

## Дослідження точності моделювання сонячних панелей з урахуванням впливу експлуатаційних факторів

О. А. Кетрарь, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0098-7450>; e-mail: [ketraroa@gmail.com](mailto:ketraroa@gmail.com)

Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** В статті проведено порівняння результатів експериментального дослідження сонячних панелей з математичними моделями зробленими в *Matlab*, *Simulink*. Застосовано приведення експериментальних даних к стандартним умовам тестування. Проведено аналіз моделювання однодіодної та дводіодної моделі сонячних панелей. Точність моделей оцінюється з використанням комплексу статистичних та практичних метрик. Подані пропозиції щодо подальших досліджень режимів роботи сонячних панелей.

**Ключові слова:** сонячна панель, вольт-амперна характеристика, однодіодна модель, дводіодна модель, стандартні умови тестування, підвищення ефективності.

*Цитування статті:* Кетрарь О. А. (2026). Дослідження точності моделювання сонячних панелей з урахуванням впливу експлуатаційних факторів. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 46(122), с.50-59. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.5>

### Вступ

В статті обґрунтовується необхідність моделювання сонячних панелей для покращення їх експлуатаційних характеристик. Активний розвиток сонячної енергетики зумовлює зростання вимог до точності прогнозування характеристик сонячних електростанцій. Математичні моделі сонячних панелей широко використовуються для проектування, аналізу ефективності та оптимізації режимів роботи фотоелектричних систем [1].

Метою статті є аналіз точності роботи різних математичних моделей сонячних панелей з урахуванням впливу експлуатаційних факторів. Як тільки почали використовувати фотоелектричні панелі, з'явилося бажання мати математичну модель сонячної панелі (СП), як для аналізу процесів в самій СП, так і для прогнозу роботи в різних умовах. Більшість авторів використовують для моделювання параметри СП, які вказує виробник в паспортних даних панелей. А саме: напруга холостого ходу; струм короткого замикання; струм і напруга в точці максимуму потужності [2]. Разом з тим, чисельні дослідження показують, що результати моделювання часто не повністю відповідають експериментальним даним, особливо за змінних температурних умов та нестабільної інсоляції [3–5].

В рамках дослідження розглядалися експериментально отримані вольт-амперні характеристики (ВАХ) фотоелектричних (ФЕ) модулів, виміряні при різних значеннях інсоляції та температури модуля.

Тому, для підвищення точності моделювання, було застосоване приведення експериментальних ВАХ к стандартним умовам випробувань (STC) по методики IEC 60891 з використанням диференціально визначених параметрів  $R_s$  і  $R_{sh}$ . Максимальна потужність визначалася чисельним пошуком точки MPP[6].

Отримані значення  $V_{oc\_STC}$  і  $P_{mp\_STC}$  демонструють істотну відмінність від експериментальних, що підтверджує необхідність температурно-інсоляційної корекції при аналізі експлуатаційних даних.

### 1 Опис однодіодної моделі сонячної панелі

Однодіодна модель сонячної панелі є найпростішою і широко використовуваною моделлю для опису її електричних характеристик. Ця модель дозволяє розглядати сонячний елемент як джерело струму та аналізувати вплив різних факторів, таких як освітленість, температура, внутрішні опори тощо, на його роботу. Вона використовується для математичного моделювання і

аналізу роботи фотоелементів [1, 7]. Однодіодна еквівалентна схема зображена на рисунку 1.

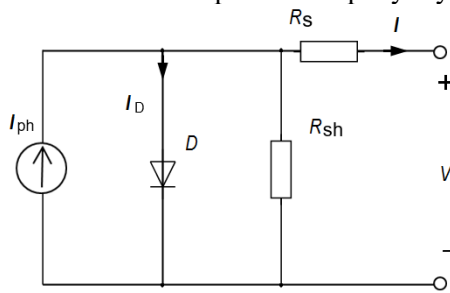


Рис. 1 - Однодіодна еквівалентна схема сонячної панелі

### 1.1 Основні елементи однодіодної моделі сонячної панелі

**Джерело струму  $I_{ph}$**  — струм генерований фотоелементом: Це основний компонент, що генерує струм пропорційно до рівня освітленості. Цей струм є функцією інтенсивності світла, що падає на сонячний елемент, і залежить від кількості фотонів, які поглинаються матеріалом елемента.

**Діод  $D$**  — нелінійний елемент, що відповідає за  $p-n$  перехід: Діод моделює нелінійність електричної поведінки сонячного елемента. Він відображає поведінку реального  $p-n$  переходу в сонячному елементі.

**Резистор  $R_s$  — послідовний опір:** Відображає внутрішній опір матеріалу сонячного елемента, а також контактні опори. Чим більший цей опір, тим більше втрат при передачі струму, що зменшує загальну ефективність сонячного елемента.

**Резистор  $R_{sh}$  — паралельний (шунтовий) опір:** Паралельний опір моделює шпунтуючі струми, які проходять через дефекти матеріалу або через витоки струму в елементі. В ідеальному випадку цей опір мав би бути дуже великим, щоб зменшити втрати енергії.

