
doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.41.01.019>

УДК 621.311.68

О.М. Шам, аспірант

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
e-mail: aleksham104@gmail.com)

Математичне моделювання фотоелектричного перетворювача за допомогою програми Matlab

Реалізовано математичну модель фотоелектричного перетворювача, яка забезпечує зв'язок між його експлуатаційними параметрами та характеристиками з властивостями напівпровідникових матеріалів і дозволяє розрахувати вихідну потужність фотоелектричної системи як частини автономної системи живлення при різних режимах роботи.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, математична модель, вольт-амперна характеристика.

Створення нових ефективних фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) є одним з актуальних завдань розвитку сонячної енергетики. В останні роки фотоелектричні перетворювачі все частіше використовують у системах енергопостачання, опалення, а також у якості резервних та автономних джерел живлення, освітлення, та ін. Особливо це актуально в ізольованих та віддалених районах, де лінії електропередач відсутні, недоступні або їх використання економічно недоцільне [1, 2].

У зв'язку зі стрімким розвитком та впровадженням сонячної енергетики оцінка ефективності роботи ФЕП є досить важливою. Необхідно мати можливість визначати вихідні параметри ФЕП під дією різноманітних факторів навколишнього середовища, порівнювати ефективність роботи ФЕП з різних матеріалів, та оцінювати їх поведінку при різних режимах роботи.

Вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) є основним методом оцінки експлуатаційних характеристик ФЕП. Для ефективного використання фотоелектричних елементів необхідно знати точку максимальної потужності і забезпечити такий режим роботи, щоб вихідна потужність при зміні умов навколишнього середовища була найбільшою. Лабораторні випробування дозволяють відтворювати характеристики ФЕП під

© Шам О.М., 2019

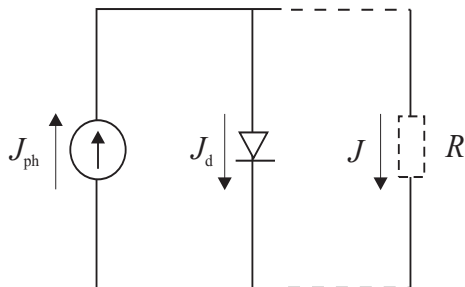


Рис. 1. Еквівалентна схема ідеального ФЕП: J_{ph} — щільність фотоструму; J_d — щільність струму діоду (різниця між струмом дифузії J_{dif} та щільністю теплового струму переходу I_0); R — опір навантаження

дією різноманітних зовнішніх впливів, однак у порівнянні з експериментальними випробуваннями математичне моделювання має більше інструментів для дослідження та виключає необхідність мати в наявності дороге обладнання [2, 3].

Постановка задачі та її розв’язок. Враховуючи відомі технічні характеристики ФЕП, необхідно побудувати математичну імітаційну модель для отримання ВАХ при різних рівнях сонячної інсоляції та температури навколишнього середовища. Моделювання ФЕП здійснюється у програмі Matlab/Simulink.

На даний момент існує велика різноманітність прикладів реалізації математичних моделей ФЕП. Для їх реалізації використовуються аналітичні моделі, побудовані на основі еквівалентної електричної схеми заміщення ФЕП [1—9]. Однак зазвичай розрахунок вихідних характеристик у таких схемах відбувається протягом короткого проміжку часу при сталих значеннях вхідних параметрів таких, як сонячна інсоляція і температура навколишнього середовища. Але параметри навколишнього середовища змінюються протягом доби, тому схему в такому вигляді не можна використовувати для моделювання ФЕП як частини автономної системи живлення.

На рис. 1 наведено еквівалентну схему ідеального ФЕП, яка являє собою паралельно з’єднані генератор струму та ідеальний діод. Вихідний струм пропорційний світлу, що падає на ФЕП. Електричні характеристики ФЕП і кількість енергії, яка виробляється ним, залежать від хімічного складу, а також поточної напруги, температури та інтенсивності сонячного випромінювання [1—9].

