

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-04>

УДК 621.315.592.1

**КИРИСОВ І. Г.**, доктор філософії,

старший викладач кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: [igorkirisov@karazin.ua](mailto:igorkirisov@karazin.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-8880>

**МЕЛЬНИКОВ В. Є.**, кандидат технічних наук,

доцент кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: [melnykov.viacheslav@gmail.com](mailto:melnykov.viacheslav@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6427-6805>

**БУДАНОВ М. П.**, доктор філософії,

доцент кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: [budanov@karazin.ua](mailto:budanov@karazin.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8032-0562>

**ПОНОМАРЕНКО О. М.**,

асистент кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: [olena.ponomarenko@karazin.ua](mailto:olena.ponomarenko@karazin.ua) ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-1777>

<sup>1</sup>*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,*

Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ТА ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

У статті здійснено комплексний аналіз сучасних моделей сонячних елементів, які описують їх електрофізичні характеристики та внутрішні процеси перетворення сонячної енергії в електричну. Узагальнено підходи до математичного моделювання фотоелектричних перетворювачів із урахуванням їх структурно-матеріальних особливостей та фізичних механізмів генерації й рекомбінації носіїв заряду.

Досліджено залежності основних фотоелектричних параметрів сонячних елементів від впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, зокрема температури, інтенсивності та спектрального складу сонячного випромінювання. Встановлено, що підвищення температури призводить до деградації ключових експлуатаційних характеристик, зокрема коефіцієнта корисної дії, напруги холостого ходу, коефіцієнта заповнення та параметрів вольт-амперної характеристики. Обґрунтовано, що зазначені зміни зумовлені варіаціями ширини забороненої зони, зростанням рівня рекомбінаційних процесів і зниженням рухливості носіїв заряду в напівпровідникових матеріалах.

Розроблено удосконалену методику розрахунку основних електрофізичних параметрів сонячних елементів, зокрема струму короткого замикання та напруги холостого ходу, яка базується на врахуванні багаточислової структури матеріалів, їх фізико-хімічних властивостей та умов експлуатації. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність визначення вихідної потужності, коефіцієнта корисної дії та стабільності вольт-амперних характеристик у реальних умовах функціонування.

Особливу увагу приділено аналізу впливу змін освітленості, включаючи варіації інтенсивності та спектрального складу сонячного випромінювання, що суттєво впливають на генерацію фотоструму та формування вихідних електричних параметрів. Показано, що динамічні зміни умов освітлення впродовж доби або в умовах нестабільного випромінювання спричиняють нелінійні зміни характеристик сонячних елементів, що необхідно враховувати при їх моделюванні та експлуатації.

Обґрунтовано необхідність подальшого вдосконалення існуючих моделей сонячних елементів шляхом інтеграції температурних, спектральних та структурних факторів, що забезпечить підвищення достовірності розрахунків і ефективності функціонування фотоелектричних систем в умовах реальної експлуатації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** сонячний елемент, модель сонячного елемента, фотоелектричне перетворення, математичне моделювання, електрофізичні параметри, коефіцієнт корисної дії, вольт-амперна характеристика, інформаційно-вимірвальні системи, кваліметрія, фотоелектричний модуль.



**Як цитувати:** Кирисов І. Г., Мельников В. Є., Буданов М. П., Пономаренко О. М. Дослідження кількісних та якісних параметрів моделі сонячного елемента. *Машинобудування*. 2026. Вип. 37. С. 49-63. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-04>

### **Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Сучасний розвиток енергетики дедалі більше орієнтується на використання відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергія займає провідне місце. Це зумовлено необхідністю зменшення залежності від викопних палив, зниженням негативного впливу на довкілля та забезпеченням енергетичної безпеки. У цьому контексті сонячні елементи (СЕ) виступають ключовими складовими фотоелектричних систем, а їх ефективність значною мірою визначається точністю математичних моделей, що описують їх роботу. Моделювання СЕ дозволяє досліджувати їх поведінку за різних умов експлуатації без необхідності проведення дорогих експериментальних випробувань. Особливу увагу приділяють визначенню кількісних параметрів СЕ, таких як напруга холостого ходу, струм

короткого замикання, коефіцієнт заповнення та максимальна вихідна потужність, а також якісних характеристик, що відображають стабільність, чутливість до температури та рівня освітленості. Комплексний аналіз цих параметрів є важливим для оптимізації конструкції СЕ і підвищення ефективності фотоелектричних систем.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю вдосконалення моделей СЕ, які адекватно відображають фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідникових структурах, та забезпечували високу точність прогнозування їх характеристик. Аналіз кількісних і якісних параметрів моделі СЕ дозволяє визначити ступінь її відповідності реальним умовам роботи та встановити фактори, що впливають на ефективність перетворення сонячної енергії.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В роботі [1] проведено моделювання темнових та світлових ВАХ. Встановлені оптимальні конструктивні параметри СЕ, що забезпечують максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелектричного модуля.