### 1.2 Математичний опис однодіодної схеми заміщення

Струм  $I$ , А, що генерується сонячним елементом, визначається рівнянням:

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}},$$

де  $I_{ph}$  - струм генерований фотоелементом (пропорційний освітленню), А;

$I_D$  - струм через діод (експоненційно залежить від напруги на елементі), А;

$V$  - напруга на сонячному елементі, В;

$R_s$  - послідовний опір, Ом;

$R_{sh}$  - шунтовий опір, Ом.

Струм через діод  $I_D$  визначається рівнянням:

$$I_D = I_0 \left( \exp\left(\frac{V + I \times R_s}{n \times V_T}\right) - 1 \right),$$

де  $I_0$  — зворотний насичений струм діода, А;

$n$  — коефіцієнт ідеальності діода, в. о.;

$V_T$  — тепловий потенціал, В.

Тепловий потенціал визначається за формулою

$$V_T = \frac{k \times T}{q},$$

де  $k$  — константа Больцмана ( $k = 1,38 \times 10^{-23}$ , Дж/К);

$T$  — температура, °К;

$q$  — заряд електрона ( $q = 1,6 \times 10^{-19}$ , Кл).

Зворотний насичений струм діода  $I_0$  залежить від температури та інших параметрів і може бути обчислений за допомогою рівняння:

$$I_0 = I_{sc} \times \left( \frac{1}{e^{n \times k \times T} - 1} \right),$$

де  $I_{sc}$  — струм короткого замикання, А;

$V_{oc}$  — напруга холостого ходу, В.

Однодіодна модель забезпечує задовільну точність для інженерних розрахунків, проте її похибка зростає при зміні температури та в області малих напруг [5, 8, 10].

За наведеними вище формулами складена оригінальна Модель №1 з використанням блоків з бібліотеки Matlab, Simulink, блок-схема якої зображена на рисунку 2.

### 2 Опис дводіодної моделі сонячної панелі

Для більш точного опису процесів рекомбінації зарядів у напівпровідниковій структурі використовується дводіодна модель сонячної панелі [9]. Вона враховує два механізми переносу носіїв заряду, є покращеною версією однодіодної моделі. Вважається, що вона точніше описує електричні характеристики сонячної панелі, враховуючи додаткові фізичні процеси, що відбуваються в  $p-n$  переході.

Ця модель особливо корисна для більш точного аналізу втрат і для моделювання реальної поведінки сонячних панелей за різних умов експлуатації [11].

Дводіодна еквівалентна схема сонячної панелі зображена на рисунку 3.

#### 2.1 Основні компоненти дводіодної моделі сонячної панелі

**Струм генерований фотоелементом ( $I_{ph}$ ):**

Це струм, який генерується внаслідок поглинання фотонів матеріалом елемента. Його величина

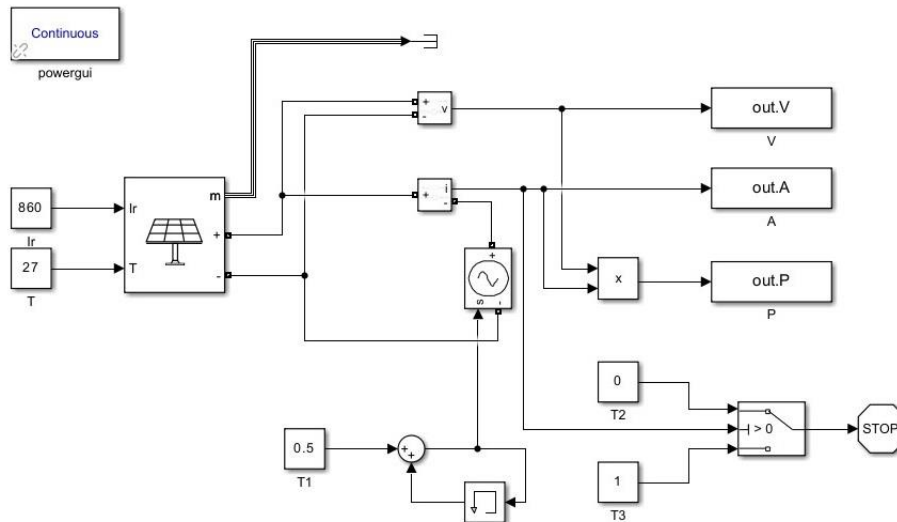


Рис. 2 - Блок-схема одніодної моделі сонячної панелі (SDM)

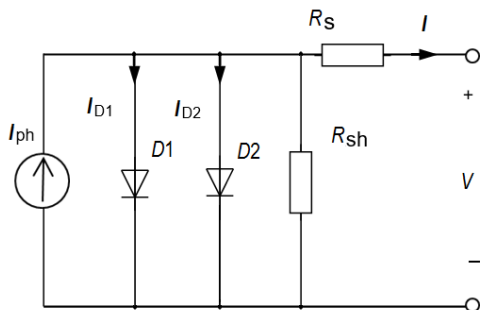


Рис. 3 - Дводіодна еквівалентна схема сонячної панелі

прямо пропорційна кількості падаючого світла і залежить від рівня освітленості та площі сонячного елемента.