Складемо рівняння струму навантаження I для ідеального діоду:

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0(e^{qV/kT} - 1), \quad (1)$$

де V — робоча напруга; q — заряд електрону; k — постійна Больцмана; T — температура переходу. Однак цей вираз не досить добре узгоджується з

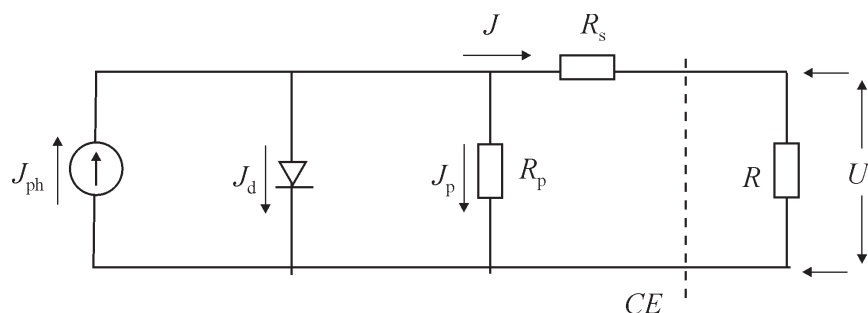


Рис. 2. Вдосконалена еквівалентна схема ФЕП

експериментом, оскільки при виведенні формули (1) було використано рівняння для ідеального діода, що не підтверджено експериментальними результатами. Тому рівняння діода перетворюють введенням в знаменник експоненти коефіцієнта n , який враховує неідеальність ВАХ і визначається експериментально [2—4].

Оскільки ФЕП — прилад силовий, тобто призначений для роботи з достатньо високою густиною струму, він має великі значення різниці потенціалів, навіть при малому опорі. Тому виникає необхідність обліку паралельного опору ФЕП R_p , тобто опору витоку, який в ідеальному ФЕП приймається нескінченно великим, і послідовного опору ФЕП — R_s .

З урахуванням зроблених зауважень побудовано еквівалентну схему ФЕП (рис. 2) [2—4], в якій генератор струму моделює фотострум, що виникає при потраплянні світлової енергії, а паралельний йому діод враховує інжекційний струм (струм дифузії і тепловий струм). Для реального сонячного елемента послідовний опір R_s складається з послідовно включених опорів контактних шарів, опорів кожної з p - і n -областей елемента, перехідних опорів метал—напівпровідник, а паралельний опір R_p відображає можливі канали витоку струму, паралельні p - n -переходу [4].

Перетворимо вираз (1) згідно із зробленими вище зауваженнями:

$$I = I_{ph} - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) - \frac{V + IR_s}{R_p}. \quad (2)$$

Оскільки паралельний опір R_p набагато більший ніж послідовний опір R_s , останній доданок у рівнянні (2) стає незначним у порівнянні з сумою перших, тому їм можна знехтувати.

Відповідно до викладеного вище потужність P , яка виробляється ФЕП, розраховується за формулою

$$P = VI = V [I_{ph} - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1)].$$

