

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-37>

УДК 621.383.51

МАРТИНЮК Валерій

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0001-5758-4244>

ФЕДУЛА Микола

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-3765-2016>

СЛИВА Артур

Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНОЇ ЕКСПОНЕНЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

Розвиток методів аналізу характеристик фотоелектричних модулів вимагає вдосконалення нелінійних експоненційних моделей з метою підвищення точності математичного опису залежностей між напругою та струмом в умовах перехідних процесів. Відомі експоненційні моделі характеризуються похибками в умовах перехідних процесів та неявними формами залежностей між параметрами фотоелектричних модулів, що суттєво знижує їх ефективність в процесі реалізації кіберфізичних систем енергетики, які активно розвиваються протягом останніх років.

Основними задачами, які вирішуються в процесі моделювання фотоелектричних модулів є отримання явних залежностей струму від напруги, освітленості та температури, а також формування ефективних числових алгоритмів розрахунку параметрів і характеристик у реальному масштабі часу.

У роботі розглянуто особливості нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля із врахуванням послідовного та паралельного паразитних опорів. Сформульована явна залежність струму фотоелектричного модуля від напруги, освітленості та температури. Виконано імітаційне моделювання фотоелектричного модуля на основі числового методу. Отримані результати свідчать про високу точність нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля, та показують наявність похибки, що спричинена перехідними процесами внаслідок зміни зовнішніх умов.

Ключові слова: модель, фотоелектричний модуль, нелінійність, експоненційна функція, явна залежність.

MARTYNYUK Valerii, FEDULA Mikola, SLYVA Artyr
Khmelnitskyi National University

THE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC MODULE NONLINEAR EXPONENTIAL MODEL

The development of methods for analyzing the characteristics of photovoltaic modules requires the improvement of nonlinear exponential models in order to improve the accuracy of the mathematical description of the dependences between voltage and current in the conditions of transient processes. The known exponential models are characterized by errors in the conditions of transient processes and implicit forms of dependencies between the parameters of photovoltaic modules, that significantly reduce their effectiveness in the process of implementing cyber-physical energy systems, which are actively developing in recent years.

The main tasks, solved in the photovoltaic modules modeling, are obtaining clear dependences of current on voltage, illumination and temperature, as well as the development of effective numerical algorithms for calculating parameters and characteristics on a real time scale.

The paper considers the peculiarities of the nonlinear exponential model of the photovoltaic module, taking into account series and parallel parasitic resistances. An explicit dependence of the photovoltaic module current on voltage, illumination and temperature is formulated. Simulation modeling of the photovoltaic module based on the numerical method was performed. The obtained results indicate the high accuracy of the nonlinear exponential model of the photovoltaic module, and show the presence of an error caused by transient processes due to changes in external conditions.

Keywords: model, photovoltaic module, nonlinearity, exponential function, explicit dependence.

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

На даний час сонячна енергетика стала важливою частиною світових енергосистем [1], і її актуальність зростає з кожним роком у контексті стрімкого розвитку альтернативних джерел енергії та розумних мереж [2]. Фотоелектричні модулі, як основний елемент сонячних панелей, виконують перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Одним з актуальних завдань сучасної сонячної енергетики є підвищення ефективності фотоелектричних модулів та зменшення витрат на їх виробництво. У цьому контексті моделювання надає можливість детального аналізу характеристик структур та матеріалів, що використовуються в фотоелектричних модулях, з метою збільшення відбору сонячної енергії та зниження витрат при її перетворенні в електричну енергію. Аналітичні та числові методи моделювання фотоелектричних елементів на основі експоненційних функцій дозволяють прогнозувати та вдосконалювати роботу сонячних модулів у змінних умовах навколишнього середовища, і дають

можливість покращувати співвідношення між витратами та показниками ефективності роботи сонячних електростанцій [3,4].

Застосування сучасних технологій у моделюванні фотоелектричних модулів дає можливість підвищити точність та швидкість розрахунків, формувати прогнози для нових типів фотоелектричних модулів, а також враховувати вплив різних зовнішніх факторів на їх роботу. Моделювання сонячних електростанцій та вузлів електроенергетичних мереж дозволяє оптимізувати ефективність та стабільність енергетичної системи в цілому. Завдяки практичному впровадженню результатів моделювання фотоелектричних модулів в умовах технологій Industry 4.0 процеси виготовлення і вдосконалення матеріалів та пристроїв сонячної енергетики значно прискорюються [5,6]. Використання кіберфізичних систем та цифрових двійників дозволяє формувати набагато більш ефективні системи сонячної енергетики, у яких втрати енергії мінімізуються за рахунок автоматизованого налаштування режимів роботи за результатами прогнозування динаміки струму та напруги фотоелектричних модулів на основі їх моделей, параметри яких розраховуються у реальному часі [5].

При впровадженні енергетичних технологій на основі моделювання важливим є баланс між точністю моделей та вимогами до обчислювального ресурсу, необхідного для забезпечення режиму реального часу. Таким чином, аналіз і вдосконалення моделей фотоелектричних модулів є актуальним завданням сучасної сонячної енергетики, від вирішення якого залежать показники ефективності роботи розумних мереж на основі відновлюваних джерел енергії.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз параметрів та формулювання рекомендацій для підвищення точності нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля.

