбору енергії на вихідні параметри фотоелектричної панелі в широкому діапазоні зміни впливових чинників. Зокрема, дослідження комп'ютерної моделі фотоелектричної установки проілюстроване в умовах змінного рівня потоку сонячної радіації за сталої температури при змінному навантаженні, а також за сталого рівня потоку сонячної радіації за змінної температури з відповідною зміною навантаження. Ця комп'ютерна модель є складовою частиною експертної системи комп'ютерного моделювання режимів роботи засобів комплексного перетворення відновлюваних джерел енергії у теплову та електричну.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, фотоелектрична панель, прикладне програмне забезпечення, середовище LabVIEW.

Boiarchuk V., Syrotiuk S., Syrotiuk V., Korobka S., Ptashnyk V., Baranovych S., Sheremeta R. Simulation of a photovoltaic panel in the LabVIEW environment

The work presents theoretical fundamentals and the computer model of a photovoltaic unit developed in the LabVIEW environment. The theoretical model of a perfect photovoltaic panel is composed on the basis of power source with the diode parallel connection. To maximum approach the model to a real one, it is supplemented with supporters of serial and parallel connection. To consider the impact of temperature on the electric parameters of the photovoltaic panel, that factor is included in the model. The justified characteristics of the photovoltaic model in terms of relations between the solar radiation flux, current and voltage have created a theoretical basis of the developed computer model. To study the volt-ampere and volt-power characteristics of the photovoltaic panel, the authors composed virtual two-coordinate oscillographs which monitor the impact of influencing factors during their change. To assess the impact of temperature on the initial characteristics of the photovoltaic panel, the authors composed virtual two-coordinate oscillographs which demonstrate changes of the volt-ampere and volt-power characteristics due to the impact. Using the passport data of a real photovoltaic panel, the researchers can assess conformity of the composed computer model. The presented computer model enables studying the impact of the solar radiation level, temperature and the mode of energy drawing on the initial parameters of the photovoltaic panel under a wide range of the influencing factors change. In particular, the computer model of the photovoltaic unit is demonstrated in the conditions of variable solar radiation flux under a permanent temperature and alternating load, as well as under a permanent level of the solar radiation flux and alternating temperature with the corresponding change of load. The presented computer model is a constituent of the expert system of computer simulation of the operation modes of the means of complex transformation of renewable sources of energy into the thermal and electric power.

Key words: computer simulation, photovoltaic panel, application software, the LabVIEW environment.

Постановка проблеми. Дослідження параметрів засобів відновлюваної енергетики в режимі реального часу зіштовхується з проблемою нерегулярності надходження на сприймальну поверхню відповідного джерела енергії, що утруднює процес обробки даних, потребує розробки спеціальних алгоритмів усунення стохастичного впливу потоків енергії, а також знижує достовірність отриманих результатів. Застосування комп'ютерного моделювання енергетичних засобів та систем дає змогу суттєво спростити і знизити вартість таких вишукувальних робіт. Комп'ютерне моделювання є потужним інструментом дослідника, оскільки дає змогу в емпіричній формі представити основні функціональні властивості досліджуваного об'єкта, а також за рахунок введення в розроблену модель додаткових елементів дослідити їх вплив на основні показники, у тому числі й безруйнівного впливу в разі застосування критичних умов експлуатації засобів.

Сонячна електроенергетика, яка базується на використанні фотоелектричних панелей, особливо потребує теоретичного і комп'ютерного моделювання, оскільки нерегулярність потоку сонячного випромінювання є доволі значною. Крім того, на режим роботи фотоелектричних установок впливає значна кількість чинників: рівень хмарності, період року, кутові характеристики поточного розміщення Сонця на небосхилі тощо [19].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд літературних джерел засвідчив значний інтерес дослідників до теми моделювання фотоелектричних панелей. Дослідження характеру зміни електричних показників фотоелектричного модуля під впливом зовнішніх чинників є важливим для пошуку раціональних алгоритмів відбору виробленої енергії.

Є достатня кількість програмних засобів, які дозволяють виконати моделювання та аналіз режимів роботи фотоелектричної установки. До них можна віднести Solar Pro, PV-Design Pro, PV-Spice, PV CAD та ін. [3; 18]. Однак більшість із них є достатньо дорогими ліцензійними програмами, які зазвичай недоступні для дослідників.