**Два діоди (D1 і D2):** Дводіодна модель використовує два діоди для точнішого моделювання процесів у р-п переході. Перший діод (D1) моделює рекомбінаційні процеси в основній області переходу, а другий діод (D2) враховує рекомбінацію на поверхні та в глибоких рівнях енергії.

**Послідовний опір (Rs):** Опір  $R_s$  представляє сукупні опори внутрішніх контактів, матеріалів і з'єднань, через які протікає струм.

**Шунтовий опір (Rsh):** Шунтовий опір моделює втрати на витоки струму через дефекти в матеріалі або через шунтуючі струми в панелі.

## 2.2 Математичний опис дводіодної схеми заміщення

Загальне рівняння струму в дводіодній моделі сонячної панелі виглядає так:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}},$$

де  $I$  - загальний струм, що діє через сонячний елемент, А;

$I_{ph}$  - струм генерований фотоелементом, А;

$I_{D1}$  - струм через перший діод, А;

$I_{D2}$  - струм через другий діод, А;

$V$  - напруга на сонячному елементі, В;

$R_s$  - послідовний опір, Ом;

$R_{sh}$  - шунтовий опір, Ом.

Струм через перший діод  $I_{D1}$  описується рівнянням Шоклі для діода:

$$I_{D1} = I_{01} \left( \exp\left(\frac{V + I \times R_s}{n_1 \times V_T}\right) - 1 \right).$$

Струм через другий діод ( $I_{D2}$ ) має схоже рівняння:

$$I_{D2} = I_{02} \left( \exp\left(\frac{V + I \times R_s}{n_2 \times V_T}\right) - 1 \right),$$

де  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  - зворотні насичені струми для першого і другого діодів, відповідно, А;

$n_1$ ,  $n_2$  - коефіцієнти ідеальності для першого і другого діодів, відповідно, в. о. (зазвичай  $n_1 \approx 1$ ,  $n_2 \approx 2$ );

$V_T$  - тепловий потенціал, В.

Тепловий потенціал визначається за формулою

$$V_T = \frac{k \times T}{q},$$

де  $k$  - константа Больцмана ( $k = 1,38 \times 10^{-23}$ , Дж/К);

$T$  - температура, °К;

$q$  - заряд електрона ( $q = 1,6 \times 10^{-19}$ , Кл).

Зворотні насичені струми першого і другого діодів визначаються за допомогою температури та інших параметрів сонячного елемента. Вони є ключовими показниками для аналізу втрат у сонячному елементі. Загалом,  $I_{01}$  відповідає за основну рекомбінацію, а  $I_{02}$  - за додаткові рекомбінаційні процеси [12, 13].

Формула для зворотного насиченого струму діода  $I_0$ :

$$I_0 = \left( \frac{I_{sc}ST_S + K_I \times \Delta T}{\exp[(V_{oc}ST_S + K_V \times \Delta T)/nV_T] - 1} \right),$$

де  $K_I$  - температурний коефіцієнт  $I_{sc}$ ;  
 $K_V$  — температурний коефіцієнт  $V_{oc}$ ;  
 $n$  — коефіцієнт ідеальності діода, в. о.;

$$\Delta T = T - T_{ST_S}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$T$  - фактична температура,  $^\circ\text{C}$ .

$T_{ST_S}$  - температура стандартних умов ( $25^\circ\text{C}$ );

За наведеними вище формулами складена

Модель №2, яка описує дводіодну еквівалентну схему сонячної панелі, з використанням блоків з бібліотеки Matlab, Simulink. Блок-схема цієї моделі зображена на рисунку 4.