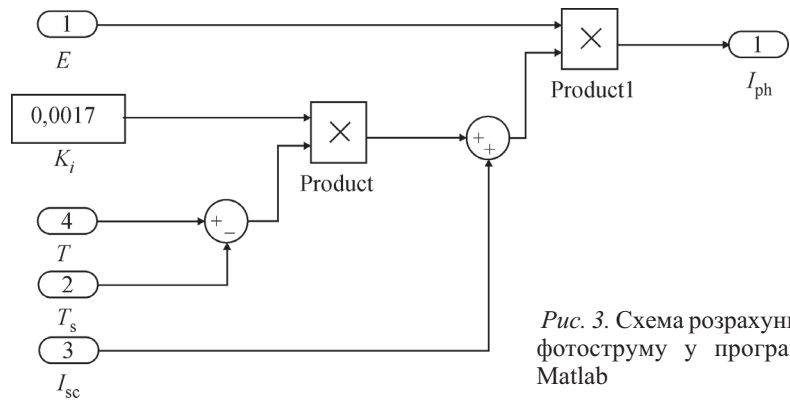


Рис. 3. Схема розрахунку фотоструму у програмі Matlab

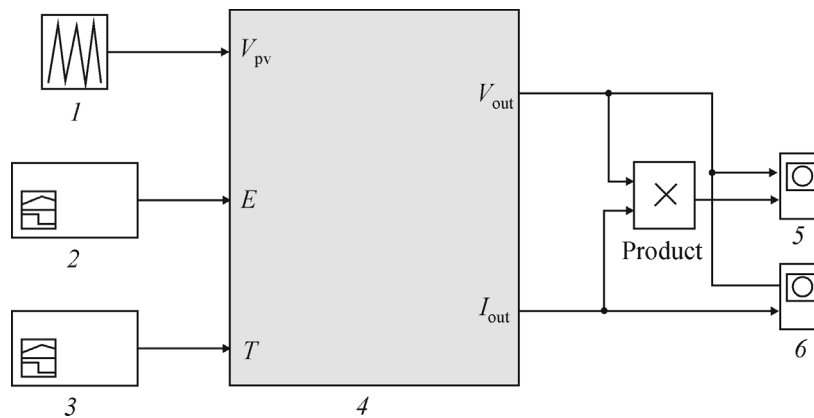


Рис. 4. Загальний вигляд моделі ФЕП: 1 — блок V_{pv} задає значення напруги; 2 — блок Insolation задає значення сонячної інсоляції; 3 — блок температури задає значення робочої температури; 4 — блок Solar Panel включає в себе модель розрахунку батареї; 5 та 6 — блоки, які виводять значення ВАХ батареї

Для обліку впливу температури на генерацію струму існує температурний коефіцієнт порядку декількох міліампер на один градус Цельсія [1—6]:

$$I_{ph} = I_{sc} + K_i(T - T_s) \frac{E}{1000}, \quad (3)$$

де I_{sc} — струм короткого замикання ФЕП при нормальних умовах роботи; K_i — температурний коефіцієнт; E — сонячна інсоляція; T — робоча температура батареї; T_s — температура батареї при тестових умовах 25 °С.

Схему розрахунку фотоструму у програмі Matlab за формулою (3) наведено на рис. 3. Для отримання необхідних вихідних параметрів напруги та струму ФЕП з'єднують у послідовні та паралельні ланцюги та називають

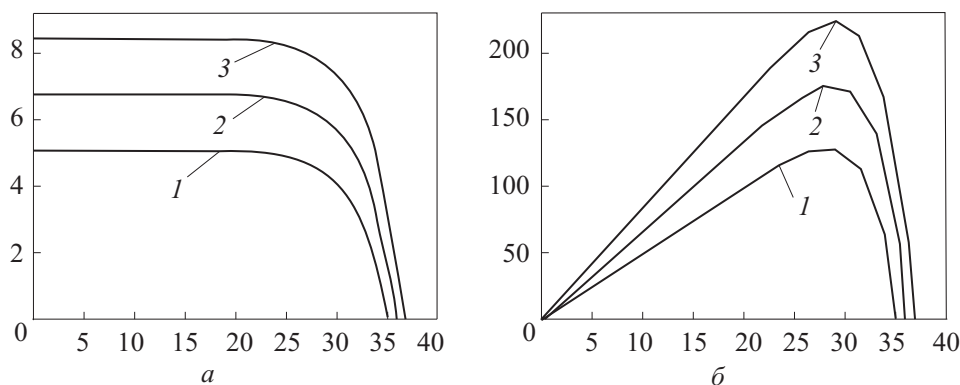


Рис. 5. Графіки залежності струму (а) та потужності (б) ФЕП від напруги при температурі 25°C та сонячній інсоляції: 1— 0,4 кВт/м²; 2 — 0,6 кВт/м²; 3 — 0,8 кВт/м²

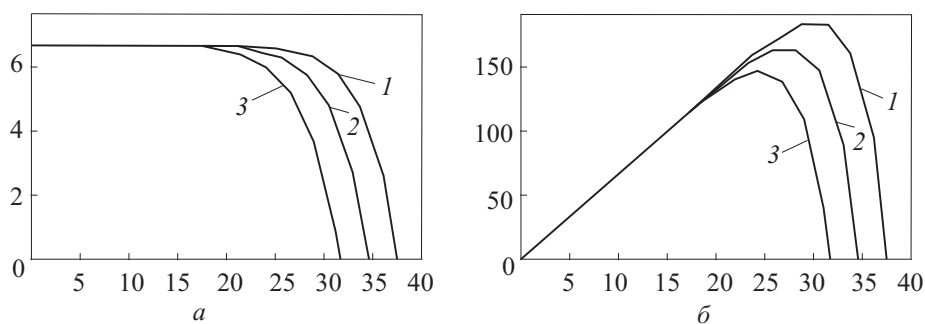
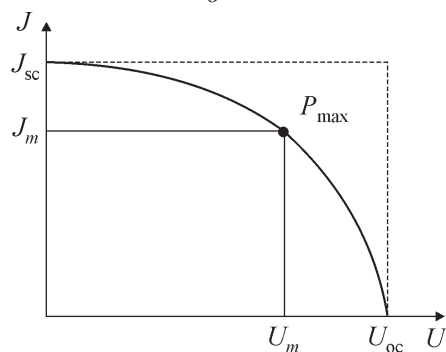


