

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.383.51

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2019.3.1>

Є.О. БАГАНОВ

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0001-8771-5735

І.Ф. ПОГРЕБНЯК

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0003-0935-1168

**БЕЗИТЕРАЦІЙНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧКИ
МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ
ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У MATLAB/SIMULINK**

У даній роботі запропонована безітераційна методика визначення стану фотоелектричного модуля, що відповідає точці його максимальної потужності. Методика базується на п'ятипараметричній однодіодній моделі фотоелектричного перетворювача. Наближений розв'язок системи рівнянь, що описує стан фотоелектричного модуля у точці максимальної потужності побудований з використанням функції Ламберта. Дана функція є стандартною функцією пакету MATLAB і може бути використана у графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink у функції користувача через застосування блоку S-Function.

Проведена перевірка коректності отриманої моделі та можливості її застосування у MATLAB/Simulink. Порівняння результатів, отриманих за даною методикою, з результатами ітераційним підходом пошуку точки максимальної потужності фотоелектричного модуля за методом «Збурення та спостереження» показало достатню точність відтворення параметрів модуля за різних умов у навколишньому середовищі. Максимальна відносна похибка розрахунку потужності не перевищувала 3,95% в усьому інтервалі потужностей модуля і 2,5 відсотка в межах від 50% генерації його номінальної потужності.

Показано, що запропонована модель може працювати самостійно без використання компонентів фотоелектричних модулів бібліотек Simulink. На основі цього зроблено висновок, що запропонована методика не обмежує крок за часом при розрахунку генерації фотоелектричного модуля у точці максимальної потужності і, відповідно, може бути застосована для імітаційного моделювання тривалої роботи сонячних електричних станцій.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, точка максимальної потужності, імітаційне моделювання, безітераційна методика, однодіодна модель.

Е.А. БАГАНОВ

Херсонский национальный технический университет

ORCID: 0000-0001-8771-5735

И.Ф. ПОГРЕБНЯК

Херсонский национальный технический университет

ORCID: 0000-0003-0935-1168

**БЕЗИТЕРАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОЧКИ
МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В MATLAB/SIMULINK**

В данной работе предложена безитерационная методика определения параметров фотоэлектрического модуля в точке его максимальной мощности. Методика базируется на пятипараметрической однодиодной модели фотоэлектрического преобразователя. Приближенное решение системы уравнений, описывающей параметры фотоэлектрического модуля в точке максимальной мощности, построено с использованием функции Ламберта. Данная функция является стандартной функцией пакета MATLAB и может быть использована в графической среде имитационного моделирования Simulink в функции пользователя через применение блока S-Function.

Проведена проверка корректности полученной модели и возможности ее применения в MATLAB/Simulink. Сравнение результатов, полученных по данной методике, с результатами, полученными применением итерационного подхода поиска точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля по методу «Возмущение и наблюдение» показало достаточную точность воспроизведения параметров модуля при различных условиях в окружающей среде. Максимальная

относительная погрешность расчета мощности не превышала 3,95% во всем интервале мощностей модуля и 2,5 процента в пределах от 50% генерации его номинальной мощности.

Показано, что предложенная модель может работать самостоятельно без использования компонентов фотоэлектрических модулей библиотек Simulink. На основе этого сделан вывод, что предложенная методика не ограничивает шаг по времени при расчете генерации фотоэлектрического модуля в точке максимальной мощности и, соответственно, может быть применена для имитационного моделирования длительной работы солнечных электростанций.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, точка максимальной мощности, имитационное моделирование, безитерационная методика, однодиодная модель.

Ye.A. BAGANOV

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0001-8771-5735

I.F. POGREBNIYAK

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0003-0935-1168

ITERATION-FREE METHOD OF DETERMINATION OF PHOTOVOLTAIC MODULE PARAMETERS AT THE MAXIMUM POWER POINT FOR SIMULATION IN MATLAB/SIMULINK

In this paper, an iterative approach for determination of parameters of a photovoltaic module at the maximum power point is proposed. The approach is based on a five-parameters single-diode model of a photovoltaic cell. An approximate solution of the system of equations, which describes the parameters of the photovoltaic module at the maximum power point, was obtained using the Lambert function. This function is a standard function of the MATLAB package and can be used in the Simulink graphical simulation environment as a user function with the use of the S-Function block.

The validation of the obtained model and the possibility of its application in MATLAB/Simulink were tested. Comparison of the results obtained by this method with the results obtained by use of the "Perturb and Observe" method, which is the iterative approach of determination of the maximum power point parameters of a photovoltaic module, showed a sufficient accuracy of the module parameters calculations at various environmental conditions. The maximum relative error of calculated module power did not exceed 3.95% in the whole range of calculations and 2.5 percent in the range from 50% of its rated power generation.

It is shown that the proposed model can work independently, without using the components of the photovoltaic modules of the Simulink libraries. Based on this, it was concluded that the proposed method does not limit the time step at calculations the generation power of the photovoltaic module at the maximum power point and, accordingly, can be used to simulate the long-term operation of solar power systems.

Keywords: photovoltaic module, maximum power point, simulation, iteration-free method, single-diode model.

