

Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними

Мартинюк^f В. І., ORCID [0000-0003-0882-5114](https://orcid.org/0000-0003-0882-5114)

Клен^s К. С., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Жуйков^s В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Кафедра електронних пристроїв та систем eds.kpi.ua

Факультет електроніки fel.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—В статті розглянуто методику знаходження параметрів еквівалентних схем заміщення сонячних панелей за допомогою даних, які надаються виробниками. Для вирішення трансцендентного рівняння, яке описує вихідну характеристику сонячних елементів, використовується метод простої ітерації, збіжність якого забезпечується використанням методу релаксації. Розроблена методика моделювання вольт-амперних характеристик застосована для одно- та двохдіодної схем заміщення сонячних панелей. Порівняльний аналіз показав, що однодіодна схема є більш актуальною, оскільки при її використанні спрощуються розрахунки та відпадає потреба в ряді припущень зі збереженням достатньої точності. Проведено порівняльний аналіз розробленої методики з існуючими і показано, що запропонована методика забезпечує найкращу точність апроксимації. При цьому для полікристалічних панелей похибка апроксимації збільшується через збільшене значення коефіцієнту ідеальності для даної технології виготовлення сонячних елементів.

Ключові слова — сонячні панелі; метод простої ітерації; метод релаксації; схема заміщення; вольт-амперна характеристика

I. Вступ

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють чималу роль у вирішенні проблеми зростаючих потреб людства в електроенергії. Основною перевагою використання подібних джерел являється значне скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу на відміну від традиційних джерел, які у процесі генерації використовують викопне паливо. Попри це ВДЕ мають значну кількість недоліків, серед яких: залежність вихідної потужності від погодних умов; низька щільність потоку енергії первинного носія; відносно висока вартість електроенергії [1].

Серед інших видів ВДЕ джерела на основі сонячної енергії займають ключові позиції, є широкодоступними, з практично невичерпною енергією, не містять механічних деталей, що полегшує їх експлуатацію [2]. У зв'язку з цим, починаючи з 90-х років, світовий ріст сукупної потужності сонячних перетворювачів енергії показував експоненціальний ріст [3], що робить сонячну енергетику, поряд з вітроенергетикою, найбільш швидко зростаючими за встановленою потужністю видами ВДЕ.

Основним фотоелектричним пристроєм є сонячний елемент, вихідна потужність якого доволі мала.

Тому для отримання необхідного значення напруги дані елементи з'єднують послідовно в герметичну і стійку до атмосферного впливу структуру — сонячна панель (модуль). Для отримання необхідних значень напруги і струму навантаження панелі послідовно-паралельно з'єднують в сонячний масив, що дозволяє проводити масштабування сонячних електростанцій. Оскільки недовіком використання сонячної енергетики є відносно малий ККД (18-25%), то для забезпечення найбільш ефективного використання сонячного випромінювання застосовуються пристрої відстеження точки максимальної потужності (ВТМП) [4]. Проте для проектування подібного пристрою необхідна імітаційна модель сонячного масиву, яка буде достатньо точно відтворювати зміну положення точки максимальної потужності при зміні умов навколишнього середовища. Враховуючи ієрархічну структуру сонячних масивів, моделювання сонячних елементів є невід'ємною частиною аналізу та прогнозування роботи реальних сонячних електростанцій. Найпоширенішим методом моделювання є використання різноманітних еквівалентних схем заміщення.

Тому метою даної статті є розробка методу визначення параметрів еквівалентних схем заміщення для



моделювання зовнішніх характеристик сонячних елементів.

II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ

Кожна схема заміщення має свої переваги та недоліки і розрахована на моделювання сонячного елемента в доволі вузькому діапазоні умов навколишнього середовища, і містить мінімум два елементи: джерело фотоструму I_{PV} та паралельно увімкнений діод VD1, який характеризує зворотній струм $p-n$ переходу (рис. 1, контур а). Така схема називається ідеалізованою, оскільки вона не враховує неідеальність напівпровідникової структури $p-n$ переходу та паразитні явища в ньому.

Перші схеми заміщення запропоновані незабаром після винайдення сонячних елементів [5] і складаються з джерела фотоструму і діоду та бар'єрної ємності C_J (рис. 1, контури а і г), яка впливає на перехідні процеси. Для врахування втрат енергії за рахунок омичних контактів та струму витікання вводять резистори: послідовний з опором R_s та шунтуючий з опором R_p (рис. 1, контури а і в). Першою сферою використання сонячних панелей було живлення штучних супутників, тому велика кількість праць даного періоду присвячена аналізу впливу космічного випромінювання на сонячні елементи та спробам відтворити умови космічного випромінювання [6-7]. Одночасно з цим проводився аналіз роботи сонячного елемента в умовах часткового затінення [8], а також використання його у якості фотодетектора оптичних імпульсів [9]. При цьому, в другому випадку, еквівалентна схема ускладнюється, оскільки сонячний перетворювач працює в імпульсному режимі і тому необхідно враховувати також дифузійну ємність C_D $p-n$ переходу (рис. 1, контур г).