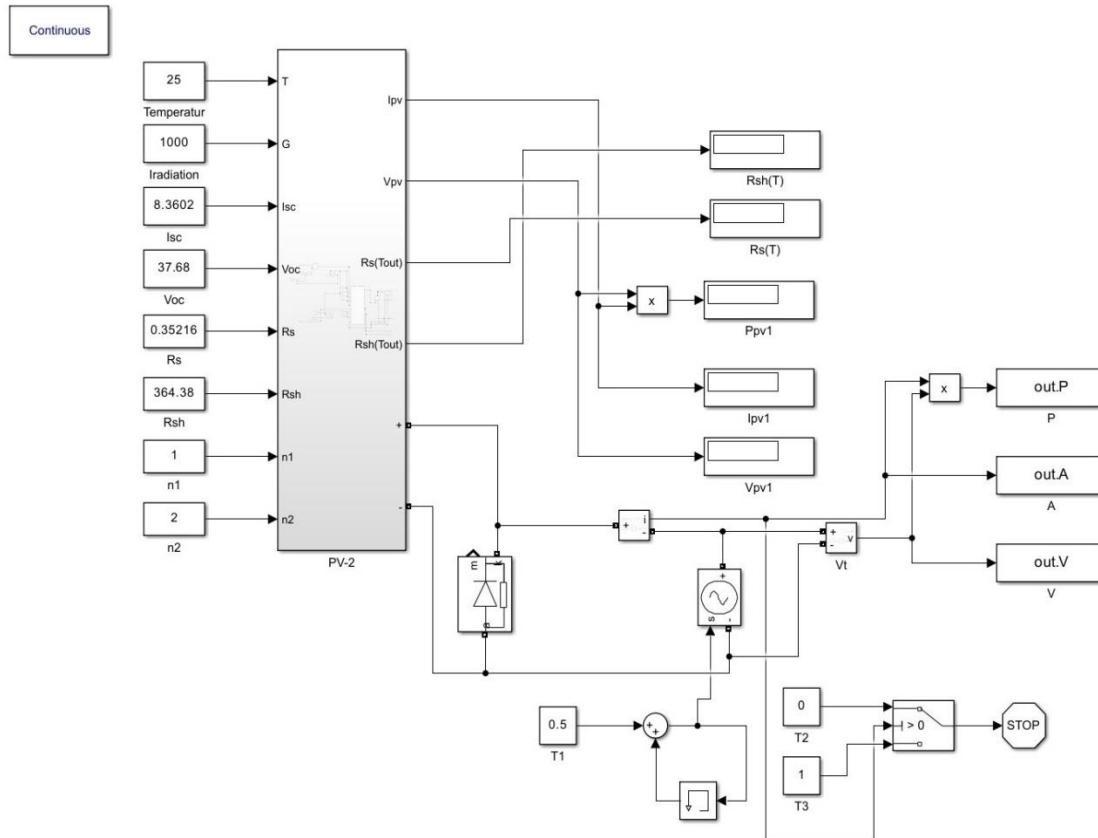


Рис.4 - Блок-схема дводіодної моделі сонячної панелі (DDM)

### 3 Визначення параметрів елементів моделей за експериментальними даними

ВАХ фотоелектричних панелей були зняти в природному середовищі [13] при різних значеннях сонячної інсталяції та температури панелей. Тому, для підвищення точності моделей, необхідно приведення експериментальних даних к стандартним умовам тестування [6].

Корекція струму:

$$I_{STC} = I \times \frac{G_{STC}}{G} + \alpha \times (T_{STC} - T),$$

де  $I$  - струм, А;  
 $G_{STC}$  - інсоляція стандартна, ( $1000 \text{ Вт/м}^2$ );  
 $G$  - фактична інсоляція,  $\text{Вт/м}^2$ ;  
 $\alpha$  - температурний коефіцієнт струму ( $\text{А/}^\circ\text{C}$ );  
 $T_{STC}$  - температура стандартних умов ( $25^\circ\text{C}$ );  
 $T$  - фактична температура,  $^\circ\text{C}$ .  
Корекція напруги складніша, оскільки

включає логарифмічну залежність від інсоляції та лінійну від температури:

$$V_{STC} = V + \beta \times (T_{STC} - T) - R_s \times (I_{STC} - I),$$

де  $\beta$  - температурний коефіцієнт напруги ( $\text{V/}^\circ\text{C}$ );

$R_s$  - послідовний опір, Ом.

Мета обробки даних:

1) Привести експериментальні ВАХ до стандартних умов тестування (STC):

$G_{STC} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ .

2) Визначення параметрів за експериментальною ВАХ.

#### 3.1 Струм короткого замикання та напруга холостого ходу

Струм короткого замикання:

$$I_{sc}^{exp} = \max(I).$$

Напруга холостого ходу:

$$V_{OC}^{exp} = V (I = 0).$$

Чисельне  $V_{OC}^{exp}$  визначається лінійною інтерполяцією:

$$V_{OC}^{exp} = \text{interp1}(I, V, 0)$$

Такий підхід широко застосовується в експериментальних дослідженнях і допускається стандартом IEC 60891.

### 3.2 Визначення точки максимальної потужності (MPP)

Для кожної експериментальної ВАХ обчислюється миттєва потужність, Вт:

$$P_i = V_i \times I_i;$$

Точка максимальної потужності визначається як:

$$P_{mp} = \max (P_i), (V_{mp}, I_{mp}) = \arg \max (P_i).$$

Цей метод є чисельно стійким, не потребує апроксимації і не вносить модельних спотворень.

### 3.3 Визначення шунтуючого опору $R_{Sh}$

В області малих напруг ( $V \rightarrow 0$ ) ВАХ лінійна, та:

$$R_{Sh} = - \left( \frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0}^{-1};$$

Чисельне, Ом:

$$R_{Sh} = - \left\langle \frac{1}{dI/dV} \right\rangle_{V < 0.05 V_{OC}},$$

де похідна обчислюється методом кінцевих різниць.

Підхід рекомендований IEC 60891 та застосовується в ряді публікацій [14, 15, 16].

### 3.4 Визначення послідовного опору $R_S$

В області малих струмів ( $I \rightarrow 0$ ):

$$R_S = - \left( \frac{dV}{dI} \right)_{I \rightarrow 0}$$

На практиці використовується адаптивна область останніх точок ВАХ

$$R_S = - \left\langle \frac{dV}{dI} \right\rangle_{I < I_{SC}}$$

Це принципово важливо: використання однієї точки або фіксованого діапазону призводить до нестійких значень [6].

У роботі реалізовано метод обробки експериментальних ВАХ фотоелектричних модулів, який не вимагає використання паспортних характеристик і базується виключно на експериментальних даних. Корекція до стандартних умов тестування виконана відповідно до IEC 60891, а параметри еквівалентної схеми модуля визначенні диференціальним методом що забезпечує фізичну інтерпретованість та відтворюваність результатів.