Як варіант є доцільність у розробці комп'ютерних моделей з використанням доступних пакетів, які зазвичай є в розпорядженні некомерційних дослідників. До них можна зарахувати пакети Matlab/Simulink, Proteus, LabVIEW тощо. Застосування зазначених програмних засобів дає змогу відносно швидко й точно виконати побудову моделей та їх дослідження, які, однак, потребу-

ватимуть експериментальної перевірки в реальних умовах.

Зокрема, у працях [1; 4; 5; 9; 12; 13; 15] здійснено розробку та дослідження фотоелектричних панелей у середовищі Matlab/Simulink. Також у Matlab моделювання здійснюють із використанням додаткових субмодулів «PV Systems Toolbox» [4], інструментів Sim-Electronics та бібліотек Simscape [5]. Для оцінки впливу навколишнього середовища на режими роботи фотоелектричних панелей у розроблювані моделі зазвичай вносять доповнення, які відображають, наприклад, температурний вплив тощо. Окремі дослідники здійснюють моделювання режимів роботи фотоелектричних панелей у програмному середовищі Proteus [10; 20]. Також для моделювання фотоелектричних панелей та установок на їх основі застосовують такий потужний програмний комплекс, як LabVIEW [11; 14], який серед іншого використовується для моніторингу фотопанелей в умовах реальної експлуатації. Нами також було використано програмний комплекс LabVIEW для розробки й дослідження контролера керування режимами роботи вітроелектричної установки з використанням інструментарію Fuzzy-Logic [2].

Крім наукових цілей, здійснюється розробка комп'ютерних моделей фотоелектричних панелей і для навчального використання, що дозволяє гнучко підійти до процесу дослідження засобів перетворення відновлюваних джерел енергії в мінливому потоці [6].

Постановка завдання. Зазвичай моделювання сонячних електроустановок здійснюється в середовищі Matlab/Simulink, Proteus тощо, однак моделювання в середовищі LabVIEW має ширші функціональні можливості, зокрема й можливості нарощування доповненнями, організації процесу дослідження з використанням реальних фотоелектричних панелей, моніторингу режимів їх роботи, формування гібридних енергетичних систем з використанням засобів інших відновлюваних джерел енергії в режимі реального масштабу часу. Побудова комплексної системи дослідження та моніторингу режимів роботи енергетичного обладнання відновлюваної енергетики потребує створення низки комп'ютерних моделей, які будуть складовими цієї системи і взаємодія яких є предметом подальших досліджень. У даному випадку розробка комп'ютерної моделі фотопанелі розглядається як перший етап щодо створення експертної системи дослідження засобів відновлюваної енергетики.

Виклад основного матеріалу. Традиційно сонячна фотоелектрична панель представляється у вигляді ідеального сонячного елемента, який є джерелом струму і який запаралелений діодом (рис. 1).

Відповідно до першого закону Кірхгофа вихідний струм ідеальної фотоелектричної панелі без врахування наявних опорів можна визначити так:

$$I = I_{ph} - I_d, \quad (1)$$

де I_{ph} – фотострум, А; I_d – зворотний струм діода, А.

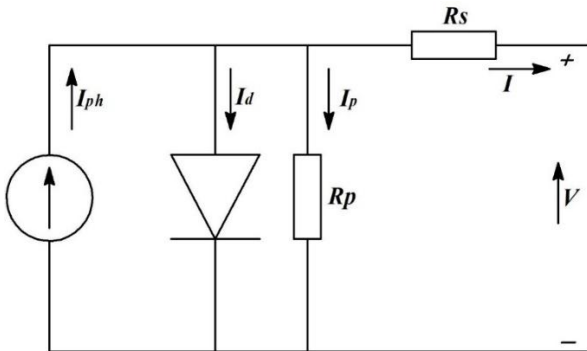


Рис. 1. Еквівалентна схема фотоелектричної панелі
Fig. 1. Equivalent circuit of a photovoltaic panel

З теорії напівпровідників можна записати спрощене рівняння вольт-амперної характеристики сонячної фотоелектричної панелі за формулою [4; 7; 8; 16; 17]:

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s K A T_o}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

де I_s – зворотний струм, А; q – заряд електрона, Кл; V_{oc} – напруга розімкненого кола, В; N_s – кількість фотоелементів, що з'єднані в послідовний ланцюг, од.; K – стала Больцмана, Дж/°К; A – коефіцієнт ідеальності діода; T_o – температура фотоелектричної панелі, °К.