В роботі [2] проведено моделювання темнових та світлових ВАХ, а також спектральних розподілів квантової ефективності плівкових СЕ на основі ідеальних. У роботі [1] наведені формули та розвинений алгоритм для розрахунку основних параметрів однодіодної схеми заміщення, який дає змогу визначити їх залежність від напруги на р-п-переході.

В роботі [3] розроблено геометричну модель структури сприймаючої поверхні фотоелектричного модуля, яка описує та враховує геометричні зміни структури напівпровідникового шару за наявності пошкоджуючих дефектів у вигляді локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин. Отримані в роботі аналітичні вирази для вдосконаленої моделі встановлюють зв'язок між вихідними параметрами фотоелектричного модуля та визначають

ступінь заповнення вольт-амперної характеристики для вихідної потужності та ККД.

В роботі [4] проведено моделювання структури фотоелектричного модуля (ФЕП) для створення математичного алгоритму розрахунку ФЕП із визначеними характеристиками. Проведена оптимізація марематичного апарату моделі універсальної структури ФЕП.

В роботі [5] була розроблена математичну модель залежності потужності фотоелектричного модуля від кута повороту відносно сонця. Розроблена модель враховує температуру навколишнього середовища, температуру, що отримав фотоелектричний модуль у процесі функціонування, вплив вітру на температуру модуля, а також вплив часу доби, дня року, кутів нахилу фотоелектричного модуля відносно сонця, можливостей світловідбивання оточуючого середовища.

В роботі [6] розглянуто методику знаходження параметрів еквівалентних схем заміщення фотоелектричного модуля за допомогою даних, які надаються виробниками. Розроблена методика моделювання

вольт-амперних характеристик застосована для одно- та двохдiodної схем заміщення фотоелектричного модуля. Показано, що запропонована методика забезпечує найкращу точність апроксимації.

В роботах [7-9] розглянуто

моделювання роботи фотоелектричного модуля з використанням середовища MATLAB/Simulink, зроблено порівняння змодельованих характеристик фотоелектричних модулів, з даними, наведеними у технічній документації.

### Мета та завдання дослідження

Метою статті є моделювання кількісних та якісних параметрів фотоелектричного модуля для стабілізації

та точності вольт-амперних характеристик за допомогою моделей кваліметрії.

### Виклад основного матеріалу

Моделювання параметрів СЕ є ключовим елементом для підвищення його ефективності, надійності та економічної доцільності, що, сприяє широкому практичному застосуванню фотоелектричних модулів.

Особливостями моделювання кількісних та якісних параметрів СЕ є:

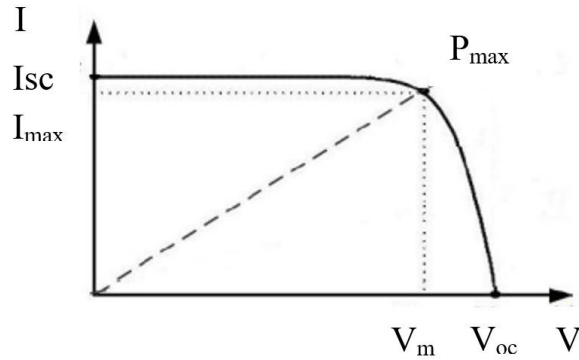
- оптимізація проектування, що допомагає удосконалити їх конструкцію та матеріали для досягнення максимальної продуктивності;
- покращення ефективності, шляхом аналізу параметрів, таких як: струму короткого замикання, напруги холостого ходу та внутрішнього опору;
- ідентифікація дефектів, у виробничому процесі та відхилення від розрахункових значень, що може сигналізувати про наявність забруднень;
- прогнозування продуктивності, СЕ під впливом різних зовнішніх факторів (температура, рівень освітлення), що є важливим для їхньої експлуатації в реальних умовах;
- порівняльний аналіз різних типів СЕ, дозволяючи досліджувати їх переваги та недоліки та вибирати ефективні рішення для конкретних застосувань;
- адаптація до нових матеріалів;
- зниження виробничих та експлуата

ційних витрат, що робить сонячну енергетику доступною та конкурентоспроможною;

- розробки нових технологій, дозволяючи швидше та ефективніше проводити експерименти та аналізувати їх результати;

Особливостями побудови вольт-амперних характеристик (ВАХ) СЕ є (рис. 1):

- точне передбачення параметрів СЕ при різних умовах експлуатації, що критично важливо для оптимізації конструкції та матеріалів, а також безпосередньо впливає на вихідну потужність та ефективність;
- виявлення дефектів в матеріалах та технології виробництва, відхилення від розрахункових значень, що може сигналізувати про проблеми, такі як недостатня фотопровідність або неефективне поглинання світла;
- врахування впливу зовнішніх факторів, таких як температура, рівень освітлення та кут падіння сонячних променів, а також прогнозування, роботи СЕ в реальних умовах, що особливо важливо для проектування сонячних електростанцій;
- проведення порівняльного аналізу різних типів СЕ, що допомагає визначити ефективні рішення для конкретних умов.