Аналіз досліджень та публікацій

Відомі методи моделювання сонячних фотоелектричних модулів включають велику кількість різних підходів та програмних засобів для аналізу та прогнозування динаміки залежностей між їх струмом та напругою за різних погодних умов. Одним із поширених підходів до моделювання фотоелектричних модулів є застосування експоненційних функцій, які забезпечують гнучкість та точність при аналізі нелінійних процесів, що відбуваються у фотоелектричних елементах [4,7,8].

Найчастіше експоненційні функції використовуються у моделюванні температурних залежностей фотоелектричних модулів [9]. Такі моделі враховують вплив температури на електричні характеристики модулів при різних напругах і струмах. Залежність втрат потужності та ефективності від температури, що може бути апроксимована експоненційними функціями, дозволяє з високою точністю враховувати зміни в роботі фотоелектричних модулів за різних погодних умов. Крім того, експоненційні функції використовуються для моделювання залежностей струму від напруги та характеристик діаграм спрямованості сонячних панелей [5]. Нелінійні експоненційні моделі також широко застосовуються для аналізу впливу рівня сонячної освітленості на ефективність фотоелектричних модулів [10,11]. Моделювання залежностей генерації струму від інтенсивності світла та температури дозволяє точно визначати ефективність модулів у різних умовах експлуатації.

Аналітичні методи моделювання [12,13] базуються на математичному аналізі рівнянь, що описують залежності між параметрами фотоелектричних модулів при різних характеристиках зовнішніх впливів. Більшість відомих аналітичних методів моделювання фотоелектричних модулів використовують експоненційні функції для розрахунку залежності між струмом та напругою фотоелектричного модуля на основі теорії напівпровідників. У методах двофазної дифузії використовуються дифузійні рівняння для опису процесів електронного перенесення у фотоелектричному матеріалі [13–15]. Слід зазначити, що при використанні аналітичних методів моделі фотоелектричних модулів часто можуть мати форму неявних залежностей між струмом, напругою та іншими параметрами, що суттєво ускладнює процес розрахунку та підвищує вимоги до обчислювальних ресурсів [16,17].

До числових методів моделювання фотоелектричних модулів відносяться метод скінченних різниць [18] та метод скінченних елементів [19]. Метод скінченних різниць використовується для розв'язування диференціальних рівнянь, якими описуються фотоелектричні модулі, на основі алгоритмів числового інтегрування [20]. Метод скінченних елементів використовується для моделювання просторового розподілу температури, напруги та струму в фотоелектричних модулях [19,21].

Числові методи моделювання фотоелектричних модулів характеризуються значно вищою швидкістю, ніж аналітичні та можуть використовуватися для вбудовування моделей фотоелектричних модулів у кіберфізичні системи. Проте, алгоритми моделювання на базі числових методів характеризуються похибками дискретизації та ефектами квантування, що можуть призводити до виникнення нестабільних режимів виконання обчислень. Тому на даний час актуальним є розроблення та вдосконалення числових методів моделювання фотоелектричних модулів з метою отримання вищої стабільності та стійкості до похибок дискретизації [22].

Методи оптимізації використовуються у моделюванні фотоелектричних модулів для знаходження параметрів, які найкраще відповідають виміряним показникам. Разом із відомими методами лінійного та нелінійного програмування, значного поширення набувають також методи на основі генетичних алгоритмів (теорія еволюційного числення) та методи моделювання з використанням нейронних мереж [23–25].

Методи оптимізації дозволяють отримати надзвичайно високу точність апроксимації характеристик фотоелектричних модулів. Проте, слід зазначити, що швидкі алгоритми прогнозування динаміки фотоелектричних модулів у реальному часі розвинені недостатньо, і вимагають подальших досліджень у контексті розвитку технологій штучного інтелекту [25].

При наявності значних обчислювальних ресурсів можуть використовуватися також методи системного аналізу, у яких детально моделюється і аналізується взаємодія фотоелектричних модулів з іншими компонентами сонячної енергетичної системи [25,26]. Такі методи мають значні перспективи застосування у кіберфізичних системах розумних мереж, проте вони вимагають високої точності та швидкодії моделювання багатьох компонентів різної фізичної природи.

Таким чином, аналіз нелінійної експоненційної моделі фотоелектричного модуля є необхідним завданням для формулювання умов розробки і вдосконалення методів та алгоритмів моделювання систем сонячної енергетики в умовах розвитку технологій розумних мереж.

Математична модель фотоелектричного модуля

Еквівалентна схема фотоелектричного елемента зображена на рис. 1.

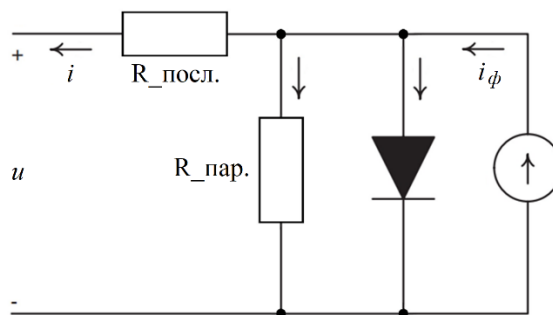


Рис. 1 Еквівалентна схема фотоелектричного елемента

Еквівалентна схема заміщення фотоелектричного елемента (рис. 1) складається з джерела фотоструму, послідовного і паралельного опорів, а також діода, модель якого визначає нелінійність вольт-амперної характеристики.

