

СПРОЩЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Отримано 04 трав. 2025 р.; рекомендовано до публікації 27 черв. 2025 р.
Доступно онлайн 30 черв. 2025 р.

Кузнєцов М. М.

Автор для кореспонденції: Кузнєцов Микола,
e-mail: renewable@ukr.net

канд. техн. наук

<https://orcid.org/0000-0002-0286-5652>

Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, Київ, Україна

Анотація. Метою роботи є аналіз можливостей спрощення моделей фотоелектричного модуля для задач генерації електроенергії, зокрема спосіб визначення невідомих параметрів моделі, а також видалення з моделі відомих параметрів. Оскільки фотоелектричні станції являють собою об'єкти з великою кількістю окремих фотоелектричних модулів, то для прогнозу роботи станції з використанням існуючих моделей потрібні істотні обчислювальні потужності. Альтернативою є використання спрощених моделей з неістотною втратою точності результатів моделювання. У роботі пропонується використовувати річну генерацію електроенергії фотоелектричним модулем як критерій ефективності моделі, оцінюючи вплив кожного спрощення на зміну прогнозу генерації. Проведено оцінку впливу низки параметрів найрозповсюдженішої моделі фотоелектричного модуля, зокрема коефіцієнта ідеальності напівпровідника, еквівалентного паралельного опору та пов'язаних з температурою коефіцієнтів. Як висновок приводиться доцільність вибору коефіцієнта ідеальності в типовому значенні, неістотність впливу температури та помірний вплив паралельного еквівалентного опору на прогнозовану річну генерацію електроенергії. Бібл. 12.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, фотоелектричний модуль, електрична модель, прогноз генерації електроенергії.

PHOTOVOLTAIC MODULE ELECTRICAL MODELS SIMPLIFICATION FOR POWER GENERATION FORECASTING TASKS

Received May 04, 2025; accepted Jun. 27, 2025
Available online Jun. 30, 2025

Kuznietsov M.

Author for correspondence: Mykola Kuznietsov,
e-mail: renewable@ukr.net

Ph.D.

<https://orcid.org/0000-0002-0286-5652>

Institute of renewable energy, NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

Abstract. The aim of the study is to analyze the possibilities of simplifying PV module models for power generation purposes, in particular, the method of selecting the values of unknown model parameters, as well as the exclusion of known parameters from the model. Since photovoltaic power plant is the object with a large number of individual photovoltaic modules, significant computing power is required to predict the operation of the plant using existing models. As the alternative solution is to use simplified models with the appropriate loss of accuracy of the modeling results. In this paper, it is proposed to use the annual electricity generation by a photovoltaic module as a criterion for model efficiency, evaluating the impact of each model simplification on the obtained result. The influence of some number of parameters of the most commonly used model, in particular, the semiconductor ideality coefficient, the equivalent parallel resistance, and temperature-related coefficients, is evaluated. As a conclusion, the expediency of choosing the ideality coefficient in a typical value, the insignificance of the temperature effect, and the moderate influence of the parallel equivalent resistance on the predicted annual electricity generation are given. Bibliography 12.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic module, electrical model, forecast of electricity generation.

Використані позначення та скорочення

ФЕМ – фотоелектричний модуль

ВАХ – вольт-амперна характеристика

MPP – max power point, точка найбільшої потужності на вихідній характеристиці ФЕМ

Вступ

Різноманіття задач як електроніки так і енергетики вимагає використання достатньо простих, проте ефективних моделей фотоелектричних модулів (ФЕМ). При цьому залежно від застосування сама модель матиме різну ефективність. Серед задач, що вимагають створення різних моделей ФЕМ, – розробка нових Max Power Point Tracking; опрацювання алгоритмів і методів керування великими полями ФЕМ; аналіз роботи ФЕМ в екстремальних температурних умовах тощо. Щодо задач моделювання сонячних станцій – установок з великою кількістю ФЕМ, розподілених по великій площі – складність моделі може стати перешкодою через велику кількість обчислень, навіть з огляду на сучасні досягнення комп'ютерної техніки. Тому доцільним вважається наявність методу спрощення моделі ФЕМ у такий спосіб, який дозволить зберегти істотні характеристики і знехтувати неістотними при мінімальній складності моделі. Після спрощення таку модель можна використовувати для комп'ютерного моделювання комбінації великої кількості фотоелектричних модулів.