**Рис. 1** – Вольт-амперна характеристика сонячного елемента  
**Fig. 1** – Volt-ampere characteristic of a solar cell

Використання моделей ВАХ у системі управління якістю, допомагає встановити стандарти та проводити регулярні перевірки, що сприяє підвищенню надійності та довговічності СЕ.

У роботі було розглянуто зв'язок моделі СЕ з його ключовими електричними характеристиками. Модель СЕ є критично важливим інструментом для дослідження та оптимізації електричних характеристик, таких як: струм короткого замикання ( $I_{sc}$ ), напруга холостого ходу ( $U_{oc}$ ), внутрішній опір ( $R_{in}$ ), фотострум ( $I_{ph}$ ), вихідна потужність ( $P_{вих}$ ), і коефіцієнт корисної дії (ККД).

Струм короткого замикання є максимальним струмом, який СЕ може видати за умови відсутності навантаження, тобто при нульовій напрузі. Високий струм короткого замикання свідчить про хороші оптичні властивості матеріалу СЕ та ефективне поглинання світла [14-15]. Струм короткого замикання є індикатором здатності СЕ генерувати електроенергію і безпосередньо пов'язаний із фотострумом. Модель СЕ, дозволяє передбачити струм короткого замикання, на основі фотоструму, що створюється при освітленні. У математичних моделях, таких як модель однотипного діода, струм короткого замикання обчислюється як функція інтенсивності сонячного випромінювання та температури.

При порівнянні теоретичних значень струму короткого замикання з експериментально отриманими даними, можна виявити невідповідності, які вказують на дефекти в матеріалі СЕ. Якщо фактичний струм короткого замикання, нижчий за очікуваний, це може свідчити про наявність забруднень на поверхні напівпровідника,

що підтверджується лабораторними тестами.

При порівнянні однотипних СЕ критичним параметром є дифузійна довжина і пасивація поверхні. У СЕ, з рівномірною генерацією, струм короткого замикання можна записати, згідно виразу (1):

$$I_{sc} = q \cdot G (L_n + L_p), \quad (1)$$

де  $I_{sc}$  - струм короткого замикання;  $G$  - швидкість генерації;  $q$  - заряд електрона;  $L_n$  і  $L_p$  - дифузійна довжина електронів і дірок відповідно.

Хоча вираз (1) використовує деякі припущення, він показує, що струм короткого замикання сильно залежить від швидкості генерації та дифузійної довжини.

Струм короткого замикання визначається кількістю фотонів, що поглинаються напівпровідниковим матеріалом СЕ. Коли фотон з достатньою енергією взаємодіє з атомами матеріалу, може вибити електрон з його орбіти, створюючи пару «електрон-дірка». Ці вільні електрони і дірки починають рухатися під впливом внутрішнього електричного поля, створеного р - n переходом, що у результаті призводить до виникнення струму.

Для СЕ, що працюють на кремнії, струм короткого замикання значною мірою залежить від:

- інтенсивності сонячного випромінювання;
- спектра сонячного випромінювання;
- температури;

Для передбачення струму короткого замикання використовують різні матема-

тичні моделі, серед яких найбільш поширені [3,10]:

- модель однотипного діода, ця модель заснована на рівнянні діода і дозволяє обчислювати струм короткого замикання, як функцію від інтенсивності світла та температурних умов;

- моделі на основі чисельних симуляцій, що використовують чисельні методи та дозволяють враховувати геометрію сонячного елемента.

Порівняння розрахункових значень струму короткого замикання з експериментально отриманими даними, дозволяє оцінити точність моделей, та виявити потенційні проблеми у виробничому процесі. Якщо фактичний струм короткого замикання виявляється значно нижчим за очікуваний, це може вказувати на: забруднення на поверхні (пил, бруд або органічні забруднення); неправильна технологія виготовлення (дефекти кристалічної структури або неякісні матеріали); неефективна подача світла (неправильний кут установки фотоелектричного модуля), що може призвести до зниження інтенсивності сонячного випромінювання на поверхні СЕ.

Основними чинниками, які впливають на значення струму короткого замикання, є: температурні коливання; використання антивідбивних покриттів, які можуть значно підвищити струм короткого замикання за рахунок зменшення відбивної здатності СЕ та збільшення поглинання світла; структура напівпровідникового шару.

Моделі, що описують струм короткого замикання, можуть бути корисними для оцінки довгострокової надійності СЕ. Прогнозування змін струму короткого замикання в результаті деградації матеріалу з часом, дозволяє розробити надійні фотоелектричні модулі, що критично важливо для забезпечення їх довговічності та високої продуктивності.

Струм короткого замикання є важливим параметром, який впливає на загальну ефективність СЕ. Модель СЕ дозволяє, як передбачити струм короткого замикання, так і виявити причини можливих відхилень від очікуваних значень. Це робить модель важливим інструментом для оптимізації та підвищення ефективності сонячних технологій.