В 70-х роках минулого століття збільшилась кількість досліджень пов'язаних з відновлюваними джерелами. Саме в цей період з метою підвищення точності апроксимації пропонують двохдіодну (інколи ще з подвійним експоненціалом) схему заміщення (рис. 1, контур б) сонячного елемента [10]. В цей же час пропонуються методики визначення параметрів даної схеми заміщення [11-12]. На відміну від однодіодної двохдіодна модель враховує рекомбінацію носіїв заряду за рахунок введення додаткового діоду. При цьому для спрощення розрахунків у режимі постійного струму в еквівалентній схемі не враховують бар'єрну C_J та дифузійну ємності C_D (рис. 1, контур г). Найбільш повна схема складається з елементів, що входять в контури б, в та г (рис. 1).

На сучасному етапі дослідження використовують як однодіодну, так і двохдіодну схеми заміщення [13-14]. При цьому фокус робіт змістився від удосконалення структури еквівалентної схеми заміщення до створення нових аналітичних і чисельних методів визначення параметрів даних схем на основі даних, які надають виробники сонячних елементів [15-17].

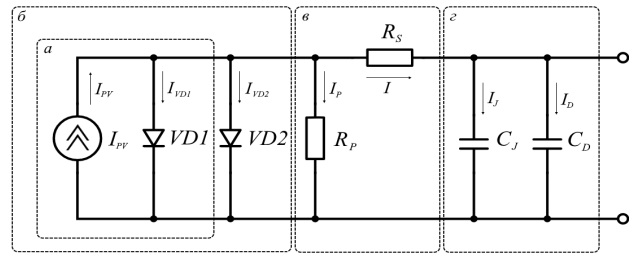


Рис. 1. Еквівалентні схеми заміщення сонячного елемента (а – однодіодна ідеалізована або спрощена; б – двохдіодна ідеалізована; в – опори R_s та R_p , які разом з контуром а або б дають практичну схему або з подвійним експоненціалом); г – бар'єрна C_J та дифузійна ємності C_D ; які разом з контуром а або б дають схему для аналізу перехідних процесів

При цьому існують роботи, присвячені збільшенню точності апроксимації еквівалентної схеми за рахунок введення додаткових елементів схеми [18]. Також існує чимала кількість робіт, присвячених порівняльному аналізу одно- та двохдіодних схем заміщення [19], які показують, що з одного боку двохдіодна модель забезпечує дещо більшу точність, проте з іншого боку вона також є складнішою для розрахунків. Велику кількість робіт присвячено визначенню коефіцієнту неідеальності діодів схем заміщення сонячного елемента [20-22].

Оскільки вихідна потужність, якість електроенергії та оптимальний режим роботи сонячного модуля залежать від точності математичних моделей сонячних панелей та від методів оцінки їх параметрів, які є особливо важливими при розрахунку параметрів під час моделювання та проектування сонячних станцій, то питання розробки методики оцінки параметрів сонячних панелей є актуальним.

III. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ

Параметри двохдіодної еквівалентної схеми заміщення сонячного елемента визначаються за допомогою наступної формули [23]:

$$I = I_{PV} - I_{01} (e^{A_1} - 1) - I_{02} (e^{A_2} - 1) - \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (1)$$

де I – вихідний струм; I_{PV} – фотострум; I_{01} , I_{02} – зворотній струм діоду VD1 та VD2 відповідно; $A_1 = (V + IR_s)/\alpha_1 V_T$; $A_2 = (V + IR_s)/\alpha_2 V_T$; α_1 , α_2 – коефіцієнти ідеальності діоду VD1 та VD2 відповідно; V – вихідна напруга; $V_T = N_s kT/q$ – теплова напруга сонячного модуля, який містить N_s послідовно з'єднаних сонячних елементів; R_s – послідовний опір; R_p – шунтуючий опір.

Наведена формула використовується і для однодіодної схеми заміщення (рис. 1, контур а; контур а і в) шляхом переходу $\alpha_2 \rightarrow \infty$.

Таким чином, для моделювання зовнішніх характеристик сонячного елемента необхідно знайти сім



параметрів $(I_{PV}, I_{01}, I_{02}, \alpha_1, \alpha_2, R_s, R_p)$ у випадку двохдіодної схеми заміщення та п'ять параметрів $(I_{PV}, I_{01}, \alpha_1, R_s, R_p)$ у випадку однодіодної. Зазвичай виробники надають дані про сонячну панель або елемент при STC (Standard Test Condition — стандартні тестові умови), а саме: I_{sc} — струм короткого замикання (КЗ); V_{oc} — напруга холостого ходу (ХХ); V_{mpp} , I_{mpp} — напруга і струм в точці максимальної потужності відповідно. Також наводять воль-амперну характеристику (ВАХ) для STC, яка є ключовою для визначення параметрів схеми заміщення.

Для спрощення розрахунків зробимо наступні припущення:

- 1) Будемо вважати, що зворотні струми діодів в схемі заміщення є однаковими $I_{01} = I_{02}$, тоді:

$$I = I_{PV} - \frac{V + R_s I}{R_p} - I_0 \left[e^{\frac{V + R_s I}{\alpha_1 V_T}} + e^{\frac{V + R_s I}{\alpha_2 V_T}} - 2 \right]. \quad (2)$$

- 2) При доволі малій вихідній напрузі $V \approx 0$ вихідний струм сонячного елемента набагато більший за зворотній струм $I \gg I_0$, а аргумент експоненти (2) має доволі мале значення $V + R_s I \sim 0$, оскільки значення R_s достатньо мале. Відповідно маємо:

$$I \approx I_{PV} - \frac{V + R_s I}{R_p} + O(V^2) \Rightarrow \quad (3)$$

$$\Rightarrow I = \frac{I_{PV}}{1 + R_s/R_p} - \frac{V}{R_p + R_s} + O(V^2).$$

- 3) Оскільки $R_p \gg R_s$, то $R_p + R_s \approx R_p$. Тому згідно [15, 24]:

$$-\frac{V}{R_p + R_s} \approx -\frac{V}{R_p} = \frac{dI}{dV} \Big|_{V=0} = I'(0). \quad (4)$$

