

## АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ТА ЇХ ЗМІНЕННЯ ПРИ РІЗНИХ РІВНЯХ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ

Отримано 11 вер. 2023 р.; рекомендовано до публікації 20 вер. 2023 р.  
Доступно онлайн 30 вер. 2023 р.

О. Ю. Гаєвський<sup>1</sup>, В. Ю. Іванчук<sup>2</sup>, Г. М. Гаєвська<sup>3</sup>

<sup>1</sup> д-р фіз.-мат. наук, професор, пров. наук. співр.

Автор для кореспонденції: Олександр Гаєвський,  
e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

<http://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

<sup>2</sup> аспірант, молод. наук. співроб.

<http://orcid.org/0000-0002-0585-9610>

<sup>3</sup> старш. викладач.

<http://orcid.org/0000-0001-7760-6789>

**Анотація.** Досліджено характеристики та параметри фотоелектричних модулів (ФМ), які отримані шляхом швидкого сканування вольт-амперних характеристик (ВАХ) за допомогою автоматизованої виміральної системи на мікрокомп'ютерній платформі Raspberry Pi. Розроблено теоретичну модель та алгоритм обробки даних для аналізу змінення параметрів ФМ з напругою й отримання їх взаємозалежностей. Чисельне визначення цих параметрів дає змогу охарактеризувати електричні втрати й процеси рекомбінації в фотоелементах при різних зовнішніх умовах. Показано, що в окремих областях напруги поблизу точки максимальної потужності коефіцієнт неідеальності рп-переходу А може набувати великих значень (до 4-5), що характерно для ФМ, виготовлених за сучасними технологіями. Проаналізовано змінення послідовного опору  $R_s$  і фактора А поблизу напруги холостого ходу залежно від рівня сонячної радіації.

<sup>1,2,3</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.

<sup>1,2</sup> Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна.

**Ключові слова:** фотоелектричний модуль, вольт-амперна характеристика, фактор неідеальності, послідовний опір, рекомбінація, електричні втрати.

## ANALYSIS OF THE INTERDEPENDENCES OF THE PARAMETERS OF PV MODULES AND THEIR CHANGES AT DIFFERENT LEVELS OF SOLAR RADIATION

Received Sept. 11, 2023; accepted Sept. 20, 2023  
Available online Sept. 30, 2023

О. Gaevskii<sup>1</sup>, V. Ivanchuk<sup>2</sup>, A. Gaevska<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dr. of Phys. Math. Sci., Prof., Lead. Sci. Assoc.

<http://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

<sup>2</sup> PhD student, Res. Assist.

<http://orcid.org/0000-0002-0585-9610>

<sup>3</sup> Senior Teacher.

<http://orcid.org/0000-0001-7760-6789>

Author for correspondence: Oleksandr Gaevskii,  
e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

**Summary.** It had been investigated the characteristics and parameters of photovoltaic modules (PVM), which obtained by fast scanning of I-V characteristics by an automated measurement system on the Raspberry Pi microcomputer platform. A theoretical model and a data processing algorithm have been developed for the analysis of changes in FM parameters with voltage and obtaining their mutual dependencies. Numerical determining of these parameters allows characterize an electrical losses and recombination processes in PV cells under various external conditions. It had been shown that in some areas of the voltage near the maximum power point, the non-ideality factor of the pn-junction A can take a large values (up to 4-5), which is typical for PVM

<sup>1,2,3</sup> NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

<sup>1,2</sup> Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

manufactured using modern technologies. The changes of the series resistance  $R_s$  and factor  $A$  in the vicinity of the open circuit voltage under various solar radiation level were analyzed.

**Key words:** PV module, current-voltage characteristic, non-ideality factor, series resistance, recombination, electrical losses.

**Вступ і постановка задачі.** Ефективність фотоелектричних модулів (ФМ) безпосередньо пов'язана з їхніми параметрами, що характеризують генерувальну здатність і електричні втрати, а також вплив зовнішніх умов. Найважливіші параметри ФМ зазвичай розраховують на основі навантажувальних вольт-амперних характеристик (ВАХ) при різних рівнях сонячної радіації й температури. Найпоширенішими теоретичними моделями для визначення параметрів ФМ є однодіодна та дводіодна моделі (див., наприклад, огляди [1–4]), що подаються у вигляді схем заміщення. Ці схеми складаються з джерела струму  $I_{ph}$ , одного або двох діодів Шоклі, що описують  $pn$ -перехід, а також послідовного  $R_s$  та паралельного  $R_p$  опорів, які враховують електричні втрати (рис. 1, а, б).