Після приведення експериментальних ВАХ до стандартних умов тестування (STC), отримали ВАХ п'яти панелей (PV-1 – PV-5), як приклад на рисунку 5 показані експериментальні та приведені ВАХ панелі PV-1.

Для виявлення можливостей однодіодної та дводіодної моделей було проведено моделювання за визначеними параметрами п'яти панелей в стандартних умовах (STC).

Для кількісної оцінки точності моделей використано наступний набір метрик:

$R^2$  - коефіцієнт детермінації;

RMSE - середньоквадратична помилка, забезпечує оцінку абсолютної величини помилки;

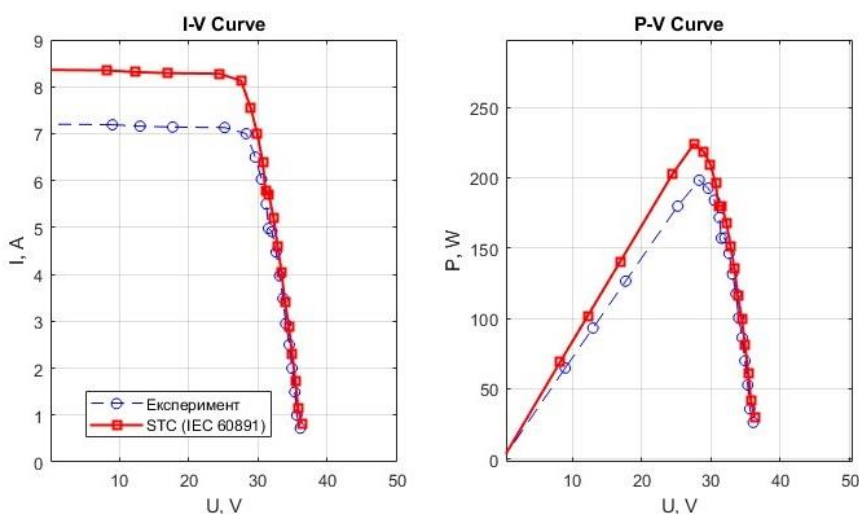


Рис.5 - Експериментальні та приведені ВАХ панелі PV-1,  $T=26^{\circ}\text{C}$ ,  $860\text{W}/\text{m}^2$

MAPE - середня відносна помилка, дає оцінку відносної стійкості;

Pmax - помилка визначення максимальної потужності, важливо для практичного застосування;

MBE - помилка усунення, забезпечує оцінку систематичного усунення.

Як приклад на рисунку 6 наведені ВАХ панелі PV-2 за умов STC, результати аналізу моделювання за стандартних умов - в таблиці 1.

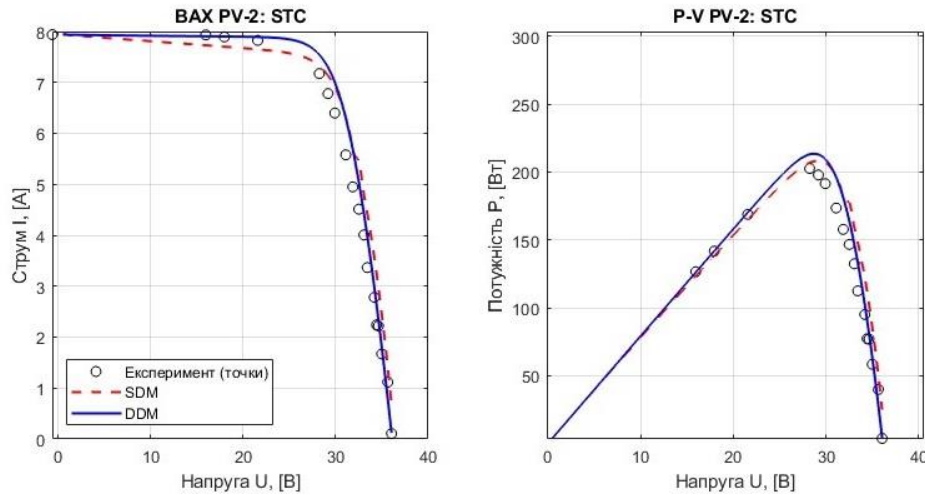


Рис.6 - ВАХ панелі PV-2 за умов STC, T=25°C, 1000W/m<sup>2</sup>

Таблиця 1 - Порівняння результатів моделювання за умовами STC

Панелі	PV-1	PV-2	PV-3	PV-4	PV-5
R <sup>2</sup> _SDM	0.958	0.958	0.994	0.976	0.976
R <sup>2</sup> _DDM	0.786	0.975	0.971	0.980	0.980
RMSE_SDM, A	0.365	0.349	0.139	0.245	0.245
RMSE_DDM, A	0.829	0.266	0.318	0.224	0.224
MBE_SDM, A	0.247	0.062	0.090	0.104	0.104
MBE_DDM, A	0.369	0.132	0.166	0.074	0.074
MAPE_SDM%	6.978	6.909	5.580	22	22
MAPE_DDM%	12.92	3.360	4.648	5.06	5.06
Pmax_Error_SDM, %	-4.66	2.752	0.579	1.236	1.236
Pmax_Error_DDM, %	5.920	5.326	5.347	2.270	2.270

Ми бачимо, що обидві моделі демонструють високу точність апроксимації.