Загальний підхід до моделювання електричних характеристик ФЕМ передбачає наявність трьох головних елементів: джерела фотоелектричного струму I_{PV} , зворотного струму діода напівпровідника D_1 , еквівалентних паралельного R_{sh} та послідовного R_s омичних опорів ФЕМ (рис. 1). Параметри елементів моделі розраховуються з технічних характеристик модельованого ФЕМ, що зазвичай наводяться виробником [1–11]. Для точнішого відтворення електричних характеристик моделей ускладнюють,

збільшуючи кількість діодів до 2-3 [1, 5], визначенням паралельного опору R_{sh} (ним часто нехтують), а також урахуванням більшої кількості окремих чарунок в фотоелектричному модулі [4, 9]. Розрахунок характеристик кожного з елементів моделі також має свої варіації, виходячи з особливостей урахування неідеальності р-п-переходу напівпровідника, температурних коефіцієнтів та їх залежності від сонячної радіації [1–3, 5], паралельно-послідовного з'єднання окремих чарунок у фотоелектричному модулі [4, 9]. Загалом для розглянутої моделі з її варіаціями слід відзначити такі особливості:

- Неврахування інертності характеристик; змінна часу не входить до жодної зі знайдених проаналізованих моделей. Це вбачається доцільним, оскільки швидкість зміни зовнішніх впливів – освітленості, температури, обдування вітром – значно повільніші за можливі постійні часу реактивних складових моделі. Водночас таке спрощення може виявитись некоректним при розробці електронних приладів, до яких підключається ФЕМ (трекери MPP).

- Намагання «підігнати» модель під реальну вольт-амперну характеристику (ВАХ) модельованого ФЕМ такими способами: 1) додавання різної кількості напівпровідникових діодів – що більше їх, то точніше відтворення перегину у ВАХ; 2) підбір коефіцієнта ідеальності напівпровідника або інших коефіцієнтів, для точного позиціонування точки максимальної потужності (MPP); 3) підстановка температурних коефіцієнтів для точнішого відтворення ФЕМ за високих чи низьких температур.

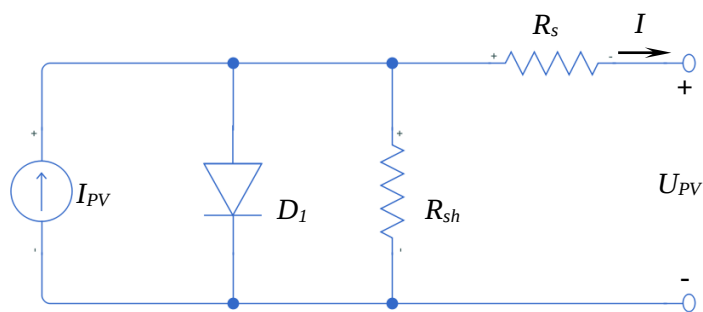


Рис. 1. Типова електрична модель фотоелектричного модуля

Fig. 1. Common photovoltaic module electric model

Для задач моделювання поля фотоелектричних модулів, коли кількість ФЕМ доходить до декількох десятків, зазвичай вибір моделі одиночного ФЕМ обмежується моделлю, зображеною на рис. 1 [6, 8, 10], або взагалі все поле розглядається як єдиний фотоелектричний модуль, з пропорційним перерахунком значень струмів і опорів до кількості й способу об'єднання ФЕМ [7, 11].