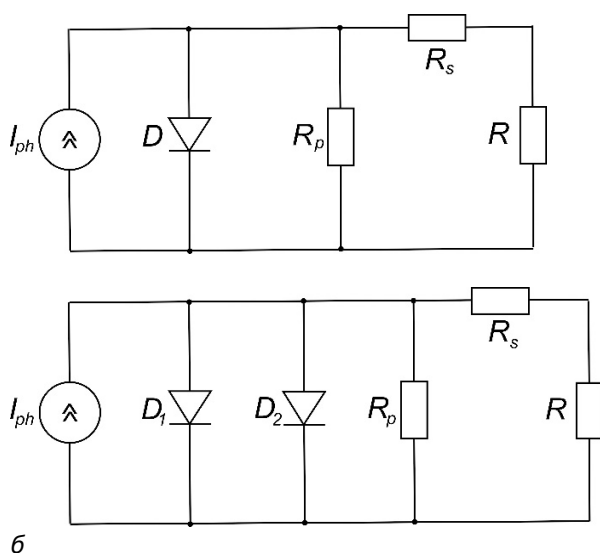


Рис. 1. Еквівалентні схеми заміщення ФМ: а – однодіодна (1D); б – дводіодна (2D)

Fig. 1. Equivalent circuit of the PV module: a – single diode (1D); b – two diode (2D)

Проблеми, які розглядатимемо в цій статті, характерні для обох моделей, тому основну увагу приділимо однодіодній моделі (1D-модель на рис. 1, а). Навантажувальна ВАХ  $I(V)$  для неї описується з використанням класичної моделі  $pn$ -переходу Шоклі – Ріда [5] у вигляді, наприклад, такого рівняння [6]:

$$F = I \left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - I_{ph} + \frac{V}{R_p} + I_0 \left( e^{\frac{V + I R_s}{A n_s V_T}} - 1 \right) = 0, \quad (1)$$

де  $I_{ph}$  – струм фотогенерації,  $I_0$  – зворотний струм насичення діода,  $R_s$  і  $R_p$  – послідовний і паралельний опори електричних втрат,  $A$  – фактор неідеальності діода,  $n_s$  –

кількість послідовно з'єднаних фотоелектричних комірок у ФМ.

В (1) введено температурно-залежну величину

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{«теплова» напруга}),$$

$k$  – постійна Больцмана,  $T$  – температура,  $q$  – заряд електрона.

Серед даних літератури [2–4] існують деякі протиріччя, особливо щодо параметрів, пов'язаних з процесами електричних втрат та рекомбінації. Наприклад, чисельні значення  $R_s$ ,  $R_p$ , які отримані для того самого модуля різними методами, можуть різнитися у кілька разів, а  $I_0$  – навіть на кілька порядків. Це свідчить, на нашу думку, або про недоліки вибраних оптимізаційних процедур, або про неадекватність діодних моделей з постійними значеннями шуканих параметрів на всьому діапазоні відліків.

Конструкція ФМ (наприклад, виготовлених за технологією PERC або PERL) включає різні резистивні внески в сумарні електричні втрати: омичні об'ємні опори напівпровідників, контактні опори, опори витоку. В простих еквівалентних схемах заміщення на рис. 1 для опису об'ємних опорів шарів матеріалів і контактних опорів у конструкції ФМ введено послідовний опір втрат  $R_s$ . Від нього залежить положення точки максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP) на кривій ВАХ і, що найважливіше, – ефективність ФМ, тобто відношення електричної потужності одиничної площі модуля до інтегральної інтенсивності падаючого сонячного випромінювання. При збільшенні  $R_s$  робоча точка (MPP) зміщується в бік меншої напруги і, відповідно, падає потужність у навантаженні [6]. У процесі тривалої експлуатації фотоелектричних станцій відбувається поступове збільшення електричних і теплових втрат у ФМ, тому велике значення має розробка ефективного оперативного методу визначення параметра  $R_s$ .