Напруга холостого ходу ( $U_{oc}$ ) - це максимальна напруга, яку СЕ може розвинути за відсутності навантаження. Для прогнозування напруги холостого ходу в моделях СЕ використовують такі параметри: температура, внутрішній опір, рівень освітлення [5,6]. У математичних моделях, заснованих на термодинамічних принципах, напругу холостого ходу, можна виразити через температуру та рівень освітленості згідно виразу (2):

$$U_{oc} = \frac{k \cdot T}{e} \ln \left( \frac{I_F}{I_0} + 1 \right), \quad (2)$$

де  $U_{oc}$ - напруга холостого ходу  $k$  – постійна Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $e$  – заряд електрона,  $I_F$  – фотострум, А;  $I_0$ – зворотний струм насичення діода.

У разі відхилень напруги холостого ходу від розрахункових значень, можна використовувати моделі для аналізу причин цих відхилень.

Напруга холостого ходу визначається рівновагою між генерацією та рекомбінацією носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі. Коли СЕ освітлений, фотонна енергія призводить до утворення пар «електрон-дірка». Внутрішнє електричне поле, створене р-п переходом, сприяє розподілу цих пар, спрямовуючи електрони до анода і дірки до катода. За відсутності навантаження, носії продовжують генеруватися, але рекомбінація також триває. Напруга холостого ходу досягає максимального значення, коли потоки заряду пристрої знаходяться в рівновазі, тобто швидкість генерації носіїв заряду дорівнює швидкості їх рекомбінації.

Існують різні моделі для розрахунку напруги холостого ходу, а саме: термодинамічні моделі, які ґрунтуються на принципах термодинаміки та дозволяють виразити напругу холостого ходу через температуру та рівень освітленості; моделі на основі чисельних симуляцій, які можуть враховувати ефекти, такі як градієнти температури, неоднорідності у структурі матеріалу та інші фактори, що впливають на напругу холостого ходу. Ці моделі можуть використовувати методи кінцевих елементів або інших чисельних технік для симуляції поведінки СЕ в різних умовах.

Напруга холостого ходу залежить від наступних факторів: температури; рівня освітлення; стану поверхні. Зі збільшенням температури напруга холостого ходу знижується. Це відбувається через збільшення рекомбінації носіїв заряду, що пов'язане із збільшенням теплової енергії. Такі моделі допомагають передбачити, як зміна температури вплине на напругу холостого ходу. Збільшення рівня освітлення підвищує напругу холостого ходу, оскільки збільшується струм короткого замикання. В умовах, коли рівень освітлення стає надмірно високим, можуть виникнути ефекти, пов'язані з насиченням, що також необхідно враховувати у моделях. Забруднення та різні дефекти на поверхні напівпровідника можуть знижувати напругу холостого ходу. Наявність мікротріщин або забруднень може призвести до збільшення рекомбінації, що буде видно при порівнянні експериментальних та розрахункових значень.

Аналіз відхилень напруги холостого ходу від розрахункових значень, дає змогу виявити потенційні проблеми, а саме: зниження напруги холостого ходу при підвищенні температури може свідчити, що матеріал не витримує теплових навантажень; відмінності між експериментальними даними та моделями можуть вказувати на наявність дефектів у структурі або неефективність у технології виробництва.

Моделі, що описують напругу холостого ходу можуть бути використані для розробки ефективних СЕ, а також можуть бути корисними для прогнозування довговічності СЕ. Якщо дослідження показує, що напруга холостого ходу різко знижується за певних умов, це свідчить про необхідність проведення тестів на довговічність та надійність СЕ.

Напруга холостого ходу є важливим показником ефективності СЕ. Моделі, що описують напругу холостого ходу, дозволяють не тільки передбачити її значення, але й виявити причини відхилень, що є важливим кроком до оптимізації сонячних технологій. Це робить моделювання напруги холостого ходу важливим інструментом для дослідників та виробників, які прагнуть підвищити ефективність та надійність фотоелектричних модулів.

Внутрішній опір СЕ є ключовим параметром, що визначає його продуктивність, особливо в умовах реальної

експлуатації, коли елементи працюють під навантаженням. Цей параметр відображає опір, який зазнає струм при проходженні через СЕ, і він безпосередньо впливає на вихідну потужність та ККД. Моделі СЕ можуть включати розрахунок внутрішнього опору, що дозволяє оцінити, як цей внутрішній опір впливає на вихідну потужність та ККД. Вимірюючи напругу і струм на навантаженні, можна використовувати модель визначення внутрішнього опору, що важливо для оптимізації параметрів СЕ [7,8].

При аналізі даних про внутрішній опір та його залежності від умов експлуатації можна прогнозувати, як зміни температури, вологості та інших факторів можуть впливати на продуктивність СЕ. Внутрішній опір СЕ може бути визначено, як відношення зміни напруги до зміни струму в умовах роботи елемента. При цьому важливо враховувати, що внутрішній опір може змінюватись залежно від умов навколишнього середовища та стану самого елемента.