Дуже важливо порівняти результати моделювання однодіодної та дводіодної моделі з результатами експерименту. Значення ВАХ експериментально були отримані при різних значеннях освітленості і температури панелей. Тому було проведено моделювання для кожної панелі, в умовах, в яких виконувався експеримент.

Як приклад на рисунку 7 показані вольтамперні характеристики (ВАХ) панелі PV-2 при реальних умовах (Real). В таблиці 2 показані похибки моделювання при використанні однодіодної (SDM) та дводіодної (DDM) моделей за визначеними параметрами реальних умов.

Аналіз показав, що глобальна точність (R<sup>2</sup> та RMSE) при моделюванні ВАХ краще в однодіо-

дній схемі. Це говорить про більш стійку апроксимацію при порівнянні з дводіодною схемою.

Аналіз відносної помилки (MAPE) демонструє різну поведінку моделей залежно від умов. З одного боку, при STC дводіодна краще, але нас більше цікавлять реальні умови, а тут краще виглядає однодіодна схема. Це свідчить про більшу чутливість DDM до зміни умов експлуатації.

Дуже важлива точність моделювання в зоні максимально потужності (Pmax). Обидві моделі дають невелику похибку. Однодіодна точніше в 6 із 10 сценаріїв. Що цікаве, точність апроксимації ВАХ не гарантує точність визначення максимальної потужності.

Однодіодна модель більш стабільна при зміні умов експлуатації і демонструє передбачену поведінку.

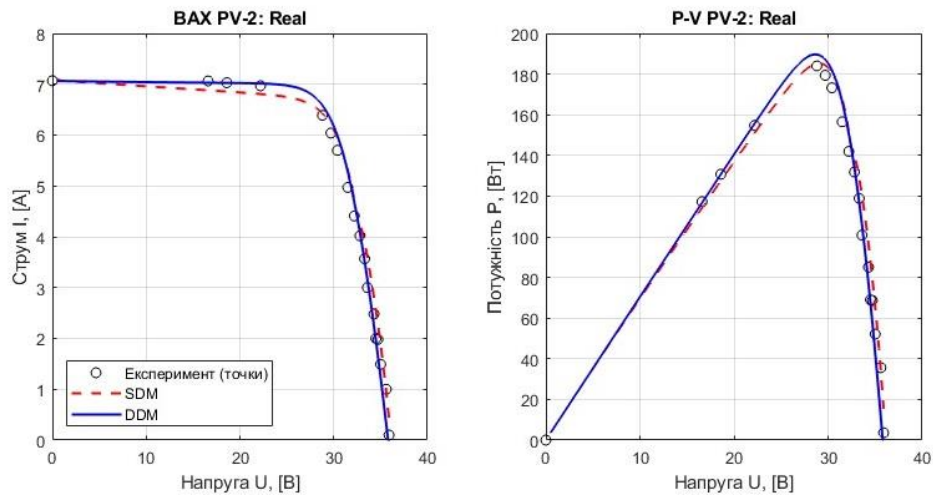


Рис.7 - ВАХ панелі PV-2 при реальних умовах (Real),  $T=26^{\circ}\text{C}$ ,  $890\text{W}/\text{m}^2$

Таблиця 2 - Порівняння результатів моделювання за умовами Експерименту (Real)

Панелі	PV-1	PV-2	PV-3	PV-4	PV-5
R <sup>2</sup> -SDM	0.950	0.985	0.997	0.997	0.983
R <sup>2</sup> -DDM	0.862	0.989	0.985	0.955	0.959
RMSE_SDM, A	0.323	0.173	0.082	0.090	0.238
RMSE_DDM, A	0.540	0.147	0.201	0.353	0.368
MBE_SDM, A	0.166	-0.02	0.044	0.006	0.013
MBE_DDM, A	0.204	0.030	0.095	-0.084	-0.052
MAPE_SDM, %	6.627	3.662	3.270	1.513	4.771
MAPE_DDM, %	9.428	3.372	2.869	8.872	9.210
Pmax_Error_SDM, %	-5.695	0.607	-0.39	-1.168	0.235
Pmax_Error_DDM, %	2.320	3.037	3.750	-1.188	0.509

### Висновки

Проведене дослідження показало, що однодіодна модель забезпечує більш стійкий та відтворюваний опис ВАХ фотоелектричних модулів, особливо в реальних умовах експлуатації.

Дводіодна модель, незважаючи на більш детальний фізичний опис процесів, не демонструє систематичної переваги за точністю і в ряді випадків поступається однодіодній моделі. Точність дводіодної моделі суттєво залежить від умов експлуатації та погіршується при підвищених значеннях температури та освітленості.

Встановлено, що підвищення точності апроксимації вольт-амперної характеристики не гарантує підвищення точності визначення максимальної потужності.

Однодіодна модель може бути рекомендована для інженерних розрахунків завдяки своїй стійкості та передбачуваності.