Рис. 6. Графіки залежності струму (а) та потужності (б) ФЕП від напруги при інсоляції 0,6 кВт/м² і температурі: 1 — $T = 20$ °C; 2 — $T = 30$ °C; 3 — $T = 40$ °C

Рис. 7. Точка максимальної потужності ФЕП P_{\max} : J_m і U_m — густина струму і напруга при максимальній потужності



вають сонячною батареєю. Припустимо, що сонячна батарея складається з послідовно N_s , та паралельно N_p об'єднаних фотоелементів. Тоді

$$I_{sc\delta} = N_p I_{sc}, V_{oc\delta} = N_s V_{oc}, R_{s\delta} = (N_s / N_p) R_s,$$

де $I_{sc\delta}$ — струм короткого замикання батареї; $V_{oc\delta}$ — напруга холостого ходу батареї; $R_{s\delta}$ — послідовний опір батареї.

Модель ФЕП у середовищі Matlab наведено на рис. 4

Результати моделювання. Залежність вихідної потужності та струму ФЕП від сонячної інсоляції при температурі 25°C показано на рис. 5. Залежність вихідної потужності та струму ФЕП від температури при сонячній інсоляції 0,6 кВт/м² показано на рис. 6.

Найважливіша характеристика ФЕП — коефіцієнт корисної дії η , який визначає ефективність перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію та розраховується за формулою [2—4]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P} = \frac{ff \times I_{sc} U_{oc}}{P}$$

де P — потужність сонячного випромінювання, яке потрапляє на одиницю поверхні ФЕП; P_{\max} — максимальна вихідна потужність ФЕП, віднесена до площі його поверхні; ff (form factor) — коефіцієнт заповнення, або коефіцієнт форми ВАХ. Точку максимальної потужності на ВАХ показано на рис. 7.

Висновки

Запропонована математична модель дозволяє виконати розрахунок вихідної потужності ФЕП при різних погодних умовах експлуатації. Модель враховує вплив таких факторів зовнішнього середовища, як температура та інтенсивність сонячного випромінювання на експлуатаційні параметри і характеристики ФЕП. Встановлено, що інтенсивність сонячного випромінювання впливає на величину вихідного струму, а температура — на вихідну напругу ФЕП.

Відмінною рисою моделі є те, що її вхідні параметри задаються за допомогою сигналів, якими можна задавати зміну інтенсивності сонячного випромінювання та температуру протягом будь-якого інтервалу часу. Тобто, знаючи графіки зміни параметрів навколишнього середовища, таку схему можна використовувати у складі моделі автономної системи енергопостачання.