Завдання дослідження. Загалом існує встановлений підхід до моделювання одиночного ФЕМ, з різною

складністю і набором параметрів. Виклик становить саме розрахунок набору з великої кількості ФЕМ в єдиній системі, зокрема для оцінок роботи наземних фотоелектричних станцій. Під час огляду літератури автору не вдалось знайти підхід до такого випадку – зазвичай береться або максимально спрощена модель без аргументації вибору, або в параметри моделі одиночного модуля додаються множники відповідно до кількості ФЕМ. Для вибору найефективнішої й водночас математично найпростішої моделі пропонується для

одиночного ФЕМ виконувати симуляції цільового показника розрахунку (для цієї роботи – сумарна генерація електроенергії за період часу) з ітераційною зміною параметрів моделі задля оцінки чутливості до конкретного параметра. Аналітичний розрахунок чутливості вбачається складнішим через велику кількість нелінійностей. Як наслідок, можна спростити модель для подальшого використання.

Основні матеріали дослідження

Вибір моделі дослідження

Для цього дослідження типова модель (див. рис. 1) перенесена у середовище Mathlab Simulink відповідно до [5], розділу «2.1. Single Diode Model (SDM): Parameters Estimation» та «Chapter 2.1.1. Parameter Estimation of SDM—Analytical Method #01» (рис. 2).