Постановка проблеми

Швидке виснаження традиційних викопних видів палива, зміна клімату, глобальне потепління та потреби в енергії, що постійно зростають, призвели до стрімкого розвитку систем поновлюваної енергетики, зокрема з використанням енергії Сонця. Найбільш популярне її застосування – сонячні електричні системи (СЕС), що пояснюється значною кількістю вільно доступних ресурсів та можливістю організації розподіленої генерації електроенергії [1 – 4].

Головні проблеми використання СЕС полягають у їх відносно невисокому ККД, нелінійності характеристик фотоелектричних модулів (ФЕМ) та залежності потужності від погоди та часу доби при відносно високій вартості компонентів [1, 5, 6]. Тому, зазвичай, СЕС потребують оптимізації складу для зменшення їх вартості та можливості органічної інтеграції у склад енергосистеми [6]. Така оптимізація базується на імітаційному моделюванні роботи СЕС [5 – 7].

У більшості випадків, коли реалізується енергетичне моделювання СЕС, робота ФЕМ приймається при умові максимальної потужності, припускаючи, що в системі використовується система пошуку точки максимальної потужності (ТМП) [7 – 9]. Внаслідок нелінійності вольт-амперної характеристики (ВАХ) ФЕМ та її залежності від температури модуля та інтенсивності сонячного випромінювання, визначення параметрів ТМП за даних конкретних зовнішніх умов визначається ітераційним процесом [10], що потребує додаткових операцій на кожному часовому кроці моделювання і значно підвищує загальний час розрахунків, особливо при використанні моделей реальних компонентів пошуку ТМП. Останнє є критичним для моделювання довготривалої роботи СЕС, так як істотно збільшує час розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Графічне середовище Simulink пакету MATLAB ефективно використовується для імітаційного моделювання ФЕМ та СЕС [8, 11 – 13]. Бібліотека «Specialized Power Systems» містить елемент «PV Array», перевагами якого є значна вбудована база даних моделей промислових ФЕМ, а також можливість у динаміці задавати їх температуру та інсоляцію.

Однак для проведення моделювання СЕС, що застосовує систему пошуку ТМП, потребує використання у моделі процесів широтно-імпульсної модуляції та ітераційних алгоритмів [14, 15]. Останнє, для коректного проведення розрахунків, вимагає малих часових періодів опитування та перерахунку стану системи.

Головною причиною, що потребує застосування ітераційних методів пошуку ТМП є суттєва нелінійність ВАХ ФЕМ [12 – 16]. Тому для довготривалого моделювання застосовуються усереднені параметри ФЕМ, такі як температурні залежності параметрів напруги холостого ходу, струму короткого замикання та потужності у ТМП, що наводяться у каталогах виробників [7].

На даному етапі існує декілька аналітичних виразів, що запропоновані на основі різних спрощень опису ВАХ ФЕМ [17 – 19], які не потребують ітераційних процесів для визначення параметрів ТММ. Відповідно, застосування таких виразів надасть змогу зменшити кількість операцій на один часовий крок моделювання роботи СЕС, а також не обмежувати збільшення кроку за часом стійкістю роботи системи пошуку ТМП. Однак інформація щодо застосування даних моделей для моделювання у MATLAB/Simulink на даний момент у літературі відсутня.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка методики безітераційного визначення стану ФЕМ, що відповідає точці його максимальної потужності, яка надасть можливість значно збільшити крок за часом без суттєвої втрати точності при моделюванні СЕС у MATLAB/Simulink.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення досліджень нами за базу був обраний підхід до наближеного визначення параметрів ТМП, запропонованого у [19] для п'ятипараметричної однодіодної моделі ФЕМ, заступна схема якої наведена на рис. 1.

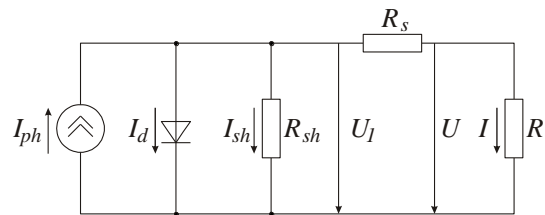


Рис. 1. Заступна схема однодіодної п'ятипараметричної моделі ФЕМ

Відповідно до даної схеми струм одного фотоелектричного перетворювача (ФЕМ), який входить у склад ФЕМ, описує вираз [19]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{U_l}{AV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{U_l}{R_{sh}}, \quad (1)$$

де I_{ph} , I_0 – фотострум носіїв заряду та зворотний струм насичення діода відповідно;
 R_{sh} – шунтуючий опір ФЕМ;
 $V_t = kT_c/q_e$ – термічний потенціал;
 $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана;
 T_c – абсолютна температура ФЕМ;
 U_l – напруга на р-п переході ФЕМ;
 A – параметр ідеальності ФЕМ.