Сила струму фотоелектричного модуля описується формулою (1):

$$i = N_{\text{пар.}} i_{\phi} - \frac{u N_{\text{пар.}} + i R_{\text{посл.}} N_{\text{посл.}}}{R_{\text{пар.}} N_{\text{посл.}}} - N_{\text{пар.}} i_{\text{н}} \left(e^{\frac{q(u N_{\text{пар.}} + i R_{\text{посл.}} N_{\text{посл.}})}{N_{\text{пар.}} N_{\text{посл.}} n k T}} - 1 \right), \quad (11)$$

де i – струм фотоелектричного модуля, u – напруга фотоелектричного модуля, i_{ϕ} – фотострум, $i_{\text{н}}$ – струм насичення, $N_{\text{пар.}}$ – кількість паралельно з'єднаних фотоелектричних елементів, $N_{\text{посл.}}$ – кількість послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів, $R_{\text{посл.}}$ – еквівалентний послідовний опір, $R_{\text{пар.}}$ – еквівалентний паралельний опір, q – заряд одного електрона, $q = 1,602 \times 10^{-19}$ Кл, k – стала Больцмана, $k = 1,3806503 \times 10^{-23}$ Дж/К, n – коефіцієнт ідеальності, T – температура фотоелектричних елементів ($^{\circ}\text{C}$).

Фотострум визначається виразом (2):

$$i_{\phi} = \frac{G i_{\phi, \text{н.у.}} (1 + k_i (T - T_{\text{н.у.}}))}{G_{\text{н.у.}}}, \quad (12)$$

де G – рівень освітленості ($\text{Вт}/\text{м}^2$), T – температура ($^{\circ}\text{C}$), k_i – відносний температурний коефіцієнт струму короткого замикання, $i_{\phi, \text{н.у.}}$ – фотострум за нормальних умов при освітленості $G_{\text{н.у.}} = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ та температурі $T_{\text{н.у.}} = 25^{\circ}\text{C}$.

Струм насичення визначається температурною залежністю (3):

$$i_{\text{н}} = i_{0, \text{н.у.}} \left(\frac{T}{T_{\text{н.у.}}} \right)^3 e^{\frac{E_{G, \text{н.у.}} E_G}{k T_{\text{н.у.}} k T}}, \quad (13)$$

де $i_{0,н.у}$ – струм насичення за нормальних умов, $E_{G,н.у}$ – ширина забороненої зони напівпровідника за нормальних умов (eВ), E_G – ширина забороненої зони (eВ), яка визначається залежністю (4):

$$E_G = 1.16 - 7.02 * 10^{-4} \left(\frac{T^2}{T-1108} \right), \quad (14)$$

де T – температура фотоелектричних елементів.

Внаслідок наявності захисного покриття фотоелектричного модуля, температура фотоелектричних елементів T відрізняється від зовнішньої температури $T_{зовн.}$, та визначається виразом (5):

$$T = GT_{зовн.} \left(\frac{T_{ном.} - 20}{0.8} \right), \quad (15)$$

де $T_{ном.}$ – номінальна температура фотоелектричного модуля, згідно із його технічною документацією.

Для спрощення подальших перетворень введемо додаткову змінну x :

$$x = \frac{uN_{пар.} + iR_{посл.}N_{посл.}}{R_{пар.}N_{посл.}} = u \frac{N_{пар.}}{R_{пар.}N_{посл.}} + i \frac{R_{посл.}}{R_{пар.}}. \quad (16)$$

Тоді силу струму фотоелектричного модуля можна виразити за формулою (7):

$$i = x \frac{R_{пар.}}{R_{посл.}} - u \frac{N_{пар.}}{R_{посл.}N_{посл.}}. \quad (17)$$

Підставимо додаткову змінну x у рівняння (11):

$$x \frac{R_{пар.}}{R_{посл.}} - u \frac{N_{пар.}}{R_{посл.}N_{посл.}} = N_{пар.}i_{\phi} - x - N_{пар.}i_n \left(e^{\frac{qR_{пар.}}{N_{пар.}nkT}x} - 1 \right). \quad (18)$$

Далі, для зручності подамо вираз (18) у формі (9):

$$N_{пар.}i_n e^{\frac{qR_{пар.}}{N_{пар.}nkT}x} + \left(1 + \frac{R_{пар.}}{R_{посл.}} \right) x - \left(N_{пар.} (i_n + i_{\phi}) + u \frac{N_{пар.}}{R_{посл.}N_{посл.}} \right) = 0. \quad (19)$$

Далі виконуємо заміну, і вводимо додаткові параметри a, b, c, d .

$$a = N_{пар.}i_n, \quad b = \frac{qR_{пар.}}{N_{пар.}nkT}, \quad c = 1 + \frac{R_{пар.}}{R_{посл.}}, \quad d = - \left(N_{пар.} (i_n + i_{\phi}) + u \frac{N_{пар.}}{R_{посл.}N_{посл.}} \right). \quad (20)$$

Тоді рівняння (19) набуде вигляду (11):

$$ae^{bx} + cx + d = 0. \quad (21)$$

Розв'яжемо рівняння (21) відносно змінної x :

$$x = -\frac{1}{b} W \left(\frac{abe^{-\frac{bd}{c}}}{c} \right) - \frac{d}{c}, \quad (22)$$

де $W(\dots)$ – W-функція Ламберта.