Дана модель розрахована для конкретної конфігурації батареї. Враховуючи складові елементи сонячної батареї, параметри блоку Solar Panel (див. рис. 4) необхідно змінювати на відповідні. Модель не враховує вплив дефектів на експлуатаційні параметри і характеристики ФЕП. Тому є необхідність вдосконалити еквівалентну схему ФЕП і математичну модель на її основі, враховуючи дефекти пластин кремнію, з яких виготовлені ФЕП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Трещ А.М.* Моделирование эксплуатационных характеристик солнечных батарей (в среде MATLAB/SIMULINK) // Доклады БГУИР, 2012, №7(69), с. 111—115.
2. *Шарифов Б.Н., Терезулов Т.Р.* Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/SIMULINK // Вестник УГАТУ, 2015, с. 77—83.
3. *Козюков Д.А., Цыганков Б.К.* Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в MATLAB/SIMULINK // Научный журнал КубГАУ, 2015, № 112(08), с. 1—16.
4. *Божко К.М.* Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей: Дис... канд. техн. наук. Київ, 2016р., 180 с.
5. *Обухов С.Г., Плотников И.А.* Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Изв. Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2017, 328, № 6, с. 38—51.
6. *Нгуен М.Д.* Моделирование фотоэлектрического и ветроэнергетического модулей фотоэлектрической установки // VI Всероссийская научно-практ. конф. «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов». Томск: изд-во Томского политехнического ун-та, 2013, с. 322—326.
7. *Ali A.El., Moubayed N., Outbib R.* Comparison between solar and wind energy in Lebanon // 9th International Conf. on Electrical Power Quality and utilization. 9—11 October 2007, Barcelona, Spain.
8. *Nema S., Nema R.K. Gayatri Agnihotri.* MATLAB/Simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification // International journal of Energy and Environment, 2010, Vol. 1, No. 3, p. 487—500.
9. *Glunz S.* Crystalline Silicon Solar Cells. Freiburg.: Fraunhofer-ISE, 2014, 46 p.

Отримано 22.10.18;
після доопрацювання 09.11.18

REFERENCES

1. Treshch, A.M. (2012), "Simulation of operational characteristics of solar of batteries (in MATLAB / SIMULINK)", *Otchety BGUIR*, Vol. 7, no. 69, pp. 111-115.
2. Sharifov, B.N. and Teregulov, T.R. (2015), "Simulation of a solar panel in the MATLAB / SIMULINK ", *Vestnik UGATU*, pp. 77-83.
3. Kozyukov, D.A. and Tsygankov, B.K. (2015), "Photovoltaic modules characteristics modeling in MATLAB / SIMULINK ", *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, Vol. 112, no. 8, pp. 1-16.
4. Bozhko, K.M. (2016), "In accordance with the methods and control of defects in photoelectric solar batteries", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 2016, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.
5. Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A. (2017), "A simulation model of the operating modes of an autonomous photovoltaic station taking into account the actual operating conditions", *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo un-ta. Inzhiniring georesursov*, Vol. 328, no. 6, pp. 38-51.
6. Nguyen, M.D. (2013), "Modeling of photoelectric and power energy modules of a photovoltaic installation", *Nauchnaya initsiativa inostrannykh studentov i aspirantov rossiyskikh vuzov. VI Vserossiyskaya nauchno-prakt. konf.* [Scientific initiative of foreign students and graduate students of Russian universities. Conference proceeding of the 6th All-Russian scientific and practical conference], Tomsk, 2013, pp. 322-326.
7. El Ali, A., Moubayed, N. and Outbib, R. (2007), "Comparison between solar and wind energy in Lebanon", *Conference proceeding of the 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization*, Barcelona, Spain, October 9-11, 2007.

8. Nema, S., Nema, R.K. and Gayatri, Agnihotri (2010), "MATLAB / Simulink based study of photovoltaic cells / modules / array and their experimental verification", *International journal of Energy and Environment*, Vol. 1, no. 3, pp. 487-500.
9. Glunz S. (2014), "Crystalline Silicon Solar Cells", Fraunhofer-ISE, Freiburg.

Received 22.10.18;
after revision 09.11.18

А.М. Шам

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MATLAB

Реализована математическая модель фотоэлектрического преобразователя, который обеспечивает связь между его эксплуатационными параметрами и характеристиками со свойствами полупроводниковых материалов и позволяет рассчитать выходную мощность фотоэлектрической системы как части автономной системы питания при различных режимах работы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: фотоэлектрический преобразователь, математическая модель, вольт-амперная характеристика.

О.М. Sham

MATHEMATICAL MODELING OF A PHOTOELECTRIC CONVERTER USING THE MATLAB PROGRAM

Realization of the mathematical model of the photovoltaic converter, which provides a connection between its operational parameters and characteristics, with the properties of semiconductor materials, and allows to calculate the output power of the photovoltaic system as part of an autonomous power supply system for different modes of operations is considered.

K e y w o r d s : photoelectric converter, mathematical model, current-voltage characteristic.

ШАМ Олександр Михайлович, аспірант Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 2015 р. закінчив Національний авіаційний університет. Область наукових досліджень — математичне моделювання та обчислювальні методи.