Внутрішній опір безпосередньо пов'язаний із вихідною потужністю СЕ. Коли внутрішній опір збільшується, частина вихідної потужності втрачається у вигляді тепла, що призводить до зниження ефективної напруги та струму на виході. Це, своєю чергою, знижує загальний ККД системи.

Моделі СЕ можуть включати розрахунок внутрішнього опору на основі параметрів, таких як температура, рівень освітлення і характеристики матеріалів. Математичні моделі можуть використовувати дані про напругу холостого ходу та струму короткого замикання для оцінки внутрішнього опору. При порівнянні теоретичних значень внутрішнього опору з даними одержаними експериментальним шляхом можна виявити відхилення, що вказують на проблеми в конструкції або виробництві СЕ. Фактори, які впливають на внутрішній опір: температура; вологість; деградація матеріалів.

Зі збільшенням температури внутрішній опір СЕ, зростає. Це пов'язано зі збільшенням теплових коливань атомів у напівпровідниковому матеріалі, що зумовлює зниження рухливості носіїв заряду і, отже, збільшення опору.

Висока вологість може впливати на внутрішній опір, особливо в умовах, коли

волога проникає в структуру СЕ. Це може призводити до корозії з'єднань та збільшення опору. З часом матеріали СЕ можуть деградувати, що також призводить до збільшення внутрішнього опору. У разі підвищення рекомбінації носіїв заряду або появи тріщини у структурі напівпровідника, внутрішній опір може значно зрости.

Аналіз даних про внутрішній опір та його залежність від умов експлуатації, дозволяє прогнозувати, як зміни довкілля впливатимуть на продуктивність СЕ. Якщо внутрішній опір різко зростає за певної температури, це може бути індикатором того, що матеріали елемента недостатньо стійкі до теплових навантажень.

Розуміння впливу внутрішнього опору на вихідну потужність, дозволяє оптимізувати систему СЕ. Якщо аналіз показує, що високий внутрішній опір знижує загальну продуктивність, можна розглянути можливості для покращення технології виробництва, а саме: оптимізація конструкції СЕ; використання нових напівпровідникових матеріалів з нижчим внутрішнім опором, які можуть значно підвищити ефективність СЕ.

Таким чином, внутрішній опір є важливим параметром, який значно впливає на продуктивність СЕ. Моделі, які враховують внутрішній опір, дозволяють не лише оцінити поточну ефективність, а й прогнозувати вплив різних факторів на продуктивність, що є критично важливим для розробки та оптимізації сонячних технологій.

Фотострум - це струм, створюваний СЕ в результаті поглинання світла, що призводить до генерації вільних електронів і дірок у напівпровідниковому матеріалі. Модель СЕ, заснована на принципах фотогальваніки, дозволяє передбачати фотострум на основі інтенсивності сонячного випромінювання та спектру світла. Моделі можуть враховувати різні параметри, такі як кут падіння світла, що дозволяє точно оцінити фотоструми в різних умовах.

Порівняння модельних та експериментальних даних по фотоструму, допомагає виявити фактори, що впливають на ефективність СЕ. Якщо фотострум нижче очікуваного, це може вказувати на проблеми з оптичними властивостями матеріалу, що вимагає додаткового аналізу та корекції моделей. Фотострум

визначається згідно виразу (3), як кількість електричних зарядів, створюваних в одиницю часу під впливом світла:

$$I_F = \frac{E}{E_0} [I_{sc} + k_{I_{sc}}(T - T_0)] \quad (3)$$

де  $I_F$  – фотострум, А,  $E$  – енергетична освітленість, Вт/м<sup>2</sup>,  $E_0=1000$  Вт/м<sup>2</sup> – енергетична освітленість при стандартних умовах,  $I_{sc}$  – струм короткого замикання, А,  $k_{I_{sc}}$  – температурний коефіцієнт струму короткого замикання,  $T$  – абсолютна температура,  $T_0$  – поточна температура.

Фотострум пропорційний інтенсивності сонячного випромінювання, що падає поверхню СЕ. Важливо відзначити, що фотострум може залежати від спектру сонячного випромінювання, оскільки різні матеріали по-різному реагують на різні довжини хвиль світла.

Сучасні моделі СЕ враховують такі фактори, які впливають на фотострум: інтенсивність сонячного випромінювання; спектр світла; кут падіння світла. Моделі можуть використовувати дані про сонячне випромінювання в різних умовах, включаючи різні пори року та кліматичні зони, що дозволяє прогнозувати значення фотоструму для конкретних умов. Різні напівпровідникові матеріали мають різні спектри поглинання. Моделі можуть включати інформацію про взаємодію різної довжини хвиль світла із матеріалом, що дозволяє точно прогнозувати фотострум.

При зміні кута падіння, змінюється ефективна площа, на яку падає світло, і, отже, кількість фотонів, що поглинаються. Моделі можуть враховувати ці зміни для точного розрахунку фотоструму. Порівняння передбачених моделлю значень фотоструму з експериментально вимірними даними відіграє важливу роль оптимізації сонячних елементів.