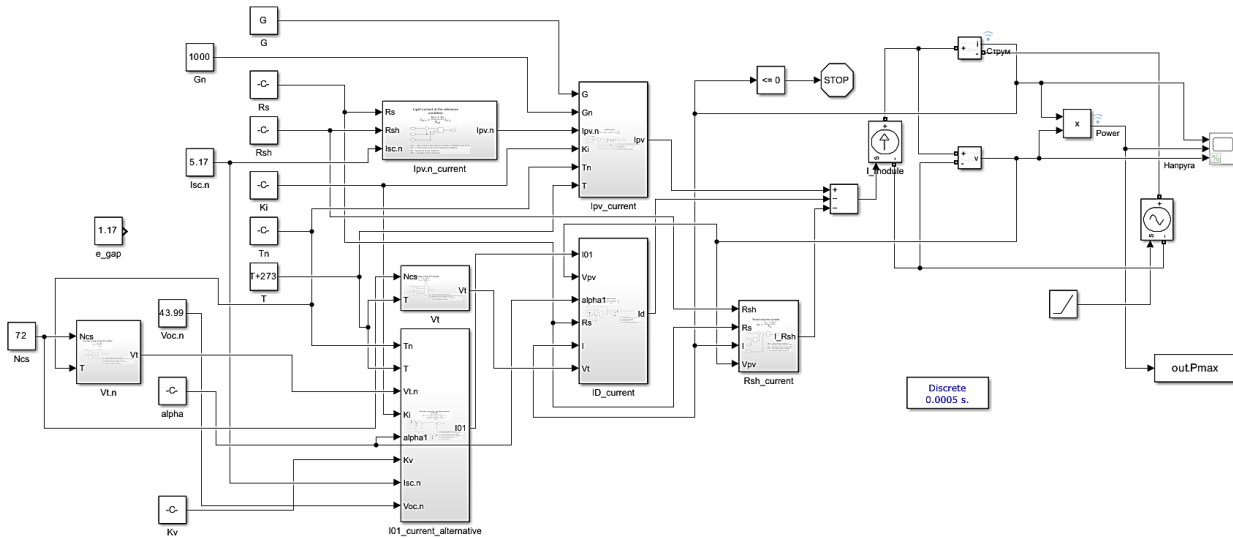


Рис. 2. Модель Simulink

Fig. 2. Simulink model

Як змінні в моделі використовуються такі параметри:
 G – сонячна радіація на поверхні фотоелектричного модуля ($\text{Вт}/\text{м}^2$);
 G_n – сонячна радіація на поверхні фотоелектричного модуля за нормальних умов ($1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$);
 R_s – еквівалентний послідовний опір фотоелектричного модуля (Ω);
 R_{sh} – еквівалентний паралельний опір фотоелектричного модуля (Ω);
 T – температура навколишнього середовища (K);
 T_n – нормальна температура навколишнього середовища ($298,15 \text{ K}$);
 $I_{sc.n}$ – струм короткого замикання фотоелектричного модуля за нормальних умов (A);
 K_i – температурний коефіцієнт струму короткого замикання фотоелектричного модуля (A/K);
 K_v – температурний коефіцієнт напруги холостого ходу фотоелектричного модуля (V/K);
 N_{cs} – кількість послідовно з'єднаних чарунок – складових частин фотоелектричного модуля;
 $V_{oc.n}$ – напруга холостого ходу фотоелектричного модуля за нормальних умов (V);
 α_1 – коефіцієнт ідеальності одиночного напівпровідникового діоду;
 e_{gap} – ширина забороненої зони p-n-переходу (1.17 eV для кремнію).

Верифікація моделі, зображеної на рис. 2, проводилась порівнянням з існуючою в Simulink моделлю «PV Array», з однаковим набором вхідних параметрів, що відповідають

ФЕМ A10Green Technology A10J-S72-175 номінальною потужністю 175 Вт. Якщо порівнювати BAX моделі, зображеної на рис. 2, та «PV Array», відмінності виявляються переважно в разі істотного відхилення від номінальних умов температури та сонячної радіації (рис. 3).

Методика спрощення моделі

Для спрощення моделі одиночного модуля пропонується оцінювати середньорічний виробіток електроенергії одного ФЕМ за різної комбінації параметрів моделі з подальшим висновком про значущість і вплив того чи того параметра. Аналіз проводили на кліматичних даних, отриманих з [12]: погодинні значення надходження прямої сонячної радіації на горизонтальну поверхню й температура повітря для географічних координат м. Києва за 2019 рік. Для спрощення обчислень кліматичні дані попередньо приведені до середніх за місяць значень тривалості світлового дня і сумарної тривалості світлового дня за місяць. Далі відповідно до температури й сонячної радіації розраховували максимальну потужність модуля (точка MPP). Отримане значення помножували на тривалість світлового дня. Параметр моделі, до якого досліджувалася чутливість, – коефіцієнт ідеальності одиночного діоду α_1 . Цей параметр на практиці використовується для точного позиціонування точки MPP на вихідній характеристиці ФЕМ, що не вбачається важливим для аналізу виробітку електроенергії. Значення α_1 вибирали з діапазону, близького до рекомендованого в роботі [5], а саме $1 \dots 1.5$. Результат наведено в табл. 1.