Тоді сила струму фотоелектричного модуля визначається шляхом підстановки виразу (22) у вираз (17):

$$i = -\frac{R_{пар.}}{bR_{посл.}} W \left(\frac{abe^{-\frac{bd}{c}}}{c} \right) - \frac{dR_{пар.}}{cR_{посл.}} - u \frac{N_{пар.}}{R_{посл.}N_{посл.}}. \quad (23)$$

Таким чином, вираз (23) є математичною моделлю, яка описує залежність струму фотоелектричного модуля від його напруги, рівня освітленості та температури.

Імітаційне моделювання фотоелектричного модуля

Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання фотоелектричного модуля зображена на рис. 2.



Рис. 2 Блок-схема алгоритму роботи

Для моделювання спочатку вводяться технічні параметри фотоелектричного модуля. Зчитування значень параметрів може виконуватися у реальному масштабі часу із давачів за протоколом modbus. Якщо отримані дані коректні (немає грубих помилок), то далі відбувається їх передача до імітаційної моделі та розрахунок значень вихідного струму фотоелектричного модуля. Виконується розрахунок потужності та передача отриманих показників для візуального відображення у формі графіків. Розраховані та виміряні показники записуються у файл для подальшого аналізу.

У розробленій імітаційній моделі фотострум розрахунок фотоструму виконується за схемою, зображеною на рис. 3.

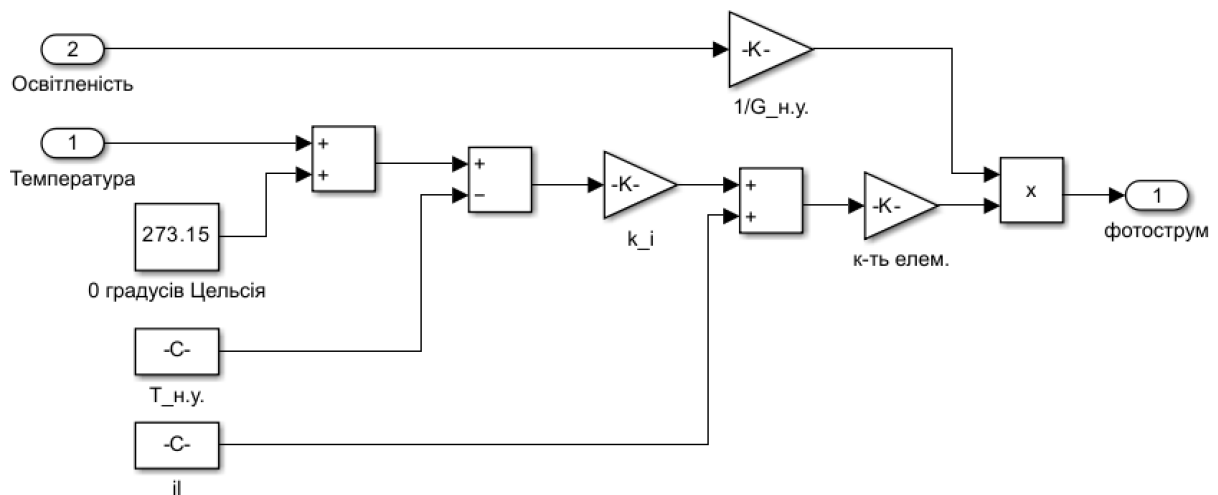


Рис. 3 Блок-схема для розрахунку фотоструму

На рис. 3 зображена блок-схема для розрахунку еквівалентного фотоструму модуля, що формується джерелом, зображеним на рис.1. Фотострум визначається із врахуванням рівня освітленості та температури, згідно із формулою (12). Виміряна температура переводиться у градуси Кельвіна, та враховується абсолютна температура нормальних умов.

Еквівалентний струм діода розраховується за схемою, зображеною на рис. 4.

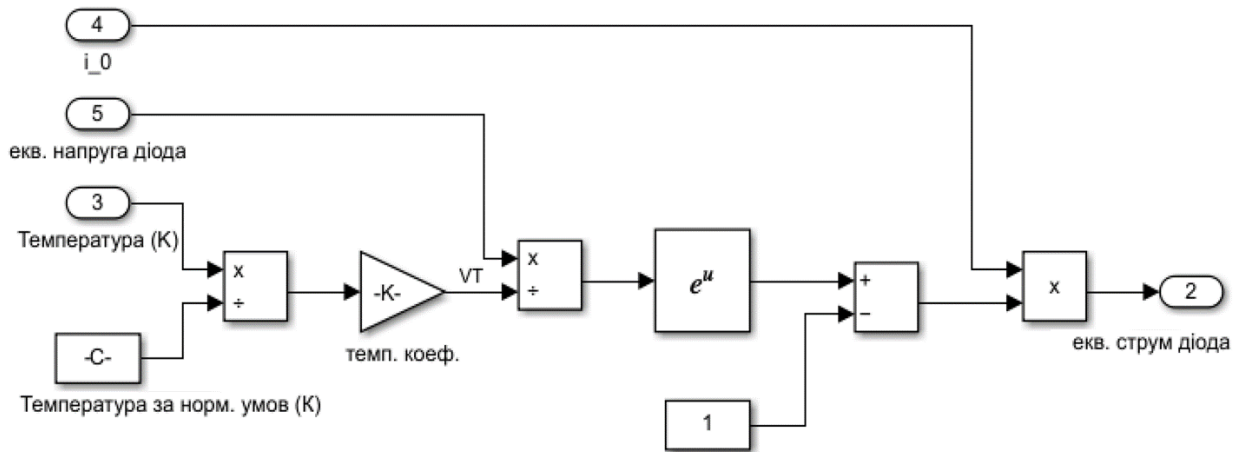


Рис. 4 Блок-схема для розрахунку еквівалентного струму діода

Еквівалентний струм діода розраховується ітеративно, за допомогою експоненційної функції, на вхід якої подається величина, що залежить від температури та напруги і струму з метою врахування впливу джерела фотоструму та елементів зовнішнього електричного кола, серед яких можуть бути присутні також інші джерела електричної енергії.