Приймаючи, що максимальна потужність на навантаженні R_l досягається за умов максимальної потужності на послідовно з'єднаних R_l та R_s , у [19] було отримано рівняння для напруги на р-п переході U_{ln} , значення якої приймалося відповідним умовам досягнення ТМП.

$$z = W_0 \left(e^{\frac{I_{ph} + I_0}{I_0} \left[1 - \frac{2V_t A z}{R_{sh}(I_{ph} + I_0)} \right]} \right) - 1, \quad (2)$$

де $z = U_{ln} / V_t A$.

$W_0(x)$ – функція Ламберта.

Вираз (2) є трансцендентним. Застосування спрощення $R_{sh} \rightarrow \infty$ для виразу (2) дало змогу у [19] отримати явний вираз для U_{ln} :

$$U_{ln} = V_t A \left(W_0 \left(e^{\frac{I_{ph}}{I_0}} \right) - 1 \right), \quad (3)$$

Уточнення виразу (3) отримано нами у [20] шляхом розкладання виразу (2) у ряд Тейлора навколо $z_0 = 0,75 U_{oc} / (V_t A)$, що відповідає середині типового інтервалу знаходження напруги ТМП (U_{oc} – напруга холостого ходу ФЕП) [21]. З утриманням лінійного члена розкладання можна отримати:

$$z = \frac{(c_2 z_0 - 1)(x^2 - 1) - c_2 z_0 x}{(c_2 z_0 - 1)(x + 1) - c_2 x}, \quad (4)$$

де $x = W_0(-c_1 [c_2 z_0 - 1])$;

$c_1 = e I_{ph} / I_0$;

$c_2 = 2V_t A / (R_{sh} I_{ph})$.

Відповідно, використовуючи (1) можна отримати вираз для струму ФЕП, що відповідає ТМП:

$$I_n = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{U_{ln}}{AV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{U_{ln}}{R_{sh}}. \quad (5)$$

Для отримання параметрів ТМП ФЕМ необхідно у (4) та (5) приймати параметри I_0 , I_{ph} , R_{sh} усього ФЕМ, а центр розкладання виразу у ряд Тейлора приймати як $z_0 = 0,75 U_{oc} / (n_s V_t A)$, де n_s – кількість послідовно з'єднаних ФЕП у ФЕМ, а U_{oc} – напруга холостого ходу ФЕМ. Напруга ФЕМ у ТМП, відповідно до рис. 1:

$$U_n = n_s U_{ln} - I_n R_s, \quad (6)$$

де R_s – послідовний опір ФЕМ;

U_{ln} , I_n – напруга на р-п переході ФЕП та струм ФЕМ у ТМП.

Залежності параметрів п'ятипараметричної моделі ФЕМ від умов роботи (інтенсивність сонячного випромінювання G , температура ФЕМ T_c) можуть бути визначені за стандартними підходами, наприклад [20, 22, 23], через опорні параметри (позначені індексом «ref») наступним чином:

$$\frac{AV_t}{A_{ref} V_{t,ref}} = \frac{T_c}{T_{ref}}; \quad (7)$$

$$R_s = R_{s,ref} = \text{const} \quad (8)$$

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{G_{ref}}{G}; \quad (9)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph,ref} + \alpha_{I_{sc}} (T_c - T_{ref}) \right); \quad (10)$$

де $\alpha_{I_{sc}}$ – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

Зворотний струм насичення діода краще визначати за запропонованим у [23] виразом, який забезпечує більшу стійкість під час проведення розрахунків:

$$I_0 = I_{ph} / \left(\exp\left(\frac{U_{oc}}{n_s AV_t}\right) - 1 \right) \tag{11}$$

Температура фотоелектричного модуля при різних температурах навколишнього середовища T_a і різних рівнях інтенсивності сонячного випромінювання, може бути визначена з теплового балансу, який призводить до співвідношення [23]:

$$T_c = T_a + \frac{G}{G_{NOCT}} (NOCT - T_{a,NOCT}) \tag{12}$$

де $NOCT$ – номінальна температура експлуатації фотоелектричного модуля, яка також у специфікаціях виробників;

$T_{a,NOCT} = 20^\circ\text{C}$ – температура навколишнього середовища при номінальних умовах експлуатації;

$S_{NOCT} = 800 \text{ Вт/м}^2$ – інтенсивність сонячного випромінювання при номінальних умовах експлуатації.

Напряг холостого ходу може бути отримана з (1) при $I = 0$ [20]:

$$U_{oc} = I_{ph} R_{sh} - n_s AV_t W_0 \left(\frac{I_0 R_{sh}}{n_s AV_t} \exp\left(\frac{I_{ph} R_{sh}}{n_s AV_t}\right) \right) \tag{13}$$

Опорні параметри зазвичай визначаються з каталогів виробників ФЕМ, наприклад, за методикою, що наведена у [22]. Однак у елементі «PV Array» містяться дані щодо параметрів однодіодної заступної схеми, відповідно вони і були використані під час моделювання.

Перевірка коректності отриманої моделі та можливості її застосування у MATLAB/Simulink була проведена шляхом моделювання роботи ФЕМ, представленого елементом «PV Array», що навантажений керованим джерелом ЕРС «Controlled Voltage Source» (рис. 2). Керування напругою джерела (значення напруги ФЕМ у ТМП U_n) проводилося відповідно до моделі (4) – (13) блоком функції користувача «PV_Lambert_model» типу S-Function для можливості використання функції Ламберта, що є стандартною функцією MATLAB, однак не входить у набір функцій Simulink. Також на виході блоку поверталось розрахункове значення струму ФЕМ у ТМП I_n .