- 4) Зазвичай табличне значення струму короткого замикання I_{sc} , яке надають виробники, дещо завищене і здебільшого повторює значення фотоструму I_{PV} (рис. 2). На рис. 2 показано значення I_{sc} (позначено червоною та зеленою точками), що надають виробники і відрізок ВАХ. Значення струму $I = f(V)|_{V=0}$ за ВАХ менше значення I_{sc} , $I = f(V)|_{V=0} < I_{sc}$.

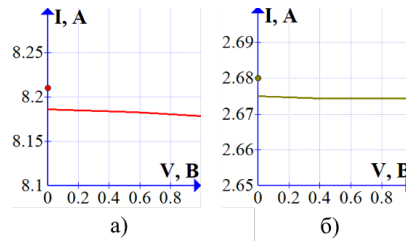


Рис. 2. Приклад завищення значення струму КЗ для сонячної панелі KT200GT (а) та ST40 (б)

Враховуючи це, справедливим є припущення:

$$I(0) = \frac{I_{PV}}{1 + R_s/R_p}. \quad (5)$$

Беручи до уваги припущення 2-4, вираз (3) можна записати наступним чином:

$$I = I(0) + I'(0)V + O(V^2). \quad (6)$$

З (6) стає очевидним, що при доволі малій вихідній напрузі вихідний струм сонячного елемента з ростом напруги змінюється за майже лінійним законом. Враховуючи це, доцільно умовно розділити ВАХ сонячного елемента на три частини: лінійну або пологу $(0 - 0,65V_{oc})$, робочу з точкою максимальної потужності $(0,65V_{oc} - 0,95V_{oc})$, та спадну $(0,95V_{oc} - V_{oc})$. Приклад поділу ВАХ зображено на рис. 3.

На основі (4) та (5) отримуємо систему рівнянь, яка використовується для визначення значень опорів R_s та R_p :

$$\begin{cases} I(0) = \frac{I_{PV}}{1 + \frac{R_s}{R_p}}; \\ I'(0) = \frac{V}{R_p + R_s}. \end{cases} \quad (7)$$

Вирішивши систему рівнянь (7) відносно опорів маємо:

$$\begin{aligned} R_p &= -\frac{I(0)}{I'(0)I_{PV}}; \\ R_s &= -\frac{1}{I'(0)} \left(1 - \frac{I(0)}{I_{PV}} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

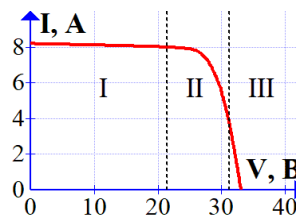


Рис. 3. Поділ ВАХ сонячної панелі на прикладі KT200GT. I – лінійна частина (0-21,38 В), II – робоча частина (21,38-31,25 В), III – спадна частина (31,25-32,9 В).



Зауважимо, що $I(0) \approx I_{PV}$, тому (8) є доволі чутливою до різниці $I_{PV} - I(0)$, що необхідно враховувати при визначенні R_s .

Для отримання аналітичного виразу фотоструму I_{PV} підставимо у (1) значення напруги холостого ходу та знайдемо:

$$I_{PV} - \frac{V_{oc}}{R_p} - I_0 \left[e^{\frac{V_{oc}}{\alpha_1 V_T}} + e^{\frac{V_{oc}}{\alpha_2 V_T}} - 2 \right] = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_0 = \frac{I_{PV} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{\frac{V_{oc}}{\alpha_1 V_T} + e^{\frac{V_{oc}}{\alpha_2 V_T}} - 2} \quad (9)$$

Для подальшого визначення фотоструму I_{PV} необхідно знати $I'(V_{oc})$, яка знаходиться з виразу:

$$\frac{I'(V_{oc})}{1 + R_s I'(V_{oc})} = -\frac{1}{R_p} - \frac{I_0}{V_T} \left[\frac{V_{oc}}{\alpha_1} e^{\frac{V_{oc}}{\alpha_1 V_T}} + \frac{V_{oc}}{\alpha_2} e^{\frac{V_{oc}}{\alpha_2 V_T}} \right] \quad (10)$$

Підставивши (9) в (10), отримаємо наступне рівняння для фотоструму I_{PV} :

$$I_{PV} = \frac{I'(V_{oc}) I'(0) I(0) V_T}{\left[I'(0) V_T - \beta I(0) - \beta V_{oc} I'(0) \right] \left(I'(0) + I'(V_{oc}) \right) - \frac{I'(V_{oc}) I(0)}{I'(0) - I'(V_{oc})}} \quad (11)$$

$$\text{де } \beta = \frac{\frac{e^{V_{oc}/\alpha_1 V_T}}{\alpha_1} + \frac{e^{V_{oc}/\alpha_2 V_T}}{\alpha_2}}{e^{V_{oc}/\alpha_1 V_T} + e^{V_{oc}/\alpha_2 V_T} - 2}.$$

Таким чином, для знаходження необхідних параметрів еквівалентної схеми заміщення достатньо знати параметри STC та ВАХ фотоелементу.