Розрахунок струму на контактах фотоелектричного модуля виконується відповідно до рис. 5.

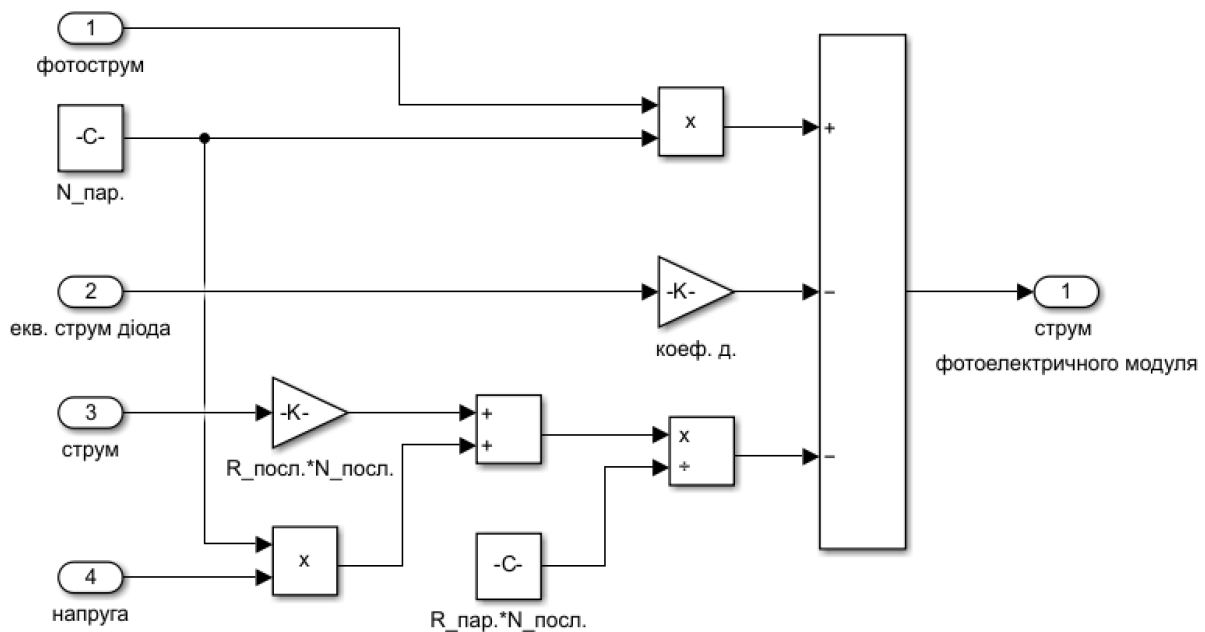


Рис. 5 Блок-схема для розрахунку струму фотоелектричного модуля

На рис. 5 зображена схема розрахунку струму фотоелектричного модуля із врахуванням фотоструму, еквівалентного струму діода та умов зовнішнього електричного кола для заданої кількості фотоелектричних елементів модуля, що можуть приєднуватися паралельно та послідовно.

Результати моделювання фотоелектричного модуля RSM120-8-590BMDG зображено на рис. 6.