Значення  $R_s$  не може бути виміряне безпосередньо і, по суті, являє собою окрему проблему, різні методи розв'язання якої пропонувалися на різних етапах розвитку фотоелектрики [7–9]. Всі методи, відомі на той час, в роботі [8] розбито на три категорії: методи, що оперують з даними ВАХ; методи, в яких використовують похідні від функції ВАХ, і, нарешті, методи, пов'язані із застосуванням інтегралів або комбінацій інтегралів із похідними та функціями ВАХ. Частина методів, крім освітленої ВАХ, вимагає вимірювання темної ВАХ, тобто кривої  $I(V)$  за відсутності освітлення. Деякі методи вимагають графічної побудови ще й третьої кривої ВАХ при змінній освітленості [9]. Процедuru визначення  $R_s$  прописано також у стандарті IEC 60891:2021 Міжнародної електротехнічної комісії [10].

Параметрами, які обумовлені процесами рекомбінації носіїв заряду, в діодних схемах заміщення є  $I_0$  та  $A$ . У цій роботі ми розглядаємо параметри, які можуть змінюватись з напругою зміщення на діоді, тобто з напругою навантаження. Зворотний струм насичення  $I_0$  згідно з відомими механізмами рекомбінації Оже, Шоклі – Ріда – Холла залежить від концентрації носіїв (ступеня легування напівпровідників і температури) та геометричних розмірів (товщини шару матеріалу) [11]. Оскільки  $I_0$  характеризує струм насичення при замкненому  $pn$ -переході, його можна вважати практично незалежним від напруги прямого зміщення  $V$ .

Інша ситуація з фактором неідеальності  $A$ : відповідно до класичних моделей [5] він може змінюватись з напругою  $V$  в інтервалі від 1 до 2. Для ідеального діода Шоклі без урахування рекомбінаційного струму  $A = 1$ , а в області низької напруги, коли суттєва рекомбінація, величина  $A$  може досягати 2. Обмеження, які накладаються на цей параметр при підганянні параметрів під експериментальні дані 1D-моделі, – вважається  $A$  постійним у всьому інтервалі напруги, в 2D-моделі кожен діод має свої постійні параметри  $A$  в інтервалі (1, 2). У роботах [1–4] подається дуже докладний огляд сучасних оптимізаційних методів розрахунку цього параметра, а також інших параметрів схем заміщення 1D, 2D.

На відміну від згаданих вище дещо формальних підходів є низка статей (наприклад, [12–14]), в яких описано ефект змінення  $A$  з напругою або струмом через  $pn$ -перехід, досліджуваний протягом багатьох років. Фактор неідеальності на деяких інтервалах напруги може бути значно вищий, досягаючи 4 і 5. У цій роботі розглядаються можливості використання змінних параметрів  $A$  і  $R_s$  при інтерпретації характеристик ФМ.

Нами використовуються результати швидкісного сканування ВАХ модулів у реальних (польових) умовах за допомогою мікроконтролерних систем отримання та обробки даних. Опис конструкції приладу для автоматизованих вимірювань ВАХ наведено в наших роботах [15, 16]. Метод дає змогу оперативно обчислювати рівень електричних втрат ФМ в умовах їх експлуатації на

фотоелектричних станціях. Завдяки особливостям алгоритму і способу вимірювань можливе досить точне визначення ВАХ в умовах змінної сонячної радіації й температури, а також оперативна діагностика поточного стану фотомодулів.

**Опис моделі.** Найбільший вплив  $R_s$  на форму ВАХ фотомодуля спостерігається при великих напругах  $V$  на навантаженні, особливо в області холостого ходу (Open Circuit, OC) [5, 6]. Будемо знаходити  $R_s$  через диференціальну провідність  $G_{oc}$ , тобто нахил кривої ВАХ на цій ділянці, що визначається частковими похідними від уявної функції  $F$  (1) за напругою при  $V = V_{oc}$ , коли  $I = 0$ :

$$G_{oc} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{oc} = \left. - \frac{\partial F / \partial V}{\partial F / \partial I} \right|_{oc} = \frac{1/R_p + Q_{oc}}{1 + R_s/R_p + R_s Q_{oc}}, \quad (2)$$

де, як і в роботі [17], введена величина

$$Q_{oc} = \frac{I_0}{An_s V_T} e^{\frac{V_{oc}}{An_s V_T}}. \quad (3)$$

Формула (2) дає можливість розрахувати  $R_s$ , якщо відомі нахил ВАХ у точці холостого ходу та значення інших параметрів  $A$ ,  $I_0$ ,  $R_p$ . Але цей набір параметрів можна скоротити завдяки певним чисельним оцінкам, для яких треба розглянути вихідні дані. Експериментальні дані, наведені в цій роботі, отримані для монокристалічного кремнієвого ФМ потужністю 300 Вт, виготовленого за технологією PERC з кількістю послідовних комірок  $n_s = 60$ . Температура повітря при вимірюваннях складала приблизно 25 °C, відповідне значення «теплової» напруги  $V_T = 0,0256$  В. Якщо  $A$  лежить в інтервалі (1,2), постійний коефіцієнт  $(An_s V_T)^{-1}$  в (3), що залежить тільки від конструкції ФМ і температури, має значення від 0,65 до 0,33. Для обчислення добутку дуже малої величини  $I_0$  і дуже великої експоненти в (3) скористаємося рівнянням (1) для точки ОС і запишемо вираз для струму через діод  $I_d$ :