До факторів, що впливають на ефективність СЕ відносяться: оптичні властивості матеріалу, якість поверхні, температура. Якщо вимірний фотострум нижче очікуваного, це може вказувати на проблеми з оптичними властивостями матеріалу, такими як розсіювання світла. Наявність забруднень або недостатня прозорість верхніх шарів може призводити до втрат світлової енергії. Нерівності та

дефекти на поверхні СЕ можуть перешкоджати нормальному проникненню світла. Дослідження поверхні СЕ за допомогою методів мікроскопії допоможе виявити такі дефекти. При підвищенні температури спостерігається зниження ефективної рухливості носіїв заряду, що може призводити до зменшення фотоструму. Моделі, що враховують теплові ефекти, дозволяють точно передбачати зміни фотоструму.

Різні матеріали по різному взаємодіють зі світлом, це дозволяє розробляти нові напівпровідники, які краще поглинають світло у широкому діапазоні довжин хвиль. Використання спеціальних покриттів зменшує відбиття світла, що може значно підвищити фотострум. Моделі допомагають передбачити, як такі покриття впливатимуть на продуктивність СЕ. Системи, які автоматично змінюють кут нахилу фотоелектричних модулів для оптимального отримання сонячного світла протягом дня, можуть значно збільшити фотострум і вихідну потужність. Постійний моніторинг фотоструму в різних умовах експлуатації також важливий для оцінки довговічності та надійності СЕ. Збір даних про фотострум з часом, дозволяє виявити потенційні проблеми, такі як деградація матеріалів або зміни в навколишньому середовищі.

Фотострум є одним з ключових параметрів, що визначають ефективність СЕ. Моделі, які враховують різні фактори, що впливають на фотострум, відіграють важливу роль у прогнозуванні продуктивності сонячних систем.

Вихідна потужність СЕ є добутком струму та напруги, що робить її критично важливою для оцінки його загальної ефективності. Максимальна вихідна потужність СЕ  $P_{max}$  визначається згідно виразу (4):

$$P_{max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot F_z \quad (4)$$

де  $P_{max}$  – максимальна вихідна потужність СЕ,  $I_{sc}$  – струм короткого замикання,  $U_{oc}$  – напруга холостого ходу,  $F_z$  – коефіцієнт заповнення ВАХ СЕ.

Моделі СЕ дозволяють передбачити вихідну потужність залежно від струму короткого замикання, напруги холостого ходу, внутрішнього опору, зміни температури та освітлення, що дозволяє точно оцінювати продуктивність у реальних умовах.

Аналіз експериментальних даних про вихідну потужність у поєднанні з моделями, дозволяє виявити оптимальні умови експлуатації, а також визначити, як поліпшення в матеріалах або технологіях можуть підвищити ефективність перетворення сонячної енергії. Вихідна потужність залежить не тільки від максимальних значень струму та напруги, а й від реальних умов роботи СЕ.

Моделі СЕ можуть враховувати вплив зовнішніх факторів (температура, рівень освітлення) на вихідну потужність. Підвищення температури, як правило, знижує напругу холостого ходу і, отже, вихідну потужність. Моделі, що враховують термодинамічні ефекти, дозволяють передбачити, як вихідна потужність змінюватиметься за різних температурних режимів. Різні рівні сонячної радіації впливають на струм короткого замикання і, отже, вихідну потужність. Моделі, які враховують зміну рівня освітлення протягом дня та у різні сезони, дозволяють точно прогнозувати продуктивність СЕ. Порівняння модельних та експериментальних даних про вихідну потужність, дозволяє виявити оптимальні умови експлуатації фотомодулів.

Дослідження впливу на вихідну потужність використання різних матеріалів, допомагає визначити, які матеріали напівпровідників найбільш ефективні і значно збільшують вихідну потужність СЕ. Аналіз різних конструктивних рішень, таких як використання багат шарових СЕ або різних типів покриття антивідблиску, може допомогти в підвищенні вихідної потужності. Зменшення вихідної потужності протягом тривалого терміну експлуатації може бути ознакою деградації матеріалів, з яких виготовлені СЕ.

Залежність вихідної потужності від різних факторів має кілька практичних застосувань. Оптимізація вихідної потужності, дозволяє проектувати фотоелектричні модулі з високою ефективністю за рахунок використання систем стеження за сонцем, що змінюють кут нахилу панелей для максимального отримання сонячного світла.

Дані по вихідній потужності сонячних станцій допомагає у плануванні енергосистем, заснованих на відновлюваних джерелах енергії. Це важливо для забезпечення надійності енергопостачання та управління навантаженнями.

Оцінка вихідної потужності дозволяє інвесторам та компаніям приймати обґрунтовані рішення, щодо інвестицій у сонячні технології, обираючи ті, які продемонстрували високу ефективність та надійність.