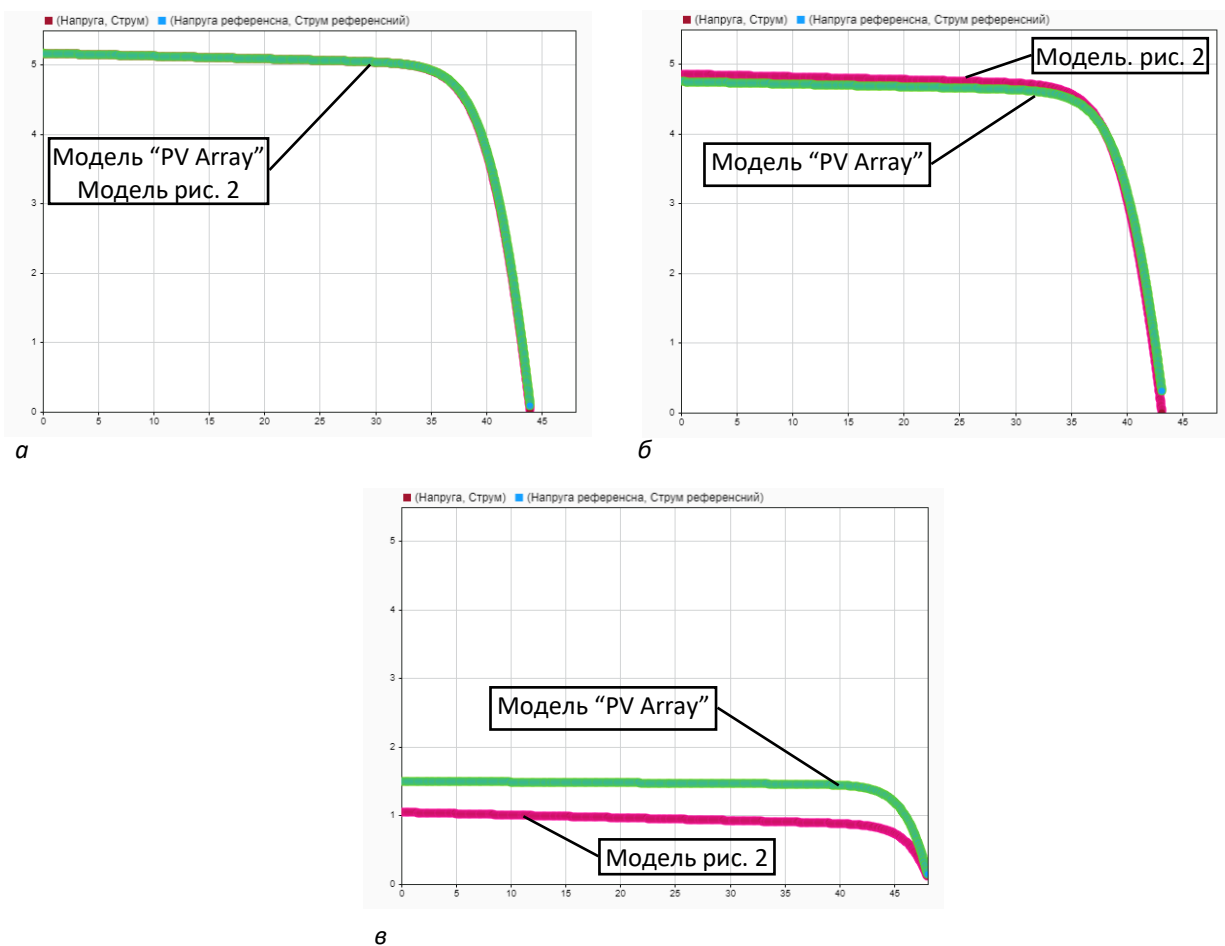


Рис. 3. Порівняння моделі з рис. 2 та існуючої моделі Simulink «PV Array» за різних умов: а – нормальні умови $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; б – 25 червня 2019 року (найбільш сонячний день) $G = 918 \text{ Вт/м}^2$, $T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$; в – 25 січня 2019 року (найхолодніший день) $G = 295 \text{ Вт/м}^2$, $T = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ [12]

Fig. 3. Comparison between model fig. 2 and Simulink model «PV array» for the following conditions: а – normal conditions $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; б (b) June 25 2019 (the sunniest) $G = 918 \text{ W/m}^2$, $T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$; в (e) January 25 2019 (the coldest) $G = 295 \text{ W/m}^2$, $T = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ [12]

Таблиця 1. Вплив параметра $\alpha 1$

Table 1. $\alpha 1$ parameter impact

			$\alpha 1$	0.98852 рефе- ренсне	0.8	1	1.2	1.4	1.6
Місяць	Світлий час добы, г	Середня темпера- тура, $^\circ\text{C}$	Середня сонячна радіація, Вт/м^2	Місячна генерація, кВт·г					
Січень	302	-7	107	2.90	2.96	2.90	2.83	2.76	2.68
Лютий	304	-2	182	6.77	6.98	6.76	6.53	6.32	6.10
Березень	395	5	236	12.88	13.32	12.85	12.40	11.97	11.56
Квітень	439	11	310	20.54	21.27	20.50	19.77	19.07	18.41
Травень	496	18	328	25.54	26.49	25.49	24.54	23.64	22.78
Червень	536	24	382	33.45	34.72	33.38	32.12	30.93	29.79
Липень	518	22	393	33.10	34.32	33.03	31.82	30.67	29.58
Серпень	479	23	380	29.66	30.77	29.59	28.48	27.43	26.44
Вересень	408	18	306	19.41	20.13	19.36	18.64	17.94	17.28
Жовтень	362	13	232	12.17	12.62	12.14	11.68	11.24	10.82