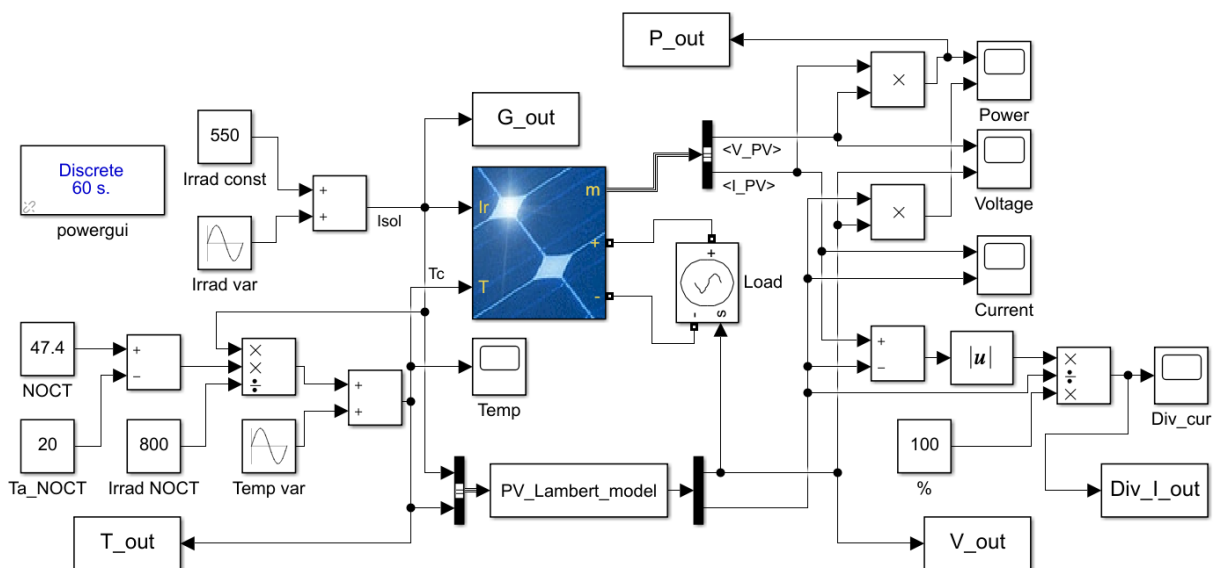


Рис. 2. Модель MATLAB/Simulink для визначення параметрів ФЕМ у ТМП

У якості моделі ФЕМ з бази елемента «PV Array» був обраний полікристалічний модуль 1Soltech 1STH-215-P номінальною потужністю 215 Вт, де наведені параметри заступної схеми. Параметри номінальних умовах експлуатації даного ФЕМ ($NOCT = 47,4^\circ\text{C}$) узяті в базі даних SolarHub [25].

Моделювання змінних зовнішніх умов (навколишньої температури та інтенсивності сонячного

випромінювання) проводилося шляхом використання суми постійної та гармонійної складової, а саме приймалося:

$$T_a = 20 + 15 \sin(10^{-4}t), \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$G = 550 + 450 \sin(5 \cdot 10^{-4}t + 1,5), \text{ Вт/м}^2,$$

де час t приймався у секундах, а фаза тригонометричних функцій – у радіанах.

На рис. 3. наведено абсолютне значення відносної різниці розрахункового струму I_n і струму елемента «PV Array» за напруги U_n . Як видно з рис. 3, відносна похибка визначення струму, що розрахований за моделлю (4) – (13), відповідно до значення струму, що розраховується за алгоритмом Simulink, лежить у межах 0,4 % – 1,6 %, що є цілком прийнятною точністю відтворення ВАХ ФЕМ у ТМП.

Для оцінки точності визначення параметрів ТМП (напруга та потужність) з використанням моделі (4) – (13), було проведено аналогічне моделювання з використанням ітераційного пошуку ТМП за методом «Збурення та спостереження» (“Perturb and Observe”) [10,15] на базі аналогічного ФЕМ та принципу створення навантаження. Внаслідок малого кроку за часом $5 \cdot 10^{-5}$ с, що відповідає стійкості розрахункового алгоритму елементів моделі, тривалість моделювання становила 30 с, однак фазові швидкості гармонійних складових температури зовнішнього середовища та інтенсивності сонячного випромінювання були збільшені, відповідно, у 10^3 разів, тому і інсоляція, і коливання температури ФЕМ у обох моделюваннях були відповідними. Час моделювання за моделлю (4) – (13) становив $30 \cdot 10^3$ с.