До реальної еквівалентної схеми фотоелектричної панелі слід додати послідовний (R_s) та паралельний, або шунтовий, (R_p) опори, які були проігноровані в ідеальній схемі. Ці параметри насправді мають вплив на характеристики фотопанелі. Перший із них вказує на внутрішні втрати в напівпровідниковому матеріалі, а другий – на перетікання зарядів у зворотному напрямі.

З урахуванням присутності послідовного та паралельного опорів зворотний струм напівпровідника можна подати у вигляді

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s K A T_o}\right) - 1 \right]. \quad (3)$$

Відповідно до цього рівняння струму фотопанелі (3) може бути записане так:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s K A T_o}\right) - 1 \right]. \quad (4)$$

У випадку паралельного приєднання фотопанелей у масиві рівняння струму матиме такий вигляд:

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s K A T_o}\right) - 1 \right]. \quad (5)$$

Потрібно врахувати й те, що фотострум панелі є пропорційний падаючому потоку. Окрім того, він не залежить від напруги, тобто лінійно залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. Також на вихідний фотострум має вплив температура фотопанелі. Вказаний взаємозв'язок струму короткого замикання, параметрів рівня сонячного випромінювання та температурний режим роботи відображає така формула:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_o - T_r)] \cdot \frac{G}{G_{ref}}, \quad (6)$$

де I_{sc} – струм короткого замикання, А; K_i – температурний коефіцієнт струму короткого замикання, %/°С; T_r – нормативна температура фотопанелі за стандартом STC, °С; G та G_{ref} – поточна та нормативна інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м².

Крім того, важливими параметрами, які характеризують фотоелектричну панель, є зворотний струм насичення I_{rs} і струм насичення I_s , які розраховуються зі взаємозалежних рівнянь:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s K A T_o}\right) - 1 \right]}, \quad (7)$$

$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T_o}{T_r} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{qE_g}{AK} \right) \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_o} \right) \right], \quad (8)$$

де E_g – ширина забороненої зони, еВ.

Моделювання фотопанелі слід виконувати з урахуванням фактичних її електричних параметрів, тому за основу було взято фотоелектричну панель типу JA SOLAR JAM60S09-320/PR, електричні параметри якої подано в таблиці.

Відповідно до наведеної методології оцінки електричних параметрів фотоелектричної панелі було розроблено комп'ютерну модель побудови вольт-амперної та вольт-потужнісної характеристики, фрагмент фронтальної панелі якої в умовах змінної інтенсивності сонячного випромінювання та за сталої температури фотопанелі подано на рис. 2.

Таблиця. Електричні параметри фотоелектричної панелі JA SOLAR JAM60S09-320/PR
Table. Electrical parameters of the photovoltaic panel JA SOLAR JAM60S09-320/PR

Параметр	Позначення	Значення
Максимальна потужність за стандартом STC	P_m	320
Напруга розімкненого кола	V_{oc}	40,78 В
Струм короткого замикання	I_{sc}	10,18 А
Напруга в точці максимальної потужності	V_{mp}	33,17 В
Струм у точці максимальної потужності	I_{mp}	9,65 А
Кількість фотоелементів у фотопанелі	N_s	60
Кількість фотоелементів, які з'єднані паралельно	N_p	1
Коефіцієнт ідеальності діода	A	1,3
Температурний коефіцієнт струму короткого замикання	K_i	0,06 %/°C
Температурний коефіцієнт напруги холостого ходу	K_u	-0,3 %/°C
Нормативна температура за стандарту STC	T_{ref}	25 °C
Рівень сонячної радіації за стандарту STC	G_{ref}	1000 Вт/м ²
Ефективність фотоелектричної панелі	η	19,4 %