IV. АЛГОРИТМ ЗНАХОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ

Блок схема алгоритму знаходження параметрів схеми заміщення зображена на рис. 4. Визначення чисельних похідних $I'(0)$ та $I'(V_{oc})$ з ВАХ залежить від якості оцифрування ВАХ, оскільки цей процес вносить деяку похибку, що проілюстровано на рис. 5.

Враховуючи результати проведеного моделювання та похибку оцифрування, для знаходження значення похідної в лінійній області $I'(0)$ достатньо брати перші (20-25)% точок експериментальних даних. При цьому для знаходження значення похідної на спадній ділянці $I'(V_{oc})$, необхідно знаходити похідну від поліному другого порядку, який апроксимує останні (8-15)% точок ВАХ. Використання поліному другого порядку необхідне для більш точного

визначення кута нахилу спадної ділянки ВАХ. Приклад знаходження значення чисельної похідної в спадній частині наведено на рис. 6. Очевидно, що апроксимація прямою лінією $y = -2,13x + 70,5$ (рис. 6, червона) дає більшу похибку при оцінці значення похідної, тоді як апроксимація поліномом другого порядку $y = -0,085x^2 + 3,43x - 20,78$ (рис. 6, синя крива) дає меншу похибку. В обох випадках для отримання регресійного поліному використовувалися останні 10 точок ВАХ.

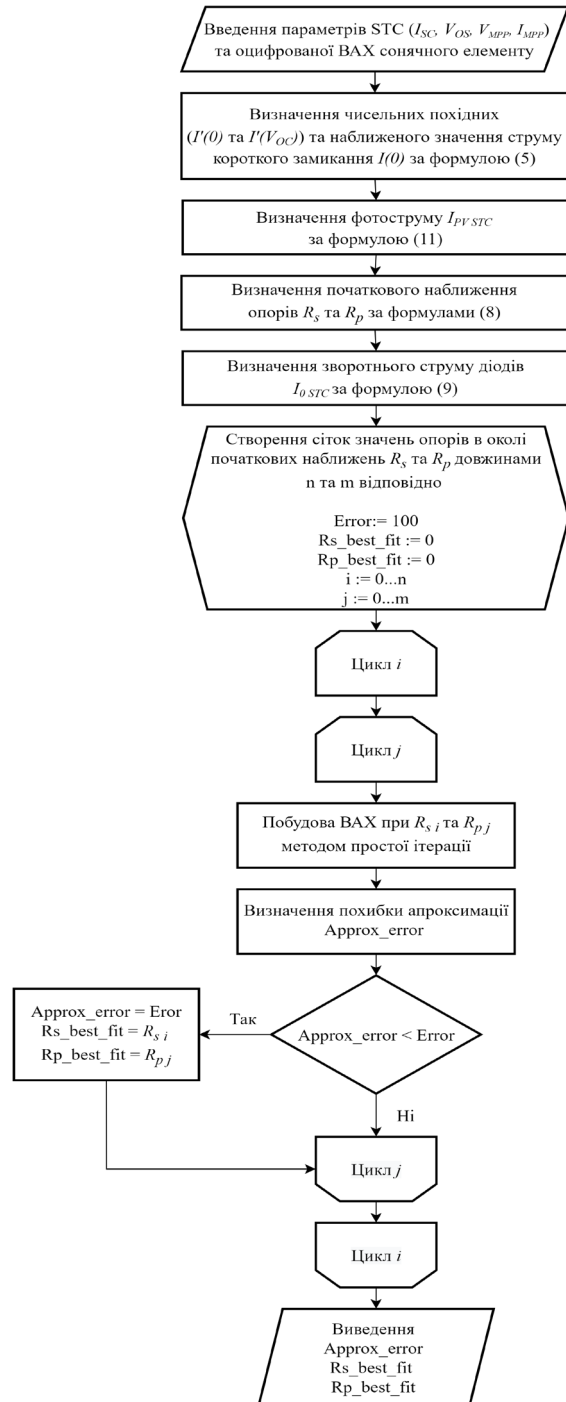


Рис. 4. Блок схема алгоритму знаходження параметрів сонячних панелей



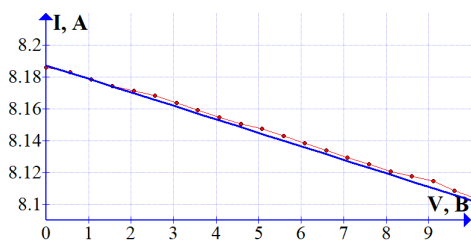


Рис. 5. Приклад відхилення оцифрованої кривої (червона крива з точками) від експериментальної (синя)

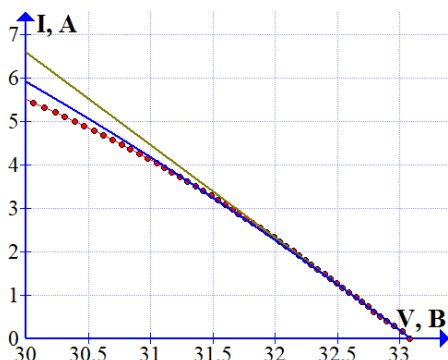


Рис. 6. Приклад апроксимації ВАХ в спадній області. Червона крива – оцифрована ВАХ сонячної панелі KT200GT, зелена – лінійна регресія, синя – квадратична регресія.