$$I_d|_{oc} \equiv I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p} = I_0 \left( e^{\frac{V_{oc}}{An_s V_T}} - 1 \right) \approx I_0 e^{\frac{V_{oc}}{An_s V_T}} \approx I_{ph}. \quad (4)$$

Оскільки  $\frac{V_{oc}}{R_p} \ll I_{ph}$ , для  $Q_{oc}$  отримуємо з точністю до  $\sim 10^{-2}$  оцінку

$$Q_{oc} \approx \frac{I_{ph}}{An_s V_T}, \quad (5)$$

що для модулів зазначеного типу при освітленні, наприклад,  $\sim 900$  Вт/м<sup>2</sup> ( $I_{ph} \sim 8$  А), становить  $5,2 \div 2,6$  при змінненні  $A$  в інтервалі (1,2).

Якщо крім наведених значень врахувати реальні значення параметрів для розглянутого типу ФМ, а саме,

$V_{oc} \sim 35$  В,  $I_{ph} \sim 8$  А, фактор  $A \sim 1,5$ ,  $R_p \sim 300$  Ом,  $R_s < 1$  Ом і  $R_s/R_p \ll 1$ , то можна зробити спрощення у виразі (2). У результаті отримуємо з відносною похибкою  $\sim 10^{-2}$  формулу для послідовного опору  $R_s$  [17]:

$$R_s = R_{oc} - \frac{1}{Q_{oc}}, \quad (6)$$

де введено позначення  $R_{oc} = G_{oc}^{-1}$  для диференціального опору в точці ОС. Величина поправки  $Q_{oc}^{-1}$ , як впливає з (3), істотно залежить від коефіцієнта

неідеальності рп-переходу  $A$ , тобто від внеску процесів рекомбінації в результуючий струм.

У цій роботі величину  $A$  оцінюватимемо за експериментальними даними таким чином. Продиференціюємо за напругою логарифм виразу (4) для струму через діод  $I_d$  і виразимо фактор неідеальності через отриману похідну:

$$A = \left( n_s V_T \frac{d \ln I_d}{dV} \bigg|_{oc} \right)^{-1}, \quad (7)$$

де  $I_d$  обчислюємо як різницю між струмом генерації й струмом у навантаженні:  $I_d \approx I_{ph} - I$ .

**Експериментальні дані та обробка результатів.** У цій роботі досліджувались монокристалічні кремнієві ФМ Risen потужністю 285 Вт, встановлені з орієнтацією на південь під кутом нахилу  $\beta = 35^\circ$  над горизонтальною поверхнею. Для вимірювання ВАХ і автоматизованого опрацювання даних використовували метод заряджання конденсатора, реалізований на платформі Raspberry Pi [16]. Завдяки малому часу сканування повної ВАХ (менш ніж 1 с.) рівень сонячної радіації й температуру модуля під час вимірювання можна було вважати незмінними.

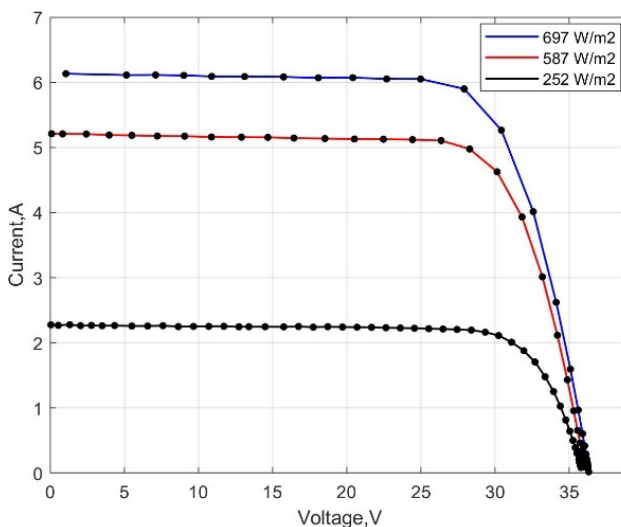
Далі отримані дані відповідно до моделі (див. попередній розділ) опрацьовували на ПК у пакеті MATLAB. Алгоритм обробки складався з таких етапів:

1. Завантаження експериментальних даних  $\{V_i, I_i\}$  ( $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  – кількість відліків), очищення від значень, що повторюються, сортування за зростанням.
2. Кусково-поліноміальна апроксимація згідно з раніше розробленою схемою [18].
3. Отримання рівномірно розподілених точок уздовж апроксимаційної кривої ВАХ, які вносили б однакову вагу в подальші обчислювальні процедури згідно з теоретичною моделлю.
4. Обчислення характеристик і параметрів ФМ, наприклад величин  $R_s$  (6) та  $A$ (7).

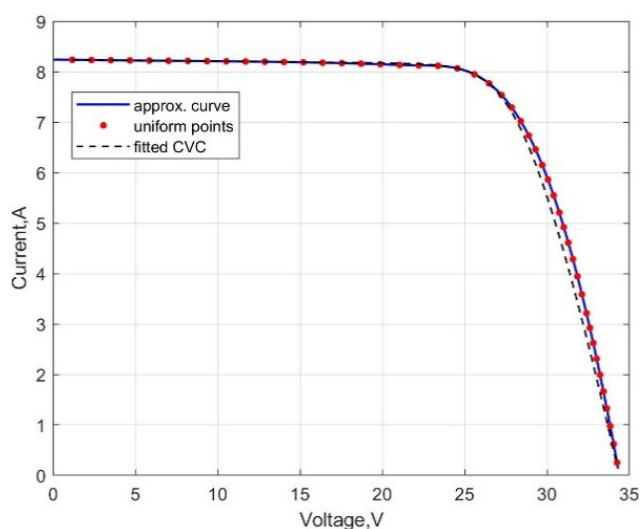
Первинні дані вимірювань, виконаних за допомогою розробленого нами приладу, виводяться на сенсорний екран та передаються на ПК у послідовний порт. Приклад обробки цих даних на першому етапі наведено на рис. 2, а, на якому кожна крива ВАХ відповідає певній інтенсивності радіації (в одиницях Вт/м<sup>2</sup>).

Подальша обробка отриманих ВАХ (етапи 2, 3) полягає в згладжуванні первинних даних і апроксимації їх спеціальними модельними функціями (рис. 2, б). Для точного отримання необхідних параметрів та характеристик процесів, що протікають у модулі при зміні навантаження, на отриманій апроксиманті (синя лінія) з однаковим інтервалом по довжині кривої розміщуються точки нових відліків (червоні), що використовуються при подальших розрахунках. На основі цих відліків виконується визначення (припасування) п'яти параметрів

однотіодної моделі  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $A$  фотомодуля (етап 4). Вольт-амперна характеристика, яка розрахована з використанням одержаних параметрів, показана на рис. 2, б пунктирною лінією.



а



б

Рис. 2. Приклад вольт-амперних характеристик на послідовних етапах їх обробки: а – первинні (необроблені) дані при різних рівнях сонячної радіації; б – результуюча крива ВАХ (суцільна синя) з рівномірно розподіленими відліками (червоні крапки) та припасована крива 1D-моделі (пунктирна)

Fig. 2. An example of current-voltage characteristics at processing stages: а – primary (unprocessed) data at different levels of solar radiation; б – the resulting I-V curve (solid blue) with evenly distributed readings (red dots) and the fitted curve for 1D model (dashed)

Результати розрахунків за формулами (2) – (7) показані на рисунках нижче. Графік на рис. 3, а для залежності  $\frac{d \ln I_d}{dV}$  демонструє тенденцію до суттєвого змінення

параметра  $A$  з напругою – від 1 до 6. Найбільші значення  $A$  досягаються в інтервалі напруги (0,3 В, 0,4 В) на комірці, або (18 В, 24 В) – на фотомодулі. Як приклад на рис. 3 наведено залежність фактора неідеальності  $A$  в області, близькій до режиму холостого ходу. Як бачимо, на невеликому інтервалі напруги поблизу  $V_{oc}$  значення  $A$  зростає до 2 і більше. Така поведінка, що спостерігається також на графіках статей [19, 20], пояснювалась авторами цих робіт рекомбінацією в приповерхневій області у торців фотоелектричних комірок (або модулів) та у борозенок лицьової поверхні, в яких розміщені нитки металевих контактів.