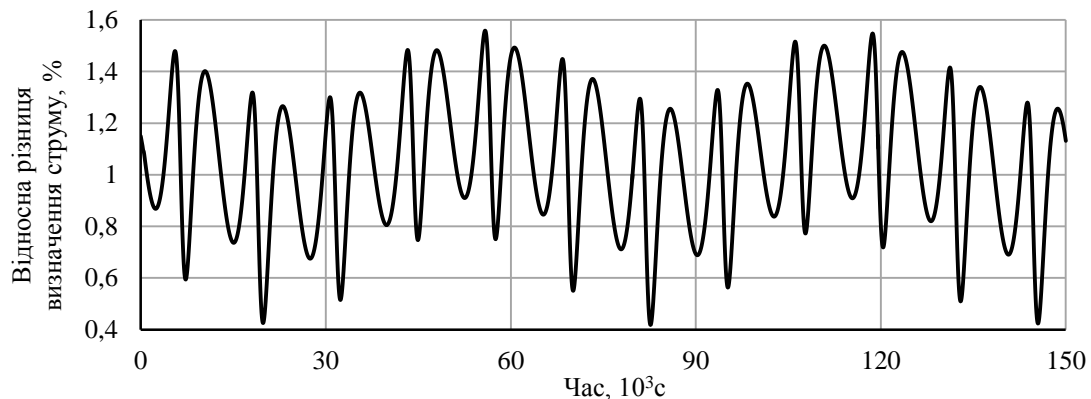


Рис. 3. Відносна різниця струму елемента «PV Array» та струму, що розрахований за моделлю (4) – (13)

Результати моделювання параметрів ТМП, разом із значеннями інсоляції та температури ФЕМ наведені на рис. 4.

Вихідна потужність модуля у ТМП P_n виявилася практично ідентичною у обох моделюваннях. Незначні відхилення спостерігалися при визначенні напруги ФЕМ у ТМП U_n . Підпис «P&O» відповідає ітераційному пошуку ТМП, підпис «Lambert» відповідає розрахунку за моделлю (4) – (13).

У деяких контрольних точках був проведений розрахунок параметрів ТМП ітераційним пошуком з відповідними постійними температурою ФЕМ та інтенсивністю сонячного випромінювання. Ітерації проводилися до виходу електричних параметрів ФЕМ на стаціонарні значення. Отримані результати можуть вважатися «точними», так як на їх обчислення не впливали динамічні чинники. Вони наведені на рис. 4 на графіках напруги і потужності на маркерами «x».

У контрольних точках максимальна похибка, що дає безітераційна модель (4) – (13), сягає 0,44 В та 2,25 Вт (1,77% та 3,95%) для напруги та потужності у ТМП відповідно. Більші відхилення моделі (4) – (13) від точних значень напруги ТМП відповідають більшим температурам ФЕМ. Відповідно такі відхилення можуть бути зменшені уточненням температурних залежностей моделі.

Більш принциповим для моделювання є відхилення потужності у ТМП. Розподіл відносного відхилення потужності у ТМП за моделлю (4) – (13) від потужності у ТМП ФЕМ наведено на рис. 5.