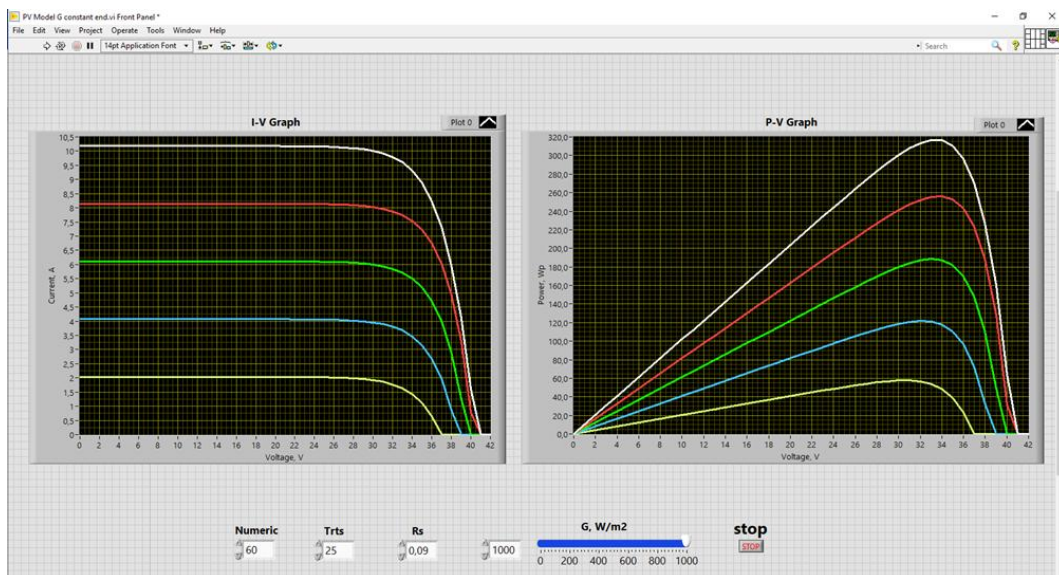


Рис. 2. Вольт-амперні та вольт-потужнісні характеристики фотоелектричного модуля за змінного рівня сонячного випромінювання та постійної температури
Fig. 2. Volt-ampere and volt-power characteristics of the photovoltaic module under varying levels of solar radiation and constant temperature

Як бачимо (див. рис. 2), при зменшенні рівня сонячного випромінювання криві, які описують вольт-амперні та вольт-потужнісні характеристики, мають меншу охоплювану поверхню (є щораз нижчими), що свідчить про зниження потужності фотоелектричної панелі. Зміна рівня інтенсивності сонячної радіації задавалася з кроком у 200 Вт/м², починаючи від 1000 Вт/м² (білий колір кривої). Таким чином було задано такі рівні: 800 (червона крива), 600 (зелена крива), 400 (синя крива) та 200 (жовта крива). Причому зниження відбувається більшою мірою за рахунок зменшення струму при майже незмінній напрузі.

Аналогічні дослідження для умов сталої інтенсивності сонячного випромінювання та змінної температури фотопанелі подано на рис. 3.

Побудовані вольт-амперні та вольт-потужнісні характеристики фотоелектричної панелі за сталою рівня сонячної радіації (1000 Вт/м²) та майже сталою струму, але зі змінною напругою, відображають загальну зміну потужності, яка зумовлюється температурним впливом за рахунок більшої зміни напруги, ніж струму. Зокрема, за температури, нижчої від нормативної (крива червоного кольору, яка відповідає температурі 25 °C), – напруга зростає (крива білого кольору, яка відпо-

відає температурі 10 °C), а при перегріві фотоелектричної панелі напруга знижується (криві зеленого, синього та жовтого кольорів, які відповідають температурам 40, 55 і 70 °C відповідно). Тобто за однакового рівня сонячної радіації в зимовий пе-

ріод слід очікувати зростання потужності (відповідно й продуктивності) фотоелектричної панелі, а в літній період, навпаки, – зниження.

Блок-діаграму (програмний код) комп'ютерної моделі фотоелектричної панелі подано на рис. 4.