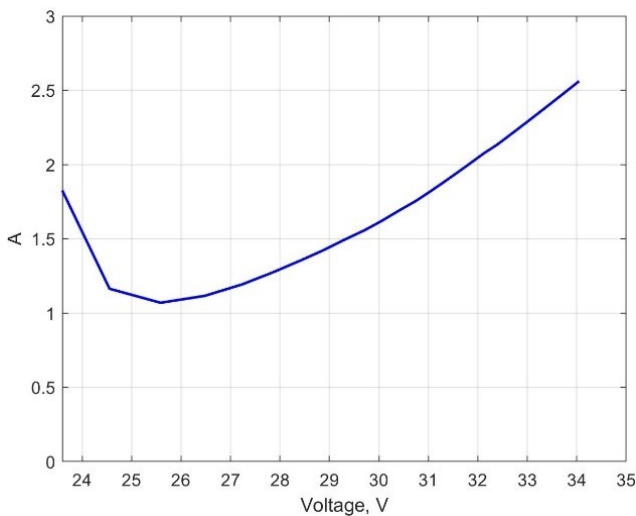
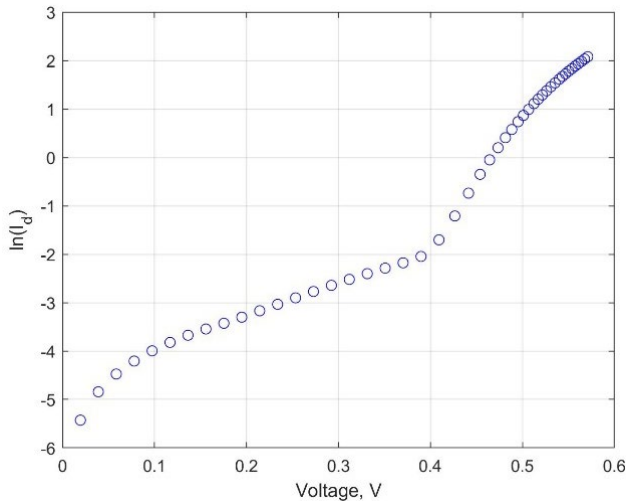


Рис. 3. Графіки залежності від напруги  $V$ : а – логарифм струму  $I_{ph}$ ; б – фактор неідеальності  $A$

Fig. 3. Plots for dependences on the voltage  $V$ : а –  $\ln(I_{ph})$ ; б – nonideality factor  $A$

Значення  $A$  в області холостого ходу дозволяють обчислити послідовний опір  $R_s$  за формулами (5), (6). У цій області нахил ВАХ дуже суттєво залежить від інтенсивності радіації, як видно з кривих на рис. 2, а: зі зменшенням рівня радіації зменшується нахил і відповідно зростає величина  $R_{oc}$ , через яку виражається  $R_s$  (6). Поправка до  $R_{oc}$  у формулі (6) залежить від фактора неідеальності  $A$ .

Останній, як випливає з (7), обернено пропорційний до логарифму фотоструму  $I_{ph}$ , тобто слід очікувати зменшення  $A$  зі зменшенням  $I_{ph}$ . Графічно ці залежності  $R_{oc}(I_{ph})$  і  $A(I_{ph})$  відображені на рис. 4. Вказані різні тенденції змінення  $R_{oc}$  і  $A$  взаємно компенсуються, в результаті послідовний опір втрат  $R_s$  повільніше змінюється з радіацією. Так при зростанні  $I_{ph}$  від 2,3 до 8,5 А величина  $R_s$  зменшується від 0,28 до 0,17 Ом.