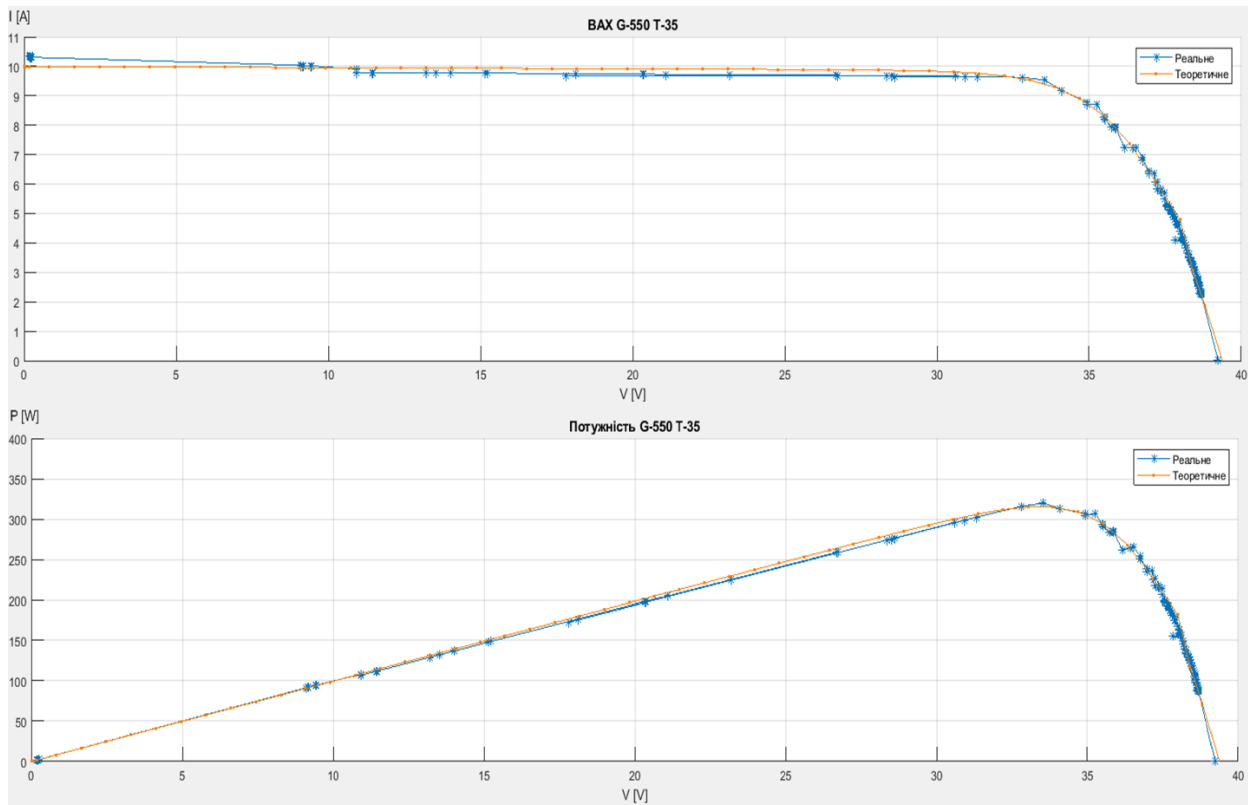


Рис. 6 Порівняння результатів моделювання сонячної панелі з реальними даними експерименту при освітленості 550 Вт/м² та температурі 35°C

На рис. 6 синьою лінією зображено виміряні вольт-амперну та вольт-ватну характеристики фотоелектричного модуля RSM120-8-590BMDG. Неперервною оранжевою лінією зображено вольт-амперну та вольт-ватну характеристики, отримані шляхом моделювання на основі вимірних значень освітленості та температури. З рис. 6 видно, що експериментальна та теоретична характеристики співпадають в усьому діапазоні вимірних значень струму і напруги. Незначне розходження графіків сили струму пояснюється інерційністю зміни параметрів фотоелектричного модуля при змінах освітленості, температури та напруги зовнішнього кола.

Таким чином, графіки, зображені на рис. 6, доводять ефективність застосування нелінійних експоненційних моделей для опису характеристик фотоелектричних модулів, але також вказують на необхідність розвитку ітеративних алгоритмів моделювання динаміки процесів, які характеризуються інерційністю внаслідок наявності паразитних ємностей та індуктивностей, а також ефектів гістерезису нелінійних елементів.

Висновки з проведеного дослідження і перспективи подальшої роботи

Проведені теоретичні дослідження та експерименти свідчать про суттєві переваги використання нелінійної експоненційної моделі для опису фотоелектричного модуля. Модель забезпечує достатньо високу точність при відтворенні складної залежності між параметрами модуля і змінними величинами рівня освітленості та температури. Експоненційна модель дозволяє враховувати нелінійні ефекти в процесі роботи фотоелектричного модуля, що є важливим у реальних умовах експлуатації. Враховуючи нелінійність характеристик сонячних панелей, такі як втрати потужності при зміні температури та навантаження, нелінійна експоненційна модель дозволяє отримувати достатньо точні прогнози виробництва електроенергії. Вказаний підхід також є корисним для оптимізації роботи фотоелектричних систем з метою забезпечення максимального збору енергії. Його застосування дозволяє здійснювати більш глибокий аналіз та планування експлуатації сонячних електростанцій із врахуванням реальних умов експлуатації та факторів, що впливають на роботу фотоелектричних модулів при різних погодних умовах.

Нелінійна експоненційна модель показує достатньо високу точність апроксимації вольт-амперної та вольт-ватної характеристик фотоелектричного модуля в умовах повільних змін освітленості температури та характеристик навантаження. Проте, у випадках, коли швидкі перехідні процеси відбуваються за декількома параметрами одночасно, точність нелінійної експоненційної моделі може знижуватися внаслідок наявності різних типів інерції фотоелектричного модуля (ефекти пам'яті паразитних ємностей та індуктивностей, а також гістерезис нелінійних елементів).

З метою підвищення точності моделювання фотоелектричних модулів у режимах із швидкими перехідними процесами необхідним є вдосконалення моделей пам'яті лінійних та нелінійних елементів для синтезу алгоритмів швидких перетворень, необхідних для роботи кіберфізичних систем у реальному часі.