Моделювання та експериментальний аналіз дозволяють оптимізувати вихідну потужність забезпечуючи краще розуміння факторів, що впливають на продуктивність СЕ, що сприяє розробці ефективних сонячних технологій і систем, сталого енергетичного майбутнього.

Важливою характеристикою СЕ є ККД, що показує, яку частку сонячної енергії перетворює СЕ в електричну енергію. ККД розраховується, згідно виразу (5) як відношення вихідної потужності ( $P_{вих}$ ) до потужності сонячного випромінювання, що падає на СЕ  $P_p$ .

$$\eta_{KPD} = \frac{P_{вих}}{P_p} = \frac{I_m \cdot U_m}{P_p}, \quad (5)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії СЕ,  $P_{вих}$  – вихідна потужність,  $I_m$  і  $U_m$  – величина струму й напруга, що відповідають точці найбільшої потужності  $P_{max}$ ,  $P_p$  – потужність випромінювання, що падає на СЕ.

Модель СЕ дозволяє обчислити ККД, ґрунтуючись на вихідній потужності та рівні освітлення. Оптимізація моделей на основі експериментальних даних дозволяє передбачити, як різні зміни в конструкції та матеріалах можуть вплинути на ККД. Якщо ККД нижче за розрахунковий, це може вказувати на необхідність оптимізації конструкції, поліпшення якості матеріалів або застосування нових технологій [9].

Таким чином, модель СЕ служить важливим інструментом для аналізу та оптимізації його ключових характеристик, а саме: струму короткого замикання, напруги холостого ходу, внутрішнього опору, фотоструму, вихідної потужності та ККД. Модель СЕ дозволяє не тільки передбачати поведінку елемента в різних умовах, але й виявляти потенційні проблеми, що є критично важливим для підвищення ефективності та надійності СЕ.

Високий ККД означає, що СЕ здатний ефективно використовувати доступне сонячне випромінювання, що робить його привабливішим з економічної точки зору. Моделі СЕ дозволяють обчислити ККД на основі вихідної потужності та рівня сонячного освітлення. Важливо відзначити,

що ККД залежить від ряду факторів: виду матеріалів, значення температури,

Різні напівпровідникові матеріали мають різні коефіцієнти поглинання та рекомбінації, що впливає на ККД. Моделі, що враховують властивості матеріалів, допомагають передбачити, як зміни у конструкції чи використанні нових технологій можуть вплинути на ККД.

Моделі, що враховують термодинамічні ефекти, можуть передбачити, як ККД зміниться зі зміною температури. У разі підвищення температури ефективність рекомбінації носіїв заряду може знижуватися, що призводить до падіння ККД. Порівняння модельних та фактичних значень ККД дозволяє виявити напрямки його підвищення. Якщо фактичний ККД нижче за розрахунковий, це може вказувати на необхідність оптимізації конструкції СЕ.

Покращення якості напівпровідників та інших матеріалів, що використовуються, може підвищити ККД. Моделі, які включають дані про якість матеріалів, дозволяють передбачити, як їх поліпшення може позначитися на ефективності СЕ.

Впровадження нових технологій, таких як перовскітні СЕ або багаточарові конструкції, може значно підвищити ККД. Моделі, що враховують такі технології, дозволяють прогнозувати їхній вплив на ефективність. Значення ККД є важливим для низки практичних завдань. ККД допомагає вибрати ефективні технології для використання в сонячних системах, що важливо для мінімізації витрат на виробництво та встановлення. Значення ККД різних СЕ допомагає планувати енергетичні стратегії, забезпечуючи надійне та ефективне використання сонячної енергії. Високий ККД робить сонячні технології привабливими для інвестицій, що може сприяти зниженню цін на сонячну енергетику.

Важливим показником ефективності СЕ є ККД. Моделювання ККД у поєднанні з експериментальними даними дозволяє виявляти можливості для оптимізації та покращення технологій, що є критично важливим для подальшого розвитку сонячної енергетики та підвищення її конкурентоспроможності на ринку. В таблиці 1 та Рис.1 та Рис.2 показані результати моделювання залежності напруги холостого ходу та фотоструму від внутрішнього опору СЕ.

**Таблиця 1**

Результати моделювання залежності напруги холостого ходу та фотоструму від внутрішнього опору СЕ