			<i>*alpha1</i>	0.98852 рефе- ренсне	0.8	1	1.2	1.4	1.6
Місяць	Світлий час добы, г	Середня темпера- тура, °C	Середня сонячна радіація, Вт/м ²	Місячна генерація, кВт·г					
Листопад	300	5	135	4.79	4.95	4.78	4.61	4.45	4.29
Грудень	269	2	87	2.12	2.16	2.11	2.06	2.01	1.95
Річна генерація, кВт·г				203.32	210.69	202.89	195.49	188.44	181.69
Відсоток відносно моделі з параметром $\alpha1 = 0.98852$				100.0 %	103.6 %	99.8 %	96.1 %	92.7 %	89.4 %

**Коефіцієнт ідеальності діода $\alpha1 = 0.9885$ – значення для моделі ФЕМ A10Green Technology A10J-S72-175*

Як видно з табл. 1, зміна виробітку фотоелектричного модуля для різних значень $\alpha1$ не перевищує 12 %, тоді як точність прогнозу кліматичних даних на добу наперед рідко перевищує 10 %. Тобто можна зробити висновок, що якщо значення коефіцієнта ідеальності діода невідоме, його можна брати $\alpha1 = 1.3$, відповідно до джерела [2], неістотно втрачаючи в точності оцінки генерації.

Аналогічним способом проведено оцінку доцільності виключення з моделі, зображеної на рис. 2, коефіцієнтів напруги холостого ходу K_v , струму короткого замикання

K_i , температури навколишнього середовища T й еквівалентного паралельного опору R_{sh} . За структурою моделі з рис. 2, щоб прибрати вплив коефіцієнтів K_i та K_v , достатньо прирівняти їх до нуля. Водночас це не прибирає залежність інших параметрів моделі від температури. Щоби повністю виключити вплив температури, додатково потрібно прирівняти T до T_n , тобто до 298,15 K (25 °C). Вплив паралельного еквівалентного опору нівелюється прирівнюванням його до нескінченності (для моделі з рис. 2 – видаленням одного блока та відповідною зміною іншого блока). Результати оцінки для ФЕМ A10Green Technology A10J-S72-175 зведені у табл. 2.

Таблиця 2. Вплив параметрів R_{sh} , K_i , K_v , T

Table 2. R_{sh} , K_i , K_v , T parameters impact

				Модель з рис. 2 без спрощень	$R_{sh} = \infty$	$K_i = 0$	$K_v = 0$	$K_i = 0,$ $K_v = 0,$ $T = 25C$	$R_{sh} = \infty,$ $K_i = 0,$ $K_v = 0,$ $T = 25C$
Місяць	Світ- лий час добы, г	Середня темпера- тура, °C	Середня сонячна радіація, Вт/м ²	Місячна генерація, кВт·г					
Січень	302	-7	107	2.90	4.80	4.57	2.49	4.05	5.42
Лютий	304	-2	182	6.77	8.70	9.15	5.60	8.07	9.53
Березень	395	5	236	12.88	15.30	15.87	10.96	14.30	16.23
Квітень	439	11	310	20.54	23.11	23.39	18.28	21.68	23.87
Травень	496	18	328	25.54	28.25	27.24	23.97	26.13	28.61
Червень	536	24	382	33.45	36.19	33.72	33.16	33.51	36.22
Липень	518	22	393	33.10	35.84	34.14	32.05	33.40	36.02
Серпень	479	23	380	29.66	32.14	30.19	29.10	29.80	32.22
Вересень	408	18	306	19.41	21.63	20.71	18.22	19.87	21.90
Жовтень	362	13	232	12.17	14.21	13.67	11.01	12.80	14.57
Листопад	300	5	135	4.79	6.53	6.02	4.19	5.49	6.88
Грудень	269	2	87	2.12	3.65	2.94	1.91	2.71	3.90
Річна генерація, кВт·г				203.32	230.36	221.63	190.94	211.81	235.37
Відсоток відносно моделі з рис. 2 без спрощень				100.0 %	113.3 %	109.0 %	93.9 %	104.2 %	115.8 %