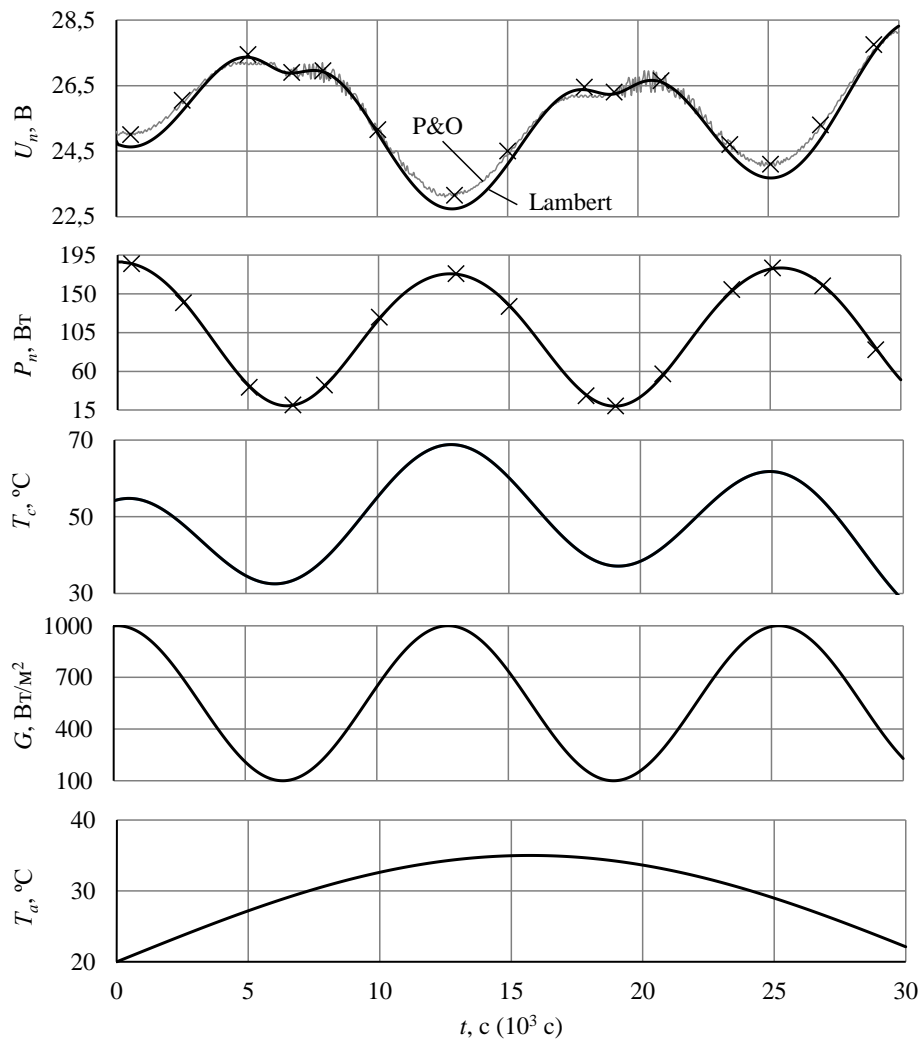


Рис. 4. Результати моделювання роботи ФЕМ при змінних інтенсивності сонячного випромінювання (G) та температурі навколишнього середовища (T_a). Позначення «Lambert» – розраховано за запропонованим безітераційним методом (час t у 10^3 с), позначення «P&O» – розраховано за ітераційним методом «Збурення та спостереження» (час t у секундах). Маркери «x» – точні значення

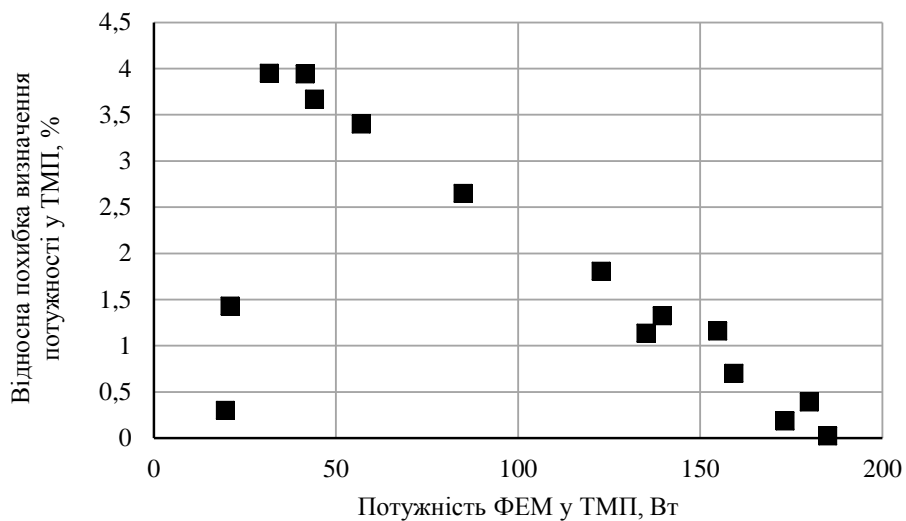


Рис. 5. Розподіл відносного відхилення визначення потужності у ТМП ФЕМ за моделлю (4) – (13) від його абсолютного значення

З рис. 5 видно, що в області 50% генерації номінальної потужності ФЕМ (більше 100 Вт) похибка визначення P_n не перевищує 2,5 %, що є цілком прийнятним для проведення імітаційного моделювання роботи СЕС.

Запропонована модель (4) – (13) добре відтворює як ВАХ ФЕМ у ТМП, так і потужність модуля, тому вона може застосовуватися без спирання на елемент «PV Array», тобто працювати самостійно. Останнє знімає будь-які обмеження кроку за часом під час розрахунку генерації ФЕМ у ТМП і визначає можливість використання моделі для імітаційного моделювання тривалої роботи СЕС.

Висновки

1. Реалізація запропонованої безітераційної методики визначення стану фотоелектричного модуля у точці максимальної потужності у середовищі MATLAB/Simulink показала достатню точність відтворення параметрів модуля за різних умов у навколишньому середовищі.

2. Запропонована модель може працювати самостійно без спирання на елемент «PV Array».

3. Запропонована модель не обмежує крок за часом при розрахунку генерації фотоелектричного модуля у точці максимальної потужності і тому може бути застосована для імітаційного моделювання тривалої роботи сонячних електричних станцій.