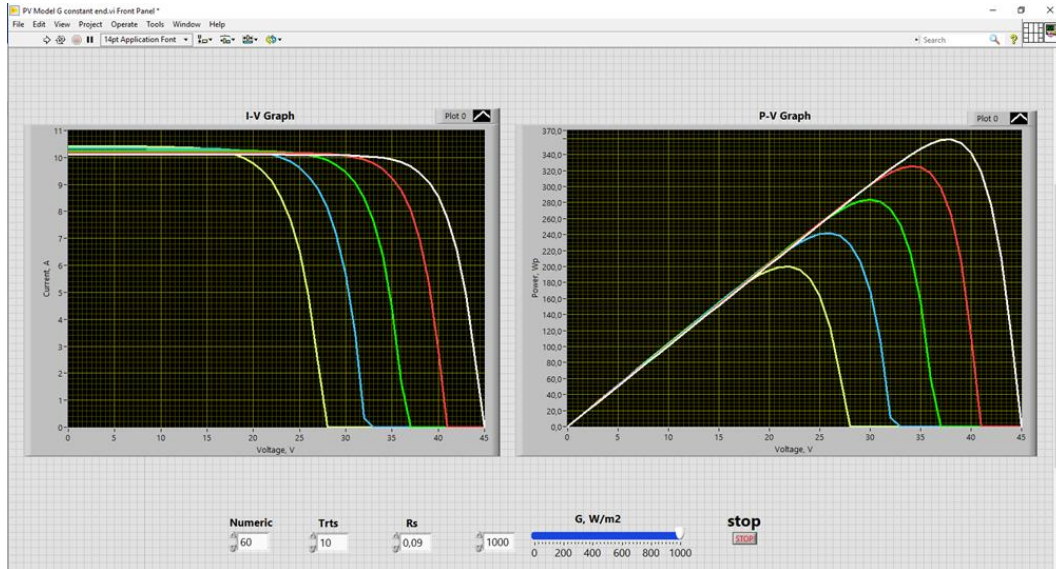


Рис. 3. Вольт-амперні та вольт-потужнісні характеристики фотоелектричного модуля за сталого рівня сонячної радіації та змінної температури
Fig. 3. Volt-ampere and volt-power characteristics of the photovoltaic module at a constant level of solar radiation and variable temperature

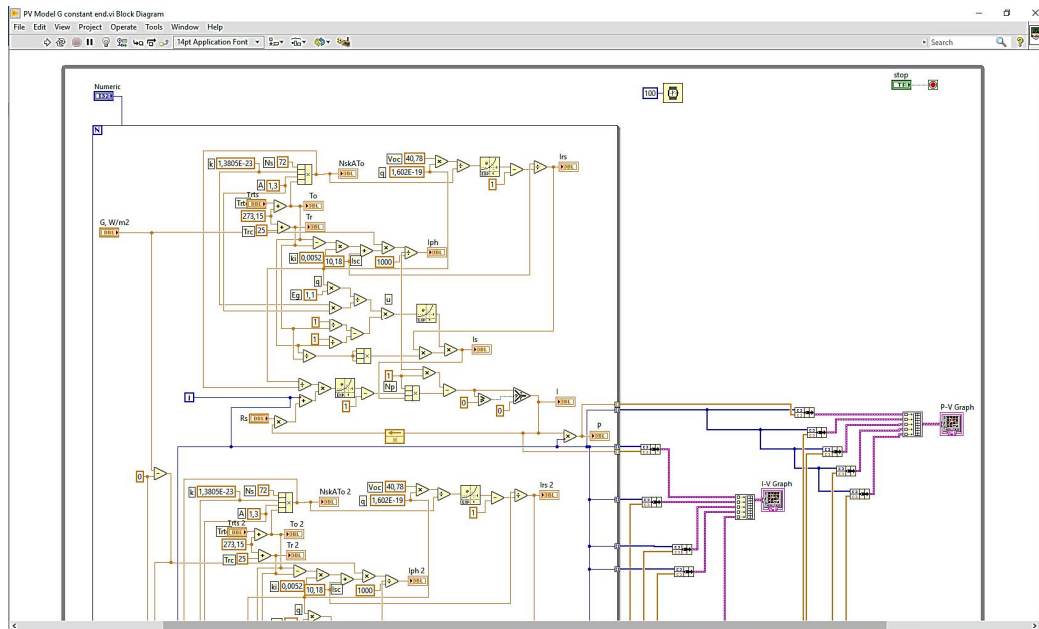


Рис. 4. Фрагмент блок-діаграми (програмний код) комп'ютерної моделі фотоелектричної панелі
Fig. 4. Fragment of a block diagram (program code) of a computer model of the photovoltaic panel

Для дослідження вольт-амперної та вольт-потужнісної характеристик досліджуваної моделі фотоелектричної панелі в умовах зміни впливових

чинників застосовано багатопотокову передачу даних до двоканальних віртуальних осцилографів. Застосовані віртуальні інструменти формування

комп'ютерної моделі дозволяють зміною інтенсивності потоку сонячної радіації, а також зміною температури фотопанелі дослідити зміну форми вольт-амперних та вольт-потужнісних характеристик фотоелектричної панелі.

Висновки. Для формування експертної системи комп'ютерного моделювання режимів роботи засобів комплексного перетворення відновлюваних джерел енергії у теплову та електричну необхідно розробити відповідні моделі, які відображатимуть її структурні компоненти. Стосовно використання сонячної енергії, то її структурними компонентами є фотоелектрична та сонячна теплова установки.