На основі даних, наведених у табл. 2, можна зробити висновок, що вплив температурних коефіцієнтів холостого ходу та короткого замикання, як і повне виключення впливу температури, приводять до відхилення розрахунку виробітку електроенергії менше 10 %, що демонструє раціональність такого спрощення, причому через

протилежний вплив температурних коефіцієнтів напруги й струму, повне виключення температурної чутливості моделі приводить до меншої похибки оцінки генерації, ніж виключення лише одного з коефіцієнтів. Вплив еквівалентного паралельного опору більш істотний, і виключати його з моделі потрібно з обережністю.

Висновки

Як результат можна зазначити, що доцільно вибирати модель фотоелектричного модуля відповідно до задач моделювання. Для прогнозування генерації фотоелектричних станцій з великою кількістю ФЕМ як критерій ефективності моделі одиничного модуля доцільно використовувати оцінку річної генерації електроенергії. Запропонований у роботі метод спрощення дозволяє визначати невідомі параметри та видалити існуючі – для зменшення складності моделі. Зокрема, аналіз впливу коефіцієнта ідеальності напівпровідника показав неістотний вплив останнього на річний виробіток електроенергії, тобто його можна приймати в рекомендованих параметрах, не заглиблюючись у розрахунок. Температурна залежність електричних параметрів ФЕМ також впливає неістотно на річну генерацію електроенергії, тоді як вплив еквівалентного паралельного опору більший, і рішення щодо його видалення з моделі потрібно приймати після додаткових оцінок.

ПОСИЛАННЯ

1. Krismadinata, N. Abd. Rahim, H. W. Ping, J. Selvaraj. Photovoltaic module modeling using simulink/matlab. The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security SUSTAIN 2012. Procedia Environmental Sciences 17 (2013), p. 537–546.
2. H. Tian, F. Mancilla–David, K. Ellis, E. Muljadi, P. Jenkinsd. A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems. Journal Article NREL/JA-5500-54601, July 2012.
3. E. M. Salilih, Y. T. Birhane. Modeling and Analysis of Photo-Voltaic Solar Panel under Constant Electric Load. Hindawi Journal of Renewable Energy. Volume 2019. Article ID 9639480, DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/9639480>
4. P. Acharya, M. N. Shaikh, S. K. Jha, A. P. Papadakis. Electrical Modelling Of a Photovoltaic Module. Trivent Publishing © The Authors, 2016, p. 168–176. DOI: <https://doi.org/10.22618/TP.El.20163.389014>
5. S. R. Fahim, H. M. Hasanien, R. A. Turkey, S. H. E. A. Aleem, M. A. Calasan, Comprehensive Review of Photovoltaic Modules Models and Algorithms Used in Parameter Extraction. Energies 2022, 15, 8941. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238941>.
6. S. R. Pendem, S. Mikkili. Modeling, simulation and performance analysis of solar PV array configurations (Series, Series-Parallel and HoneyComb) to extract maximum power under Partial Shading Conditions, Energy Reports, ISSN 2352-4847, Elsevier, Amsterdam. Vol. 4, pp. 274–287, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.03.003>
7. D. D. Nguyen, B. Lehman. Modeling and Simulation of Solar PV Arrays under Changing Illumination Conditions.