Оскільки (1) є трансцендентним, то для його розв'язку і відповідно побудови ВАХ використовуються чисельні методи. В ряді досліджень застосовується метод Ньютона [13], [25], проте, в даній статті, використовується метод простої ітерації [26-27], який є одним із найпростіших методів розв'язку трансцендентних рівнянь. Його переваги: відсутність потреби визначати чисельну похідну на кожній ітерації та відносно легка комп'ютерна реалізація.

При проведенні комп'ютерного моделювання було встановлено, що в ряді випадків даний метод може не сходитись поблизу точки напруги холостого ходу V_{oc} . Для усунення даного недоліку застосовується метод релаксації [28], суть якого полягає в заміні (1) на рекурентне співвідношення:

$$I_{i+1} = I_i(1 - \varepsilon) + \varepsilon F(I_i, V) \quad (12)$$

де $0 < \varepsilon < 1$, I_i – значення струму на попередній ітерації, $F(I_i, V) - (1)$.

Блок-схема алгоритму методу простої ітерації з використанням методу релаксації зображена на рис. 7.

Введення подібного рекурентного співвідношення збільшує необхідну кількість ітерацій для побудови ВАХ, що в свою чергу і забезпечує збіжність даного методу. Експериментальним шляхом було встановлено, що значення $\varepsilon = 0,2$ достатньо для забезпечення збіжності чисельного процесу.

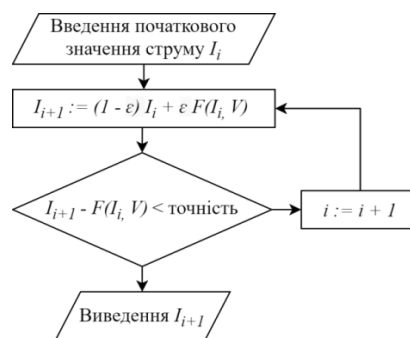


Рис. 7. Блок-схема алгоритму методу простої ітерації з використанням методу релаксації

V. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Для перевірки розробленого методу проведено порівняльний аналіз з наявними методиками [25], [29]. У праці [25] використовується двохдіодна модель, тоді як [29] пропонує дві методики в рамках однієї моделі. Для порівняння використовуються сонячні панелі: KC200GT (монокристалічна структура) та ST40 (полікристалічна структура), параметри яких вказані в табл. 1 [30-31].

Для оцінки точності апроксимації застосовуються модуль відносної похибки:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 100 \left| \frac{I_{Ei} - I_{Ai}}{I_{Ei}} \right| \quad (13)$$

та середньоквадратична похибка:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{Ei} - I_{Ai})^2}, \quad (14)$$

де I_{Ei} – експериментальне (оцифроване) значення струму на i -й ітерації, I_{Ai} – апроксимоване значення струму на i -й ітерації, n – кількість точок ВАХ.

Похибки та параметри еквівалентних схем заміщення, взятих з праць [25] (стовбець 3, табл. 2, 3), [29] (методика I стовбець 4 та методика II стовбець 5, табл. 2, 3) та отриманих за допомогою запропонованої методики (однодіодна модель стовбець 1, табл. 2, 3 та двохдіодна модель стовбець 2, табл. 2, 3). Отримані ВАХ зображені на рис. 8, 9.

Таблиця 1. ПАРАМЕТРИ ДОСЛІДУВАНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

	KC200GT	ST40
P_{max} , Вт	200	40
V_{mpp} , В	26,3	16,6
I_{mpp} , А	7,61	2,41
I_{sc} , А	8,21	2,68
V_{oc} , В	32,9	23,3

Таблиця 2. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПАНЕЛІ KC200GT

	Запропонована модель		[25]	[29], мет. I	[29], мет. II
	1	2	3	4	5
R_s , Ом	0,263	0,262	0,320	0,308	0,284
R_p , Ом	117,391	119,289	160,500	193,049	157,853
I_{PV} , А	8,205	8,206	8,210	8,223	8,210
I_0 , нА	0,346	0,339	0,422	2,152	2,195
α_1	1	1	1	1,076	1,076
α_2	-	1,2	1,2	-	-
$I'(0)$	-0,0082	-0,0083	-	-	-
$I'(V_{oc})$	-2,1736	-2,1735	-	-	-
δ	0,578	0,582	3,815	2,571	1,217
SE	0,016	0,016	0,185	0,130	0,059

З табл. 2 видно, що запропонована методика в середньому забезпечує в 4 рази менший модуль відносної похибки та в 7 раз меншу середньоквадратичну похибку. Загалом, інші методики схильні до завищення значень R_s та R_p , що спричиняє збільшену похибку апроксимації в пологій (рис. 8, I) та спадній (рис. 8, III) ділянках ВАХ. Значення фотоструму I_{PV} для всіх методик співрозмірне, тоді як зворотній струм I_0 відрізняється в значній мірі. Також, оскільки розглянуті методики роблять припущення $I(0) = I_{sc}$, початкове значення струму не співпадає з оцифрованою кривою для розглянутих методик. ВАХ запропонованої методики перетинає оцифровану криву поблизу точки максимальної потужності $V_{mpp} = 26,3$ В, що особливо важливо при розробці пристроїв ВТМП (рис 8, II).