Розроблена модель фотоелектричної панелі в середовищі LabVIEW може слугувати інструментом для дослідження режимів її роботи в широкому діапазоні впливових параметрів та обґрунтування параметрів засобів управління навантаженням.

Результати моделювання параметрів фотоелектричної панелі за різних умов (сталій та змінний рівень сонячної радіації, стала та змінна температура) відображають її характеристики, які зумовлені відповідними змінами впливових чинників. Зокрема, досліджено, що: зі зниженням рівня сонячної радіації відповідно знижується й вихідна потужність фотоелектричної панелі; зі зниженням температури фотопанелі її потужність зростає, і навпаки, при підвищенні температури – спадає, що повинно бути враховано під час добору параметрів структурних елементів фотоелектричної установки, а також під час визначення поточної продуктивності фотоелектричної установки в різних кліматичних умовах.

Бібліографічний список

1. Дослідження динамічних характеристик фотоелектричних панелей різних видів / А. Хоховський та ін. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С. 83-94.
2. Сиротюк С., Сиротюк В., Гальчак В. Fuzzy-Logic контроллер управления режимами работы ветроэлектрической установки. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery*. 2015. Vol. 17, No 4. P. 39-46.
3. Carta J. A. A continuous bivariate model for wind power density and wind turbine energy output estimations. *Energy Conversion and Management*. 2007. Vol. 48. P. 420-432.
4. Design of a library of components for autonomous photovoltaic system under Matlab/Simulink / A. Chermitti, O. Boukli-Hacene, A. Meghebbat, N. Bibitriki, A. Kherous. *Physics Procedia*. 2014. 55. P. 199-206.
5. Development of photovoltaic cell models using fundamental modeling approaches / M. Aidoud, C.-E. Feraga, M. Bechouat, M. Sedraoui, S. Kahla. *Energy Procedia*. 2019. 162. P. 263-274.
6. Erdem Z., Erdem M. B. A Proposed Model of Photovoltaic Module in Matlab/Simulink TM for Distance Education. 13 th International Educational Technology Conference. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2013. 103. P. 55-62.
7. Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering. Processes and Systems*. Second Edition. Amsterdam: Elsevier Inc., 2014. 819 p.
8. Luque A., Hegedus S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 1179 p.
9. Modeling and Simulation of Photovoltaic Module and Array based on One and Two Diode Model Using Matlab/Simulink / A. Bouraiou et al. *Energy Procedia*. 2015. 74. P. 864-877.
10. Modeling of Photovoltaic Panel by using Proteus / S. Motahhir, A. Chalh, A. El Ghzizal, S. Sebti, A. Derouich. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2017. 10 (2). P. 8-13.
11. Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW / A. Chouder, S. Silvestre, B. Taghezouit, E. Karatepe. *Solar Energy*. 2013. Vol. 91. P. 337-349.
12. Nguyen X. H., Nguyen M. P. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Environmental System Research*. 2015. 4. P. 24.
13. Prakash R., Singh S. Designing and Modelling of Solar Photovoltaic Cell and Array. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2016. Vol. 11, iss. 2, ver. III. P. 35-40.
14. Real time simulation of solar photovoltaic module using labview data acquisition card / Y. Yadav, R. Roshan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, D. P. Kothari. *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*. 2013. P. 512-523.
15. Reddy G. S., Reddy T. B., Kumar M. V. A MatLab based PV Module Models analysis under Conditions of Nonuniform Irradiance. *Energy Procedia*. 2017. 117. P. 974-983.
16. Sera D., Teodorescu R., Rodriguez P. PV panel model based on datasheet values. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*. 2007. P. 2392-2396.
17. Simplified model of a photovoltaic module / A. Bellini, S. Bifaretti, V. Iacovone, C. Cornaro. *Applied Electronics. IEEE*, 2009. P. 47-51.
18. Sharma D. K., Verma V., Singh A. P. Review and analysis of solar photovoltaic software. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*. 2014. Vol. 4 (2). P. 725-731.
19. Szymanski B. *Instalacje fotowoltaiczne*. Wydanie X. Krakow: Redakcja GLOBEnergia, 2021. 366 s.
20. Yaqoob S. J., Motahhir S., Agyekum E. B. A new model for a photovoltaic panel using Proteus software tool under arbitrary environmental conditions. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 333. P. 130074.

Стаття надійшла 17.09.2022