2006 IEEE COMPEL Workshop, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, July 16–19, 2006. P. 295–299.

8. D. G. Montoya, J. D. Bastidas-Rodriguez, L. A. Trejos-Grisales, C. A. Ramos-Paja, G. Petrone, G. I. Spagnuolo. A Procedure for Modeling Photovoltaic Arrays under Any Configuration and Shading Conditions. Energies 2018, 11, 767; DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040767>
9. X. H. Nguyen, M. P. Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. Nguyen and Nguyen Environ Syst Res (2015) 4:24 DOI <https://doi.org/10.1186/s40068-015-0047-9>
10. S. Fadhel, M. Trabelsi, I. Bahri, D. Diallo, M. Mimouni. Faults effects analysis in a photovoltaic array based on current-voltage and power-voltage characteristics. 2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Dec 2016, Sousse, Tunisia. DOI: <https://doi.org/10.1109/sta.2016.7952049> <https://centralesupelec.hal.science/hal-01942581>
11. F. N. Sibai. Maximizing aged photovoltaic array power: a computer modelling study. Clean Energy, 2024. Vol. 8. No. 1, p.171–187. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/zkad079>.
12. <https://www.renewables.ninja/>

REFERENCES

1. Krismadinata, N. Abd. Rahim, H. W. Ping, J. Selvaraj. Photovoltaic module modeling using simulink/matlab. The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security SUSTAIN 2012. Procedia Environmental Sciences 17 (2013), p. 537–546.
2. H. Tian, F. Mancilla–David, K. Ellis, E. Muljadi, P. Jenkinsd. A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems. Journal Article NREL/JA-5500-54601, July 2012
3. E. M. Salilih, Y. T. Birhane. Modeling and Analysis of Photo-Voltaic Solar Panel under Constant Electric Load. Hindawi Journal of Renewable Energy. Volume 2019, Article ID 9639480, DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/9639480>
4. P. Acharya, M. N. Shaikh, S. K. Jha, A. P. Papadakis. Electrical Modelling of a Photovoltaic Module. Trivent Publishing © The Authors, 2016, p.168–176. DOI: <https://doi.org/10.22618/TP.El.20163.389014>
5. S. R. Fahim, H. M. Hasanien, R. A. Turkey, S. H. E. A. Aleem, M. A. Calasan, Comprehensive Review of Photovoltaic Modules Models and Algorithms Used in Parameter Extraction. Energies 2022, 15, 8941. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238941>.
6. S. R. Pendem, S. Mikkili. Modeling, simulation and performance analysis of solar PV array configurations (Series,

- Series-Parallel and HoneyComb) to extract maximum power under Partial Shading Conditions, *Energy Reports*, ISSN 2352–4847, Elsevier, Amsterdam. Vol. 4, pp. 274–287, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.03.003>
7. D. D. Nguyen, B. Lehman. Modeling and Simulation of Solar PV Arrays under Changing Illumination Conditions. 2006 IEEE COMPEL Workshop, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, July 16–19, 2006. P. 295–299.
8. D. G. Montoya, J. D. Bastidas-Rodriguez, L. A. Trejos-Grisales, C. A. Ramos-Paja, G. Petrone, G. I. Spagnuolo. A Procedure for Modeling Photovoltaic Arrays under Any Configuration and Shading Conditions. *Energies* 2018, 11, 767; DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040767>
9. X. H. Nguyen, M. P. Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Nguyen and Nguyen Environ Syst Res* (2015) 4:24 DOI <https://doi.org/10.1186/s40068-015-0047-9>
10. S. Fadhel, M. Trabelsi, I. Bahri, D. Diallo, M. Mimouni. Faults effects analysis in a photovoltaic array based on current-voltage and power-voltage characteristics. 2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Dec 2016, Sousse, Tunisia. DOI: <https://doi.org/10.1109/sta.2016.7952049> <https://centralesupelec.hal.science/hal-01942581>
11. F.N. Sibai. Maximizing aged photovoltaic array power: a computer modelling study. *Clean Energy*, 2024. Vol. 8. No. 1, p.171–187. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/zkad079>.
12. <https://www.renewables.ninja/>