З табл. 3 видно, що запропонована методика забезпечує найменші похибки апроксимації, проте різниця з іншими методиками скоротилася — модуль відносної похибки запропонованої методики в середньому менший в 1,75 разів, а середньоквадратична похибка 1,5 разів. Здебільшого це досягається за рахунок більшої точності апроксимації в пологій (рис. 9, I) та спадній областях (рис. 9, III), тоді як в робочій області ВАХ (рис. 9, II) запропонованої методики перетинає експериментальну криву не в точці максимальної потужності, що є недоліком. У даному порівнянні в інших методиках значення опору R_p занижене, що особливо впливає на точність апроксимації в пологій області. Значення фотоструму I_{PV} та зворотного струму I_0 запропонованої методики узгоджуються з іншими. Зауважимо, полікристалічні панелі мають гірші вихідні характеристики у порівнянні з монокристалічними. Таким чином значення коефіцієнту ідеальності α_1 відрізняється від 1, як було припущено, що негативним чином впливає на точність апроксимації.

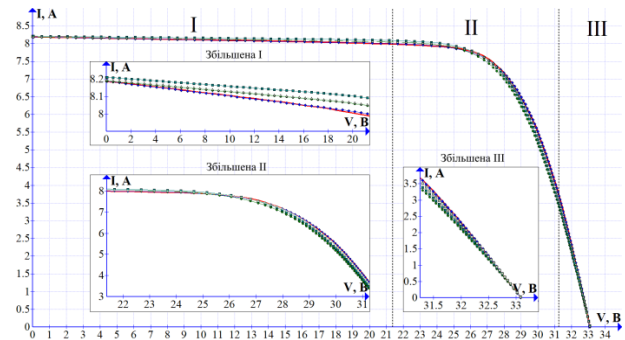


Рис. 8. Порівняння ВАХ для панелі KC200GT. Червона крива – оцифрована крива, синя – запропонованої однодіодної моделі, зелена – [25], синьо-зелена – методика I [29], світло-зелена – методика II [20]

Таблиця 3. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПАНЕЛІ ST40

	Запропонована модель		[25]	[29], мет. I	[29], мет. II
	1	2	3	4	5
R_s , Ом	1,451	1,451	1,6000	1,4940	1,3723
R_p , Ом	411,264	411,264	263,300	257,166	194,664
I_{PV} , А	2,682	2,682	2,680	2,696	2,680
I_0 , нА	1,034	1,008	1,130	1,414	1,455
α_1	1	1	1	1,135	1,135
α_2	-	1,2	1,2	-	-
$I'(0)$	-0,0017	-0,0017	-	-	-
$I'(V_{oc})$	-0,6145	-0,6145	-	-	-
δ	2,119	2,145	5,163	3,269	2,694
SE	0,027	0,027	0,062	0,032	0,028

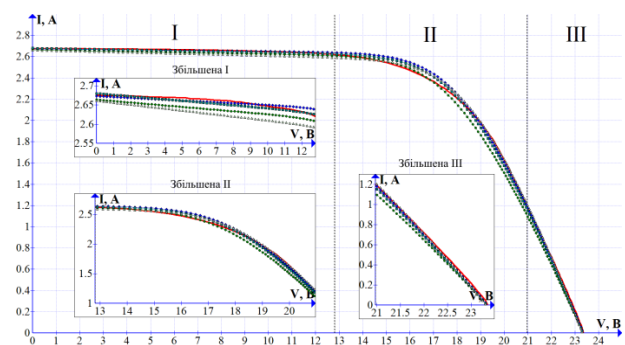


Рис. 9. Порівняння ВАХ для панелі ST40. Червона крива – оцифрована крива, синя – запропонованої однодіодної моделі, зелена – [25], синьо-зелена – методика I [29], світло-зелена – методика II [29]

Також проведено порівняльний аналіз одно- та дводіодної схеми заміщення з використанням запропонованої методики. З табл. 2 та табл. 3 очевидно, що одно- та дводіодна модель забезпечують практично однакові значення параметрів схем заміщення, а відповідно і точність апроксимації. Для наочності наведено графік відносної різниці значень струму одно- та дводіодної моделі для панелі KC200GT (рис. 10).

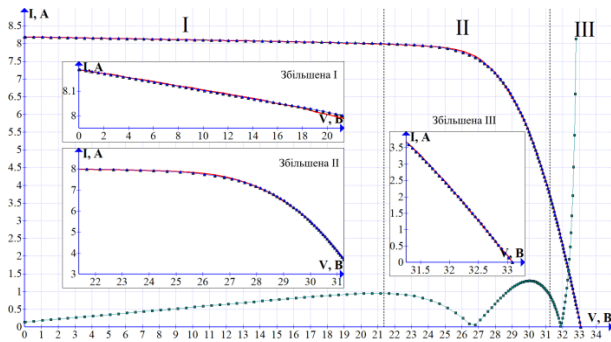


Рис. 10. Порівняння ВАХ одно- та двохдіодної моделі. Червона крива – оцифрована крива, зелена – ВАХ двохдіодної моделі, синя – однодіодної моделі, синь-зелена – модуль відносної різниці масштаб збільшено в 25 разів (останні п'ять точок невідображені через велике значення похибки).

З рис. 10 очевидно, що одно- та двохдіодна модель забезпечують практично однакову точність апроксимації. Різниця між значеннями струму моделей становить менше 0.5%. При цьому найбільша різниця спостерігається в спадній області ВАХ (рис. 10, III). Це пояснюється тим, що чисельник (13) з ростом напруги майже не змінюється, тоді як знаменник з ростом напруги спадає. Тому модуль відносної похибки в спадній області не є інформативним, через що з рис. 10 було видалено останні п'ять точок для відносної різниці.