Література

- [1] Maka AOM, Alabid JM. Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy* 2022;6. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>.
- [2] Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renew Energy* 2020;146:2589–625. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.092>.
- [3] Deihimi MH, Naghizadeh RA, Meyabadi AF. Systematic derivation of parameters of one exponential model for photovoltaic modules using numerical information of data sheet. *Renew Energy* 2016;87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.066>.
- [4] Murtaza AF, Munir U, Chiaberge M, Di Leo P, Spertino F. Variable parameters for a single exponential model of photovoltaic modules in crystalline-silicon. *Energies (Basel)* 2018;11. <https://doi.org/10.3390/en11082138>.
- [5] Patra B, Nema P, Khan MZ, Khan O. Optimization of solar energy using MPPT techniques and industry 4.0 modelling. *Sustainable Operations and Computers* 2023;4. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.10.001>.
- [6] Mastrocinque E, Ramírez FJ, Honrubia-Escribano A, Pham DT. Industry 4.0 enabling sustainable supply chain development in the renewable energy sector: A multi-criteria intelligent approach. *Technol Forecast Soc Change* 2022;182. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121813>.
- [7] De Falco P, Di Noia LP, Rizzo R. Exponential Smoothing Model for Photovoltaic Power Forecasting. *Proceedings of 2021 9th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2021, 2021*. <https://doi.org/10.1109/MPS52805.2021.9492538>.
- [8] Martynyuk V, Fedula M, Petrus R, Makaryshkin D, Kovtun L. Solar Cell data acquisition system. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2019* 2019;1:140–5. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924386>.
- [9] Xu HY, Zhang Q. Photovoltaic Power Generation Prediction Technology based on Digital Twin and Improved LSTM. *Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* 2023;38. <https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.02.012>.
- [10] Fernández EF, Ferrer-Rodríguez JP, Almonacid F, Pérez-Higueras P. Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels. *Solar Energy* 2017;155. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.012>.
- [11] Dev S, Alskaf T, Hossari M, Godina R, Louwen A, Van Sark W. Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing. *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, SEST 2018 - Proceedings, 2018*. <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495816>.
- [12] Lindig S, Kaaya I, Weis KA, Moser D, Topic M. Review of statistical and analytical degradation models for photovoltaic modules and systems as well as related improvements. *IEEE J Photovolt* 2018;8. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2870532>.
- [13] Monteiro C, Fernandez-Jimenez LA, Ramirez-Rosado IJ, Muñoz-Jimenez A, Lara-Santillan PM. Short-term forecasting models for photovoltaic plants: Analytical versus soft-computing techniques. *Math Probl Eng* 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/767284>.
- [14] dos Santos LLC, Canha LN, Bernardon DP. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. *Renew Energy* 2018;116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.088>.
- [15] Alhousni FK, Alnaimi FBI, Okonkwo PC, Ben Belgacem I, Mohamed H, Barhoumi EM. Photovoltaic Power Prediction Using Analytical Models and Homer-Pro: Investigation of Results Reliability. *Sustainability (Switzerland)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/su15118904>.
- [16] Pérez Archila LM, Bastidas Rodríguez JD, Correa R. Implicit modelling of series-parallel photovoltaic arrays using double-diode model and its solution. *Solar Energy* 2021;214. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.036>.
- [17] Archila LMP, Bastidas-Rodríguez JD, Correa R, Grisales LAT, Gonzalez-Montoya D. A solution of implicit model of series-parallel photovoltaic arrays by using deterministic and metaheuristic global optimization algorithms. *Energies (Basel)* 2020;13. <https://doi.org/10.3390/en13040801>.
- [18] Auzinger W, Pukach P, Stolyarchuk R, Vovk M. Adaptive Numerics for Linear ODE Systems with Time-Dependent Data; Application in Photovoltaics. *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 2020*. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109442>.
- [19] Boulfaf N, Ait Laasri EH, Hamid N, Elyaqouti M, Ghafiri A, Chaoufi J. Modelling and simulation of a photovoltaic module using finite element method: transient analysis. *International Journal of Ambient Energy* 2023;44. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2173650>.
- [20] Chouchen B, Gazzah MH, Bajahzar A, Belmabrouk H. Numerical modeling of the electronic and

- electrical characteristics of InGaN/GaN-MQW solar cells. *Materials* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/ma12081241>.
- [21] Springer M, Bosco N. On Residual Stresses and Reference Temperatures in Thermomechanical Simulations of Photovoltaic Modules Using the Finite Element Method. *IEEE J Photovolt* 2022;12. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3143458>.
- [22] Wang Y, Qi Y, Li J, Huan L, Li Y, Xie B, et al. The Wind and Photovoltaic Power Forecasting Method Based on Digital Twins. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023;13. <https://doi.org/10.3390/app13148374>.
- [23] Liang J, Qiao K, Yuan M, Yu K, Qu B, Ge S, et al. Evolutionary multi-task optimization for parameters extraction of photovoltaic models. *Energy Convers Manag* 2020;207. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112509>.
- [24] Campana PE, Landelius T, Andersson S, Lundström L, Nordlander E, He T, et al. A gridded optimization model for photovoltaic applications. *Solar Energy* 2020;202. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.076>.
- [25] Zhang G, Wang X. Digital twin modeling for photovoltaic panels based on hybrid neural network. *Proceedings 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, DTPI 2021*, 2021. <https://doi.org/10.1109/DTPI52967.2021.9540210>.
- [26] Cervera-Gascó J, Montero J, Del Castillo A, Tarjuelo JM, Moreno MA. EVASOR, an integrated model to manage complex irrigation systems energized by photovoltaic generators. *Agronomy* 2020;10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030331>.