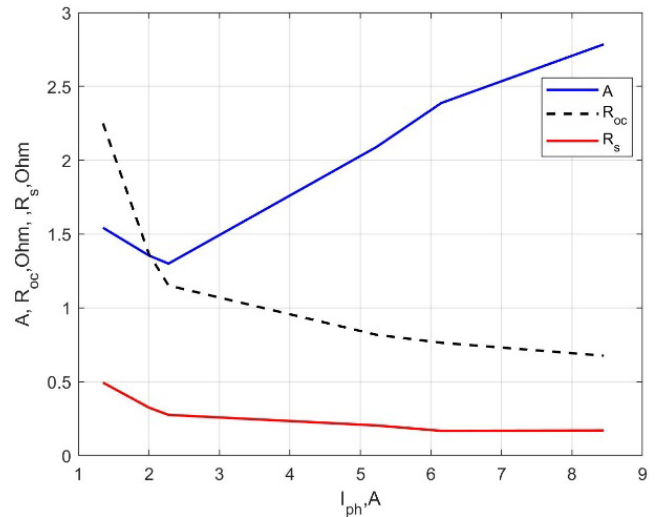


Рис. 4. Графіки змінення фактора неідеальності  $A$  (синя крива), опорів  $R_{oc}$  і  $R_s$  (пунктирна та червона криві) при  $V = V_{oc}$  зі зміною фотоструму  $I_{ph}$  (діапазон сонячної радіації 250–700 Вт/м<sup>2</sup>)

Fig. 4. Plots for changes of the nonideality factor  $A$  (blue curve), resistances  $R_{oc}$  and  $R_s$  (dashed and red curves) at  $V = V_{oc}$  with a photocurrent  $I_{ph}$  change (solar radiation range 250–700 W/m<sup>2</sup>)

**Висновки.** Модель та алгоритм, що розроблені в цій роботі, дозволяють визначити параметри ФМ та змінення їх з напругою на модулі та з рівнем сонячної радіації. Експериментальні дослідження були проведені на монокристалічному кремнієвому ФМ при різних рівнях сонячної радіації. В результаті обробки даних з ВАХ були розраховані параметри модуля, проаналізовані їх взаємні залежності, а також залежності від напруги та рівня фотогенерації.

Для параметрів, що характеризують електричні втрати та рекомбінаційні процеси в фотоелектричних комірках, можна зробити такі висновки:

- фактор неідеальності  $A$  при підвищенні напруги (зростанні опору  $R$  активного навантаження) поступово змінюється від значень класичної моделі Шоклі – Ріда до 4-5 в області MPP, потім спадає до малих значень і при наближенні до напруги  $V_{oc}$  знову зростає до 2 і більше;
- в області холостого ходу послідовний опір  $R_s$  зростає при зниженні рівня радіації й відповідно зниженні  $I_{ph}$ ;
- отримані значення  $R_s$  поблизу точки  $V_{oc}$  лежать в діапазоні 0,17–0,49 при інтенсивності радіації 900–250 Вт/м<sup>2</sup>.

## ПОСИЛАННЯ

1. Ali M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, H. Hamada. Solar cell parameters ex-traction based on single and double-diode models: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P. 494–509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
2. R. Venkateswari, N. Rajasekar. Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems // *Electrical Energy Systems*, 2021. Vol. 31. N 11, 13113. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13113>.
3. A. M. Shaheen, R. A. El-Seheimy, G. Xiong et al. Parameter identification of solar photovoltaic cell and module models via supply demand optimizer/ *Ain Shams Engineering Journal*. 2022. Vol. 13. N 4, 101705. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101705>.
4. Abhishek Sharma, Abhinav Sharma, M. Averbukh et al. Performance investigation of state-of-the-art metaheuristic techniques for parameter extraction of solar cells/module. *Nature. Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37824-4>.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. 2 изд. М.: Мир. 1984. 458 с.
6. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина I. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі [Електронний ресурс]: підручник. Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. 150 с.
7. M. Wolf, H. Rauschenbach. Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements. *Advanced Energy Conversion*. Pergamon Press. 1963. Vol. 3. P. 455–479.
8. G.M.M.W. Bissels, J.J. Schermer, M.A.H. Asselbergs et al. Theoretical review of series resistance determination methods for solar cells. Review // *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2014. Vol. 130. p. 605–614. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.003>.
9. D. Pysch, A. Mette, S.W. Glunz A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007. Vol. 91. N 18. P. 1698–1706.
10. IEC 60891:2021. Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. <https://webstore.iec.ch/publication/61766>.
11. A. Cuevas. The recombination parameter  $J_0$ / *Energy Procedia*. 2014. Vol. 55. P. 53–62.
12. H. J. Queisser. Forward Characteristics and Efficiencies of Silicon Solar Cells. *Solid-State Electronics*. 1962. Vol. 5. p. 1–10.
13. K.R. McIntosh, C.B. Honsberg: The Influence of Edge Recombination on A Solar Cell's I-V Curve // 16 European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 2000. <https://www.researchgate.net/publication/247910506>.
14. S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck et al. Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation. *Journ. Appl. Phys.* 2011. Vol. 110. 014515.
15. О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук, І. О. Корнієнко та ін. Алгоритм і програмне забезпечення для Arduino-системи тестування фотоелектричних модулів. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 1. С. 42–49. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1\(64\).42-49](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1(64).42-49).
16. О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук. Автономна система вимірювання на основі мікрокомп'ютера для тестування фотоелектричних модулів. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 3 (70). С. 54–61. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).54-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).54-61).
17. A.Yu. Gaevskii. Method for determining parameters of PV modules in field conditions // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, Ukraine. 2019. P. 205–208.
18. Гаєвська Г. М. Алгоритм апроксимації вольт-амперних характеристик фотомодулів в умовах часткового затінення. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 3 (58). С. 21–29. doi: 10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29.
19. S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck et al. Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation. *Journ. Appl. Phys.*, 2011. Vol. 110, 014515.
20. S. Breitenstein, P. Altermatt, K. Ramspeck, M. A. Green et al. Interpretation of the Commonly Observed I-V Characteristics of C-Si Cells Having Ideality Factor Larger Than Two // 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Waikoloa, USA. 2006. P. 879–884, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279597.