Список використаної літератури

- Hyder F. Solar PV tree design: A review / F. Hyder, K. Sudhakar, R. Mamat // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V.82. – P. 1079-1096.
- Babu C. The role of thermoelectric generators in the hybrid PV/T systems: A review / C. Babu, P. Ponnambalam // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V.151. – P. 368–385.
- W.M. Pabasara U. Wijeratne. Design and development of distributed solar PV systems: Do the current tools work? / W.M. Pabasara U. Wijeratne, R.J. Yang, E. Too, R. Wakefield // *Sustainable Cities and Society*. – 2019. – V.45. – P. 553-578.
- Koronaki I.P. Experimental and theoretical performance investigation of asymmetric photovoltaic/thermal hybrid solar collectors connected in series / I.P. Koronaki, M.T. Nitsas // *Renewable Energy*. – 2018. – V.118. – P. 654-672.
- Pillai D.S. Metaheuristic algorithms for PV parameter identification: A comprehensive review with an application to threshold setting for fault detection in PV systems / D.S. Pillai, N. Rajasekar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V.82. – P. 3503-3525.
- Reddy G.S. A MATLAB based PV Module Models analysis under Conditions of Nonuniform Irradiance / G.S. Reddy, T.B. Reddy, M.V. Kumar // *Energy Procedia*. – 2017. – V.117. – P. 974 – 983.
- Koutroulis E. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms / E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis // *Solar Energy*. – 2006. – V.80. – P. 1072–1088.
- 8.Savitha P.B. Modelling of Photovoltaic Cell/Module under Environmental Disturbances using MATLAB/Simulink / P.B. Savitha, M.S. Shashikala, K.L. Puttabuddhi // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. – 2014. – V.9(1). – P. 48-55.
- Gonzalez A. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic–wind–biomass power system / A. Gonzalez, J.-R. Riba, A. Rius // *Sustainability*. – 2015. – V.7. – P. 12787-12806.
- Lasheen M. Maximum power point tracking using Hill Climbing and ANFIS techniques for PV applications: A review and a novel hybrid approach / M. Lasheen, M. Abdel-Salam // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – V.171. – P. 1002-1019.
- Hossain M.D. Modeling of Solar Photovoltaic System Using MATLAB/Simulink / M.D. Hossain, N.K. Roy, M.O. Ali // *Proceedings of 19th International Conference on Computer and Information Technology*. – December 18-20, 2016. – North South University, Dhaka, Bangladesh. – 2016. – P. 128 – 133.
- Krismadinata. Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab / Krismadinata, N.Abd. Rahim, H.W. Ping, J. Selvaraj // *Procedia Environmental Sciences*. – 2013. – V.17. – P. 537-546.
- Aidoud M. Development of photovoltaic cell models using fundamental modeling approaches / M. Aidoud, C.-E. Feraga, M. Bechouat, M. Sedraoui, S. Kahla // *Energy Procedia*. – 2019. – V.162. – P. 263-274.
- Fekkek B. Control of transformerless grid-connected PV system using average models of power electronics converters with MATLAB/Simulink / B. Fekkek, M. Menaa, B. Boussahoua // *Solar Energy*. – 2018. – V.173. – P. 804-813.
- Alik R. An enhanced P&O checking algorithm MPPT for high tracking efficiency of partially shaded PV module / R. Alik, A. Jusoh // *Solar Energy*. – 2018. – V.163. – P. 570-580.
- Pourmousa N. Parameter estimation of photovoltaic cells using improved Lozi map based chaotic optimization Algorithm / N. Pourmousa, S. M. Ebrahimi, M. Malekzadeh, M. Alizadeh // *Solar Energy*. – 2019. – V.180. – P. 180-191.
- Batzelis E.I. Direct MPP Calculation in Terms of the Single-Diode PV Model Parameters / E.I. Batzelis, G.E. Kampitsis, S.A. Papathanassiou, S.N. Manias // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. –

2015. – V.30(1). – P. 226-236.
18. Wang S.-n. An improved analytical solution for MPP parameters of photovoltaic cells / S.-n. Wang, Q.-g. Chen, W.-g. Gao // *Solar Energy*. – 2018. – V.174. – P. 848-854.
 19. Analytical determination of the photovoltaic module maximum power point parameters based on the manufacturer's datasheet / Ye.A. Baganov, V.V. Kurak, E.V. Andronova, V.O. Gramov. – Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – №4(59). – С. 185 – 194.
 20. Баганов Є.О. Аналітична залежність параметрів точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача від умов його експлуатації на основі п'ятипараметричної схеми заміщення / Є.О. Баганов, І.Ф. Погребняк // *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, 29 – 31 травня 2018 р., Херсон, Україна / Херсонська державна морська академія – Херсон, 2018. – С. 266 – 270.*
 21. ESRAM T. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques/ T. ESRAM, P.L. CHAPMAN // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2007. – V.22(2). – P. 439 – 449.
 22. De Soto W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance/ W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman // *Solar Energy*. –2006. – V.80. – P. 78 – 88.
 23. Villalva M.G. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays / M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R. Filho // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2009. – V.24(5). – P. 1198 – 1208.
 24. Trazouei S.L. Optimal Design of a Hybrid Solar-Wind-Diesel Power System for Rural Electrification Using Imperialist Competitive Algorithm / S.L. Trazouei, F.L. Tarazouei, M. Ghiamy // *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2013. – V.2. – P. 403-411.
 25. SolarHub. PV Module 1STH-215-P Details [Electronic Source] – URL: <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/5623-1STH-215-P-1Soltech> (last access: 19.05.2019).