References

- [1] Maka AOM, Alabid JM. Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy* 2022;6. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>.
- [2] Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renew Energy* 2020;146:2589–625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>.
- [3] Deihimi MH, Naghizadeh RA, Meyabadi AF. Systematic derivation of parameters of one exponential model for photovoltaic modules using numerical information of data sheet. *Renew Energy* 2016;87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.066>.
- [4] Murtaza AF, Munir U, Chiaberge M, Di Leo P, Spertino F. Variable parameters for a single exponential model of photovoltaic modules in crystalline-silicon. *Energies (Basel)* 2018;11. <https://doi.org/10.3390/en11082138>.
- [5] Patra B, Nema P, Khan MZ, Khan O. Optimization of solar energy using MPPT techniques and industry 4.0 modelling. *Sustainable Operations and Computers* 2023;4. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.10.001>.
- [6] Mastrocinque E, Ramirez FJ, Honrubia-Escribano A, Pham DT. Industry 4.0 enabling sustainable supply chain development in the renewable energy sector: A multi-criteria intelligent approach. *Technol Forecast Soc Change* 2022;182. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121813>.
- [7] De Falco P, Di Noia LP, Rizzo R. Exponential Smoothing Model for Photovoltaic Power Forecasting. *Proceedings of 2021 9th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2021*, 2021. <https://doi.org/10.1109/MPS52805.2021.9492538>.
- [8] Martynyuk V, Fedula M, Petrus R, Makaryshkin D, Kovtun L. Solar Cell data acquisition system. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2019* 2019;1:140–5. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924386>.
- [9] Xu HY, Zhang Q. Photovoltaic Power Generation Prediction Technology based on Digital Twin and Improved LSTM. *Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* 2023;38. <https://doi.org/10.16146/j.cnki.mdlgc.2023.02.012>.
- [10] Fernández EF, Ferrer-Rodríguez JP, Almonacid F, Pérez-Higueras P. Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels. *Solar Energy* 2017;155. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.012>.
- [11] Dev S, Alkaif T, Hossari M, Godina R, Louwen A, Van Sark W. Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing. *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, SEST 2018 - Proceedings*, 2018. <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495816>.
- [12] Lindig S, Kaaya I, Weis KA, Moser D, Topic M. Review of statistical and analytical degradation models for photovoltaic modules and systems as well as related improvements. *IEEE J Photovolt* 2018;8. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2870532>.
- [13] Monteiro C, Fernandez-Jimenez LA, Ramirez-Rosado IJ, Muñoz-Jimenez A, Lara-Santillan PM. Short-term forecasting models for photovoltaic plants: Analytical versus soft-computing techniques. *Math Probl Eng* 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/767284>.
- [14] dos Santos LLC, Canha LN, Bernardon DP. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. *Renew Energy* 2018;116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.088>.
- [15] Alhousni FK, Alnaimi FBI, Okonkwo PC, Ben Belgacem I, Mohamed H, Barhoumi EM. Photovoltaic Power Prediction Using Analytical Models and Homer-Pro: Investigation of Results Reliability. *Sustainability (Switzerland)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/su15118904>.
- [16] Pérez Archila LM, Bastidas Rodríguez JD, Correa R. Implicit modelling of series-parallel photovoltaic arrays using double-diode model and its solution. *Solar Energy* 2021;214. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.036>.
- [17] Archila LMP, Bastidas-Rodríguez JD, Correa R, Grisales LAT, Gonzalez-Montoya D. A solution of implicit model of series-parallel photovoltaic arrays by using deterministic and metaheuristic global optimization algorithms. *Energies (Basel)* 2020;13. <https://doi.org/10.3390/en13040801>.
- [18] Auzinger W, Pukach P, Stolyarchuk R, Vovk M. Adaptive Numerics for Linear ODE Systems with Time-Dependent Data; Application in Photovoltaics. *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, 2020. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109442>.
- [19] Boulfaf N, Ait Laasri EH, Hamid N, Elyaqouti M, Ghafiri A, Chaoufi J. Modelling and simulation of a photovoltaic module using finite element method: transient analysis. *International Journal of Ambient Energy* 2023;44. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2173650>.
- [20] Chouchen B, Gazzah MH, Bajahzar A, Belmabrouk H. Numerical modeling of the electronic and electrical characteristics of InGaN/GaN-MQW solar cells. *Materials* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/ma12081241>.
- [21] Springer M, Bosco N. On Residual Stresses and Reference Temperatures in Thermomechanical Simulations of Photovoltaic Modules Using the Finite Element Method. *IEEE J Photovolt* 2022;12. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3143458>.

- [22] Wang Y, Qi Y, Li J, Huan L, Li Y, Xie B, et al. The Wind and Photovoltaic Power Forecasting Method Based on Digital Twins. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023;13. <https://doi.org/10.3390/app13148374>.
- [23] Liang J, Qiao K, Yuan M, Yu K, Qu B, Ge S, et al. Evolutionary multi-task optimization for parameters extraction of photovoltaic models. *Energy Convers Manag* 2020;207. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112509>.
- [24] Campana PE, Landelius T, Andersson S, Lundström L, Nordlander E, He T, et al. A gridded optimization model for photovoltaic applications. *Solar Energy* 2020;202. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.076>.
- [25] Zhang G, Wang X. Digital twin modeling for photovoltaic panels based on hybrid neural network. *Proceedings 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence, DTPI 2021, 2021*. <https://doi.org/10.1109/DTPI52967.2021.9540210>.
- [26] Cervera-Gascó J, Montero J, Del Castillo A, Tarjuelo JM, Moreno MA. EVASOR, an integrated model to manage complex irrigation systems energized by photovoltaic generators. *Agronomy* 2020;10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030331>.