Для підвищення точності моделювання рекомендується враховувати чутливість параметрів моделей до температури та освітленості при їх ідентифікації.

### Конфлікти інтересів

Автор засвідчує відсутність будь-яких особистих, професійних чи фінансових конфліктів інтересів, які могли б поставити під сумнів достовірність отриманих даних чи незалежність їхнього аналізу в цій статті.

### Фінансування

Дослідження проводилося без залучення стороннього фінансування.

### Наявність даних

Усі вихідні дані наведені безпосередньо в тексті публікації у числовій або графічній формі.

### Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що штучний інтелект використовувався лише як допоміжний інструмент для пошуку та моніторингу відкритих джерел. Безпосередньо розробка методології, аналітична частина, формування висновків, а також підготовка ілюстративного матеріалу виконані автором особисто.

### Внесок автора

Кетрарь О. А.: повний цикл підготовки статті – від ідеї до візуалізації та фінального редагування тексту – є результатом індивідуальної роботи автора.

### Список використаної літератури

1. Villalva, M. G., Gazoli, J. R. and Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), pp.1198–1208. doi:<https://doi.org/10.1109/tpel.2009.2013862>.
2. Shockley, W. and Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), pp.510–519. doi:<https://doi.org/10.1063/1.1736034>.
3. De Soto, W., Klein, S. A. and Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1), pp.78–88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>.
4. El-Adawi, M. A. K. and Al-Nuaim, I. A. (2014). New Approach to Modeling a Solar Cell in Relation to Its Efficiency—Laplace Transform Technique. *Optics and Photonics Journal*, [online] 4(8). Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1273935> [Accessed 05 May 2026].
5. Skoplaki, E. and Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), pp.614–624. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
6. Song, Z., Fang, K., Sun, X., Liang, Y., Lin, W., Xu, C., Huang, G. and Yu, F. (2021). An Effective Method to Accurately Extract the Parameters of Single Diode Model of Solar Cells. *Nanomaterials*, [online] 11(10), p.2615. doi:<https://doi.org/10.3390/nano11102615>.
7. Jain, A. (2004). Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 81(2), pp.269–277. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.11.018>.
8. Saloux, E., Teyssedou, A. and Sorin, M. (2011). Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. *Solar Energy*, 85(5), pp.713–722. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.022>.
9. Leidos Canada Inc, Janssen, E. and Delidjakova, K. (2015). *Photovoltaic Module Performance Testing and Energy Assessment for Canada. Sustainable Technologies Evaluation Program, Toronto and Region Conservation Authority*. [online] Toronto, Ontario: Toronto and Region Conservation Authority . Available at: [https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2016/01/IEC61853\\_FinalReport\\_Dec2015.pdf](https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2016/01/IEC61853_FinalReport_Dec2015.pdf) [Accessed 05 May 2026].
10. Al-Khazzar, A. A. A. and Hashim, E. T. (2016). Temperature Effect on Power Drop of Different Photovoltaic Modules. *Journal Engineering*, [online] (5), pp.129–143. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/284970252> [Accessed 05 May 2026].
11. Trejos, A., Ramos-Paja, C. A. and Saavedra-Montes, A. J. (2016). Techniques for modeling photovoltaic systems under partial shading. *Tecnura*, [online] 20(48), pp.171–183. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/307668450\\_Techniques\\_for\\_modeling\\_photovoltaic\\_systems\\_under\\_partial\\_shading](https://www.researchgate.net/publication/307668450_Techniques_for_modeling_photovoltaic_systems_under_partial_shading) [Accessed 05 May 2026].
12. King, D. L., Boyson, W. E. and Kratochvill, J. A. (2004). *Photovoltaic Array Performance Model*. [online] Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/919131> [Accessed 05 May 2026].
13. Маєвський, Д. А., Винаков, О. Ф. та Кетрарь, О. А. (2024). ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З РІЗНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, (41(117)), с. 12–22. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.41.117.2024.2>.
14. Walker, G. R. (2001). Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model. *Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering*, [online] 21(1), pp.49–55. Available at: <https://eprints.qut.edu.au/63580> [Accessed 05 May 2026].

15. Gow, J. A. and Manning, C. D. (1999). Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 146(2), p.193. doi:<https://doi.org/10.1049/ip-epa:19990116>.
16. Woyte, A., Richter, M., Moser, D., Mau, S., Reich, N. and Jahn, U. (2013). Monitoring of Photovoltaic Systems: User Stories and Interpretation Guidelines. [online] 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Paris, France. pp.1–9. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/conference-papers/conference-papers-2013.html> [Accessed 05 May 2026].
17. Lorenzo, E. (1994). *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. [online] PROGENSA, p.316. Available at: [https://books.google.com.ua/books/about/Solar\\_Electricity.html?id=IYc53xZyxZQC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Solar_Electricity.html?id=IYc53xZyxZQC&redir_esc=y) [Accessed 05 May 2026].