## REFERENCES

1. Ali M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, H. Hamada. Solar cell parameters ex-traction based on single and double-diode models: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Vol. 56. P. 494–509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
2. R. Venkateswari, N. Rajasekar. Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems. *Electrical Energy Systems*. 2021. Vol. 31. N 11. 13113. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13113>.
3. A. M. Shaheen, R.A. El-Seheimy, G. Xiong et al. Parameter identification of solar photovoltaic cell and module models via supply demand optimizer. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022. Vol. 13. N 4. 101705. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101705>.

4. Abhishek Sharma, Abhinav Sharma, M. Averbukh et al. Performance investigation of state-of-the-art meta-heuristic techniques for parameter extraction of solar cells/module. *Nature. Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37824-4>.
5. Sze S. *Physics of semiconductor devices*. 2 ed. 1984. 458 p.
6. Gaevskii A. *Photovoltaics. Part I. Solar radiation and photovoltaic modules*. Textbook NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 2023. 150 p.
7. M. Wolf, H. Rauschenbach. Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements // *Advanced Energy Conversion*. Pergamon Press. 1963. Vol. 3. P. 455–479.
8. G. M. M. W. Bissels, J. J. Schermer, M. A. H. Asselbergs et al. Theoretical review of series resistance determination methods for solar cells. *Review // Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2014. Vol. 130. P.605–614. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.003>.
9. D. Pysch, A. Mette, S. W. Glunz A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007. Vol. 91. N 18. P. 1698–1706.
10. IEC 60891:2021. Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. <https://webstore.iec.ch/publication/61766>.
11. A. Cuevas. The recombination parameter  $J_0$ . *Energy Procedia*. 2014. Vol. 55. P. 53–62.
12. H. J. Queisser. Forward Characteristics and Efficiencies of Silicon Solar Cells. *Solid-State Electronics*. 1962. Vol. 5. P. 1–10.
13. K.R. McIntosh, C.B. Honsberg: The Influence of Edge Recombination on A Solar Cell 's I-V Curve // 16 European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 2000. <https://www.researchgate.net/publication/247910506>.
14. S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck et al. Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation. *Journ. Appl. Phys*. 2011. Vol. 110, 014515.
15. A. Gaevskii, V. Ivanchuk, I. Kornienko, V. Bodnyak. Algorithm and software for Arduino-based system for PV module testing. *Vidnovluvana Energetika*. 2021. No 1. P. 42–49. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).54-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).54-61).
16. A. Gaevskii, V. Ivanchuk. Autonomous measurement system based on microcomputer for testing photo-electric modules. *Vidnovluvana Energetika*. 2022. No 3 (70). P. 54–61. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).54-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).54-61).
17. A. Yu. Gaevskii. Method for determining parameters of PV modules in field conditions // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, Ukraine. 2019. P. 205–208.
18. A. Gaevskaya (2019). Approximation algorithm for PV modules current-voltage characteristics under shading conditions. *Vidnovluvana Energetika*. 2019. No 3 (58). P. 21–29. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).21-29](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29).
19. S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck et al. Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation. *Journ. Appl. Phys*. 2011. Vol. 110, 014515.
20. S. Breitenstein, P. Altermatt, K. Ramspeck, M. A. Green et al. Interpretation of the Commonly Observed I-V Characteristics of C-Si Cells Having Ideality Factor Larger Than Two // 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Waikoloa, USA. 2006. P. 879–884, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279597.