ВИСНОВКИ

Розроблена методика визначення параметрів еквівалентних схем заміщення за експериментальними даними дозволяє отримати ВАХ зі значно меншим як модулем відносної похибки, так і середньоквадратичною похибкою по відношенню до існуючих методик.

Встановлено, що для монокристалічних панелей (на прикладі KT200GT) запропонована методика забезпечує в середньому в 4 рази меншу відносну та в 7 раз меншу середньоквадратичну похибку, а для полікристалічних панелей (на прикладі ST40) — в 1,75 разів менша відносна похибка, а середньоквадратична в 1,5 разів у порівнянні з розглянутими методиками. Знижена точність апроксимації для полікристалічних панелей пояснюється тим, що методика не враховує збільшене значення коефіцієнту ідеальності α_1 для даної технології виготовлення кремнієвих сонячних панелей.

Порівняльний аналіз запропонованої методики при використанні одно- та двохдіодної схем заміщення на прикладі панелі KT200GT показав, що обидві дані схеми забезпечують співставну точність апроксимації. Таким чином, для моделювання краще використовувати однодіодну схему заміщення. Це дозволяє спростити розрахунки та відмовитись від ряду припущень, які використовуються для двохдіодної схеми.

ПОДЯКА

Висловлюємо подяку Clément Sire (Paul Sabatier University — Toulouse III) за надану допомогу в консультації з приводу чисельних методів вирішення трансцендентних рівнянь.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] D. Maradin, "Advantages and disadvantages of renewable energy," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 11, no. 3, 2021, DOI: [10.32479/ijeep.11027](https://doi.org/10.32479/ijeep.11027).
- [2] M. Boxwell, "Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy-Designing and Installing Photovoltaic Solar Electric Systems," 2009.
- [3] I. Pevps, "2016 SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS," 2016.
- [4] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 47–62, Jan. 2003, DOI: [10.1002/ptp.459](https://doi.org/10.1002/ptp.459).
- [5] M. Wolf, "New developments in silicon photovoltaic devices," *J. Br. Inst. Radio Eng.*, vol. 18, no. 10, p. 583–594(11), 1958, URL: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/jbire.1958.0062>.
- [6] D. Bickler, "The simulation of solar radiation," *Sol. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 64–68, 1962, DOI: [10.1016/0038-092X\(62\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(62)90006-3).
- [7] H. ~Y. Tada and J. Carter J.~R., *Solar cell radiation handbook*. 1977.
- [8] H. Rauschenbach, "Electrical output of shadowed solar arrays," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 18, no. 8, pp. 483–490, 1971. DOI: [10.1109/T-ED.1971.17231](https://doi.org/10.1109/T-ED.1971.17231)
- [9] L. A. Mallette and R. L. Phillips, "Modeling solar cells for use as optical detectors: background illumination effects," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 11, pp. 1786–1788, 1978, DOI: [10.1364/AO.17.001786](https://doi.org/10.1364/AO.17.001786).
- [10] J.-P. Charles, G. Bordure, A. Khoury, and P. Mialhe, "Consistency of the double exponential model with physical mechanisms of conduction for a solar cell under illumination," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 18, no. 11, pp. 2261–2268, 1985, DOI: [10.1088/0022-3727/18/11/015](https://doi.org/10.1088/0022-3727/18/11/015).
- [11] D. S. H. Chan and J. C. H. Phang, "Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 34, no. 2, pp. 286–293, 1987, DOI: [10.1109/T-ED.1987.22920](https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.22920).
- [12] A. Polman, W. G. J. H. M. Van Sark, W. Sinke, and F. W. Saris, "A new method for the evaluation of solar cell parameters," *Sol. Cells*, vol. 17, no. 2, pp. 241–251, 1986, DOI: [10.1016/0379-6787\(86\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0379-6787(86)90015-3).
- [13] V. Tamrakar, S. C. Gupta, and Y. Sawle, "Single-Diode Pv Cell Modeling And Study Of Characteristics Of Single And Two-Diode Equivalent Circuit," *Electr. Electron. Eng. An Int. J.*, vol. 4, pp. 13–24, 2015, DOI: [10.14810/elelij.2015.4302](https://doi.org/10.14810/elelij.2015.4302).
- [14] S. Lineykin, M. Averbukh, and A. Kuperman, "Five-parameter model of photovoltaic cell based on STC data and dimensionless," in *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 2012, pp. 1–5, DOI: [10.1109/EEEL.2012.6377079](https://doi.org/10.1109/EEEL.2012.6377079).
- [15] S. Pindado and J. Cubas, "Simple mathematical approach to solar cell/panel behavior based on datasheet information," *Renew. Energy*, vol. 103, pp. 729–738, 2017, DOI: [10.1016/j.renene.2016.11.007](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.007).