## References

1. Villalva, M. G., Gazoli, J. R. and Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), pp.1198–1208. doi:<https://doi.org/10.1109/tpel.2009.2013862>.
2. Shockley, W. and Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), pp.510–519. doi:<https://doi.org/10.1063/1.1736034>.
3. De Soto, W., Klein, S. A. and Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1), pp.78–88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>.
4. El-Adawi, M. A. K. and Al-Nuaim, I. A. (2014). New Approach to Modeling a Solar Cell in Relation to Its Efficiency—Laplace Transform Technique. *Optics and Photonics Journal*, [online] 4(8). Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1273935> [Accessed 05 May 2026].
5. Skoplaki, E. and Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), pp.614–624. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
6. Song, Z., Fang, K., Sun, X., Liang, Y., Lin, W., Xu, C., Huang, G. and Yu, F. (2021). An Effective Method to Accurately Extract the Parameters of Single Diode Model of Solar Cells. *Nanomaterials*, [online] 11(10), p.2615. doi:<https://doi.org/10.3390/nano11102615>.
7. Jain, A. (2004). Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 81(2), pp.269–277. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.11.018>.
8. Saloux, E., Teyssedou, A. and Sorin, M. (2011). Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. *Solar Energy*, 85(5), pp.713–722. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.022>.
9. Leidos Canada Inc, Janssen, E. and Delidjakova, K. (2015). *Photovoltaic Module Performance Testing and Energy Assessment for Canada. Sustainable Technologies Evaluation Program, Toronto and Region Conservation Authority*. [online] Toronto, Ontario: Toronto and Region Conservation Authority . Available at: [https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2016/01/IEC61853\\_FinalReport\\_Dec2015.pdf](https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2016/01/IEC61853_FinalReport_Dec2015.pdf) [Accessed 05 May 2026].
10. Al-Khazzar, A. A. A. and Hashim, E. T. (2016). Temperature Effect on Power Drop of Different Photovoltaic Modules. *Journal Engineering*, [online] (5), pp.129–143. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/284970252> [Accessed 05 May 2026].
11. Trejos, A., Ramos-Paja, C. A. and Saavedra-Montes, A. J. (2016). Techniques for modeling photovoltaic systems under partial shading. *Tecnura*, [online] 20(48), pp.171–183. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/307668450\\_Techniques\\_for\\_modeling\\_photovoltaic\\_systems\\_under\\_partial\\_shading](https://www.researchgate.net/publication/307668450_Techniques_for_modeling_photovoltaic_systems_under_partial_shading) [Accessed 05 May 2026].
12. King, D. L., Boyson, W. E. and Kratochvill, J. A. (2004). *Photovoltaic Array Performance Model*. [online] Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/919131> [Accessed 05 May 2026].
13. Maevsky, D.A., Vynakov, O.F. and Ketrar, O.A. (2024). EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SOLAR PANELS WITH DIFFERENT CHARACTERISTICS. *Electrotechnic and Computer Systems*, (41(117)), pp.12–22. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.41.117.2024.2>.

14. Walker, G. R. (2001). Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model. *Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering*, [online] 21(1), pp.49–55. Available at: <https://eprints.qut.edu.au/63580> [Accessed 05 May 2026].

15. Gow, J. A. and Manning, C. D. (1999). Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 146(2), p.193. doi:<https://doi.org/10.1049/ip-epa:19990116>.

16. Woyte, A., Richter, M., Moser, D., Mau, S., Reich, N. and Jahn, U. (2013). Monitoring of Photovoltaic Systems: User Stories and Interpretation Guidelines. [online] 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Paris, France. pp.1–9. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/conference-papers/conference-papers-2013.html> [Accessed 05 May 2026].

17. Lorenzo, E. (1994). *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. [online] PROGENSA, p.316. Available at: [https://books.google.com.ua/books/about/Solar\\_Electricity.html?id=IYc53xZyxZQC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Solar_Electricity.html?id=IYc53xZyxZQC&redir_esc=y) [Accessed 05 May 2026].

Отримано (Received) 23.04.2026

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 30.04.2026

Прийнято (Accepted) 05.05.2026

Опубліковано (Published) 31.05.2026

## Study of the Accuracy of Solar Panels Modeling Taking into Account the Influence of Operational Factors

О. А. Кетрарь, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0098-7450>; e-mail: [ketraroa@gmail.com](mailto:ketraroa@gmail.com)

Odesa Polytechnic National University

**Abstract.** *The article compares the results of experimental research of solar panels with mathematical models made in Matlab, Simulink. The reduction of experimental data to standard testing conditions is applied. The analysis of modeling of single-diode and two-diode models of solar panels is carried out. The accuracy of the models is assessed using a set of statistical and practical metrics. Suggestions are made for further research into the operating models of solar panels.*

**Keywords:** *solar panel, current-voltage characteristic, single-diode model, double-diode model, standard testing conditions, efficiency improvement.*

*Article citation:* Ketrar O. A. (2026). Study of the Accuracy of Solar Panels Modeling Taking into Account the Influence of Operational Factors. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2026, 46(122), pp.50-59. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.5>

### Про автора (About the author)



**Кетрарь Олег Анатолійович**, аспірант кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: [ketraroa@gmail.com](mailto:ketraroa@gmail.com); тел.: +38-098-404-1715

**Oleg Ketrar**, Postgraduate Student of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: [ketraroa@gmail.com](mailto:ketraroa@gmail.com); ph.: +38-098-404-1715

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0098-7450>