References

1. Hyder F., Sudhakar K., Mamat R. Solar PV tree design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, V.82, pp. 1079-1096. doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.025.
2. Babu C., Ponnambalam P. The role of thermoelectric generators in the hybrid PV/T systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 2017, V.151, pp. 368–385. doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.060.
3. W.M. Pabasara U. Wijeratne, Yang R.J., Too E., Wakefield R. Design and development of distributed solar PV systems: Do the current tools work? *Sustainable Cities and Society*, 2019, V.45, pp. 553-578. doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.035 .
4. Koronaki I.P., Nitsas M.T. Experimental and theoretical performance investigation of asymmetric photovoltaic/thermal hybrid solar collectors connected in series. *Renewable Energy*, 2018, V.118, pp. 654-672. doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.049.
5. Pillai D.S., Rajasekar N. Metaheuristic algorithms for PV parameter identification: A comprehensive review with an application to threshold setting for fault detection in PV systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, V.82, pp. 3503-3525. doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.107.
6. Reddy G.S., Reddy T.B., Kumar M.V. A MATLAB based PV Module Models analysis under Conditions of Nonuniform Irradiance. *Energy Procedia*, 2017, V.117, pp. 974 – 983. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.218.
7. Koutroulis E., Kolokotsa D., Potirakis A., Kalaitzakis K. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. *Solar Energy*, 2006, V.80, pp. 1072–1088. doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.002.
8. Savitha P.B., Shashikala M.S., Puttabuddhi K.L. Modelling of Photovoltaic Cell/Module under Environmental Disturbances using MATLAB/Simulink. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2014, V.9(1), pp. 48-55. doi.org/10.14445/22315381/ijett-v9p210.
9. Gonzalez A., Riba J.-R., Rius A. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic–wind–biomass power system. *Sustainability*, 2015, V.7(9), pp. 12787-12806. doi.org/10.3390/su70912787.
10. Lasheen M., Abdel-Salam M. Maximum power point tracking using Hill Climbing and ANFIS techniques for PV applications: A review and a novel hybrid approach. *Energy Conversion and Management*, 2018, V.171, pp. 1002-1019. doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.003.
11. Hossain M.D., Roy N.K., Ali M.O. Modeling of Solar Photovoltaic System Using MATLAB/Simulink. *Proceedings of 19th International Conference on Computer and Information Technology*. North South University, Dhaka, Bangladesh, 2016, pp. 128 – 133. doi.org/10.1109/iccitechn.2016.7860182.
12. Krismadinata, Rahim N.Abd., Ping H.W., Selvaraj J. Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, V.17, pp. 537-546. doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069.

13. Aidoud M., Feraga C.-E., Bechouat M., Sedraoui M., Kahla S. Development of photovoltaic cell models using fundamental modeling approaches. *Energy Procedia*, 2019, V.162, pp. 263-274. doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.028.
14. Fekkak B., Mena M., Boussahoua B. Control of transformerless grid-connected PV system using average models of power electronics converters with MATLAB/Simulink. *Solar Energy*, 2018, V.173, pp. 804-813. doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.012.
15. Alik R., Jusoh A. An enhanced P&O checking algorithm MPPT for high tracking efficiency of partially shaded PV module. *Solar Energy*, 2018, V.163, pp. 570-580. doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.050.
16. Pourmousa N., Ebrahimi S. M., Malekzadeh M., Alizadeh M. Parameter estimation of photovoltaic cells using improved Lozi map based chaotic optimization Algorithm. *Solar Energy*, 2019, V.180, pp. 180-191. doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.026.
17. Batzelis E.I., Kampitsis G.E., Papathanassiou S.A., Manias S.N. Direct MPP Calculation in Terms of the Single-Diode PV Model Parameters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, V.30(1), pp. 226-236. doi.org/10.1109/tec.2014.2356017.
18. Wang S.-n., Chen Q.-g., Gao W.-g. An improved analytical solution for MPP parameters of photovoltaic cells. *Solar Energy*, 2018, V.174, pp. 848-854. doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.070.
19. Baganov Ye.A., Kurak V.V., Andronova E.V., Gramov V.O. Analytical determination of the photovoltaic module maximum power point parameters based on the manufacturer's datasheet. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 2016. – no. 4(59). – pp. 185 – 194.
20. Baganov Ye.A., Pogrebnyak I.F. Analytical dependence of the parameters of the maximum power point of the photoelectric converter on the conditions of its operation on the basis of five-parameter substitution scheme. *Anotatsii dopovidei 10th Mizhnarodnoyi nauk.-prakt. konf. «Suchasni informatsiyi ta innovatsiyi tekhnolohiyi na transporti» [Abstractsof the X Int. sci.-pract. conf. «Modern information and innovative technologies in transport»]. Kherson, 2018, pp. 266 – 270.*
21. ESRAM T., Chapman P.L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, V.22(2), pp. 439 – 449. doi.org/10.1109/tec.2006.874230.
22. De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 2006, V.80, pp. 78 – 88. doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010.
23. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, V.24(5), pp. 1198 – 1208. doi.org/10.1109/tpel.2009.2013862.
24. Trazouei S.L., Tarazouei F.L., Ghiamy M. Optimal Design of a Hybrid Solar-Wind-Diesel Power System for Rural Electrification Using Imperialist Competitive Algorithm. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2013, V.2, no.2, pp. 403-411.
25. SolarHub. PV Module 1STH-215-P Details Retrieved from <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/5623-1STH-215-P-1Soltech> (last access: 19.05.2019) (eng).