- [16] N. Yildiran and E. Tacer, "Identification of photovoltaic cell single diode discrete model parameters based on datasheet values," *Sol. Energy*, vol. 127, pp. 175–183, 2016, DOI: [10.1016/j.solener.2016.01.024](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.024).
- [17] Maouhoub Nouredine, "Analytical Identification Method for the Single Diode Model Parameters of a Photovoltaic Panel using Datasheet Values," *Журнал нано- та електронної фізики (Journal nano- Electron. physics)*, 2017, URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/65994>.
- [18] V. Khanna, B. K. Das, D. Bisht, Vandana, and P. K. Singh, "A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm," *Renew. Energy*, vol. 78, pp. 105–113, 2015, DOI: [10.1016/j.renene.2014.12.072](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.072).
- [19] T. Ahmad, S. Sobhan, and F. Nayan, "Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect on Its Efficiency," *J. Power Energy Eng.*, vol. 04, pp. 31–46, 2016, DOI: [10.4236/jpee.2016.43004](https://doi.org/10.4236/jpee.2016.43004).
- [20] L. Duan *et al.*, "Relationship Between the Diode Ideality Factor and the Carrier Recombination Resistance in Organic Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, pp. 1701–1709, 2018, DOI: [10.1109/jphotov.2018.2870722](https://doi.org/10.1109/jphotov.2018.2870722).
- [21] A. Jain and A. Kapoor, "A new method to determine the diode ideality factor of real solar cell using Lambert W-function," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 85, no. 3, pp. 391–396, 2005, DOI: [10.1016/j.solmat.2004.05.022](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.05.022).
- [22] H. Bayhan and M. Bayhan, "A simple approach to determine the solar cell diode ideality factor under illumination," *Sol. Energy - Sol. ENERG*, vol. 85, pp. 769–775, 2011, DOI: [10.1016/j.solener.2011.01.009](https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.01.009).
- [23] A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering," *John Wiley Sons, Ltd*, pp. 92–100, 2003.
- [24] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*. PUBLISHED BY IMPERIAL COLLEGE PRESS AND DISTRIBUTED BY WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO., 2003, URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/p276>.
- [25] K. Ishaque, Z. Salam, and Syafaruddin, "A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2217–2227, 2011, DOI: [10.1016/j.solener.2011.06.008](https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.008).
- [26] J. D. Hoffman, J. D. Hoffman, and S. Frankel, *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. CRC Press, 2018, ISBN: 9781315274508.
- [27] S. Butenko and P. M. Pardalos, *Numerical Methods and Optimization*. Chapman and Hall/CRC, 2014, ISBN: 9781466577787.
- [28] P. Salinas, D. Pavlidis, Z. Xie, A. Adam, C. C. Pain, and M. D. Jackson, "Improving the convergence behaviour of a fixed-point-iteration solver for multiphase flow in porous media," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 84, no. 8, pp. 466–476, 2017, DOI: [10.1002/flid.4357](https://doi.org/10.1002/flid.4357).
- [29] I. Nassar-eddine, A. Obbadi, Y. Errami, A. El fajri, and M. Agunaou, "Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the Lambert W function: A comparative study," *Energy Convers. Manag.*, vol. 119, pp. 37–48, 2016, DOI: [10.1016/j.enconman.2016.04.030](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.030).
- [30] "KC200GT Specifications." [Online]. Available: <https://www.energymatters.com.au/images/kyocera/KC200GT.pdf>.
- [31] "Merbenit ST40. Technical data sheet." [Online]. Available: https://www.ulbrich.cz/chemical-technical-products/TDS_MERBENIT_ST_40_eng.pdf.

Надійшла до редакції 14 липня 2021 р.

Прийнята до друку 09 серпня 2021 р.



Solar Panel Parameters Estimation Method Using Manufacturer Information

V. I. Martyniuk^f, ORCID [0000-0003-0882-5114](https://orcid.org/0000-0003-0882-5114)

K. S. Klen^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

V. Ya. Zhuikov^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Department of Electronic Devices and Systems eds.kpi.ua

Faculty of Electronics fel.kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Kyiv, Ukraine

Abstract—The article considers the method of evaluating the parameters of equivalent schemes of solar panels using data provided by their manufacturers. The technique involves the use of a digitized volt-ampere characteristic of the solar panel and standard test conditions parameters (STC) to estimate the numerical derivatives at the points of short and open circuit. Digitizing the volt-ampere characteristic introduces some error, which significantly affects the accuracy of determining numerical derivatives. To solve this problem, it is advisable to average the values of the derivatives. It was found that it is sufficient to take 20-25% of the first points and 8-15% of the last points of the digitized curve. In this case, to estimate the value of the derivative at the point of short circuit, it is advisable to use linear fit, and at the point of open circuit — quadratic fit. The peculiarities of using the obtained formulas and the block diagram of the algorithm that implements this technique were also given.

A fixed point algorithm is used to solve the transcendental equation of the external characteristic of the solar panel. It was found that in some cases this numerical method may not convergences near the open circuit point. To solve this problem, in the proposed to use the relaxation method. This increases the required number of iterations, but guarantees the convergence of numerical method. The block diagram of the simple iteration algorithm using the relaxation method is given.

Modeling the developed technique, one- and two-diode solar panel replacement schemes were used on the example of KC200GT and ST40 solar panels. A comparative analysis of these schemes showed that a single-diode circuit is more relevant, because its use simplifies calculations and eliminates the need for a number of assumptions. The accuracy of the approximation provided by the single-diode circuit is proportional to the accuracy of the two-diode circuit. A comparative analysis of the developed methodology with other works was performed. The results indicate that the proposed algorithm provides the best approximation accuracy among the considered works. For monocrystalline solar panels, the average standard error is 7 times less and the modulus of relative error — 4 times. For polycrystalline panels, the average standard error is 1.5 times less, and the modulus of relative error is 1.75 times. For polycrystalline panels, the approximation error increases due to a non-unit value of the ideality factor for this manufacturing technology of the solar panels.

Keywords — solar panels; simple iteration method; relaxation method; equivalent circuit; current–voltage characteristic.