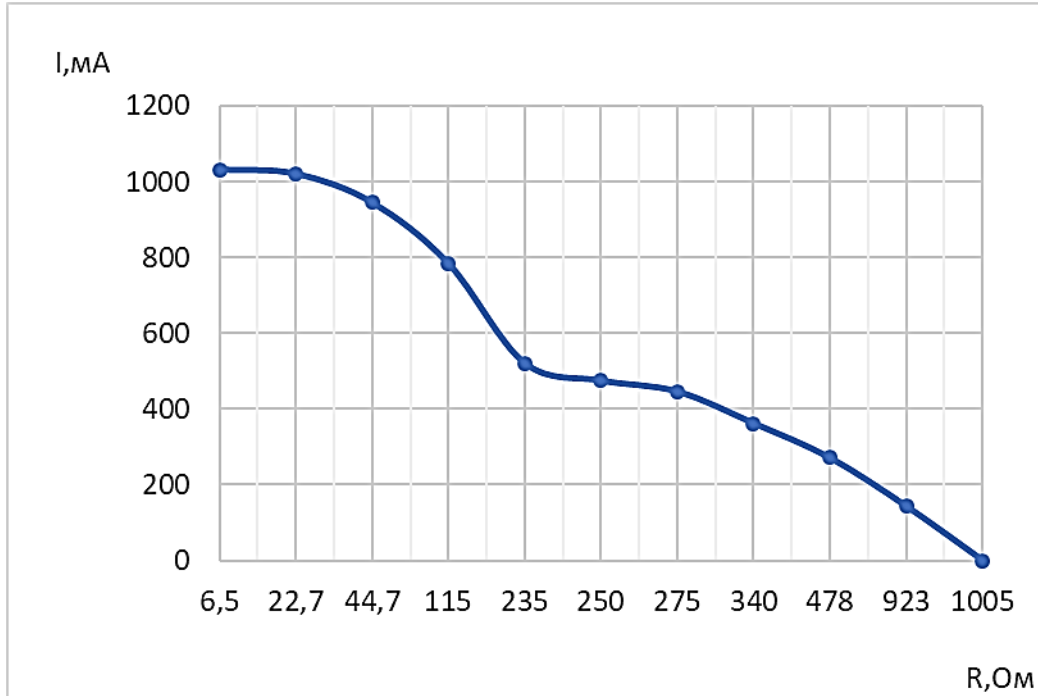
**Table 1**

Results of modeling the dependence of the open-circuit voltage and photocurrent on the internal resistance of the Solar Cell

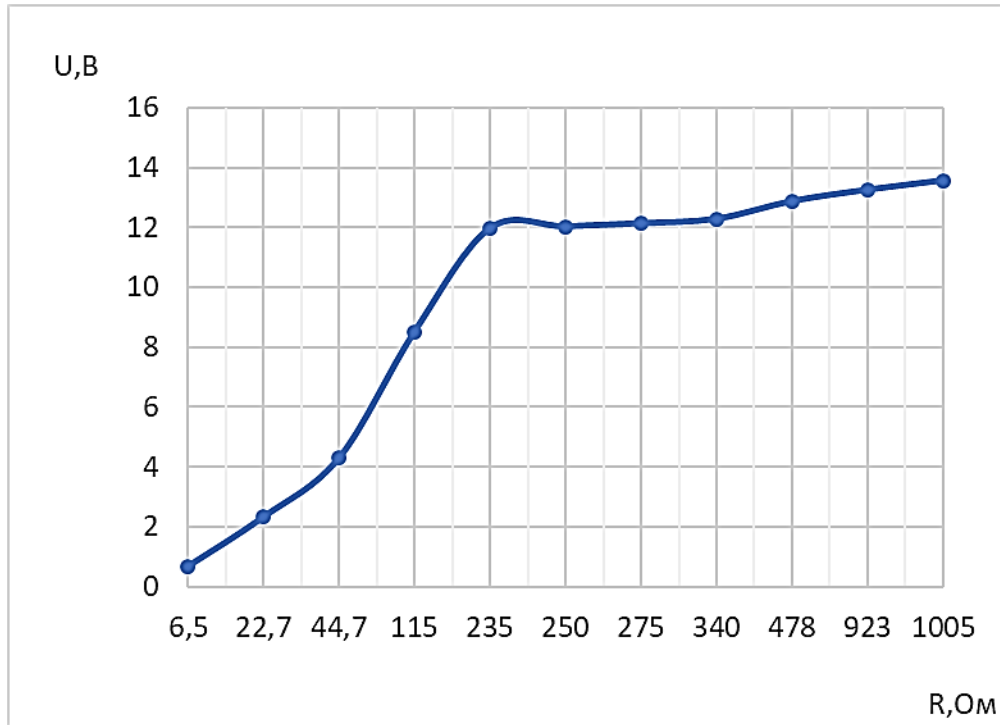
№	R, Ом	U, В	I, mA
1	6,5	0,68	1032
2	21,7	2,33	1021
3	44,7	4,3	945
4	115	8,52	784
5	235	11,97	521
6	250	12,03	475
7	275	12,13	446
8	340	12,28	362
9	478	12,87	271
10	924	13,25	143
11	1005	13,56	0

З графіку на Рис. 2 видно, що фотострум, зменшується при зростанні внутрішній опору СЕ до значення 1005 Ом. З графіку на Рис. 3 видно, що напруга

зростає від 0 до 12 В, при досягненні 235 Ом напруга стабілізується та досягає значення 13,5 В.



**Рис. 2** – Графік залежності фотоструму від внутрішнього опору СЕ  
**Fig. 2** – Graph of the dependence of photocurrent on the internal resistance of the CE



**Рис. 3** – Графік залежності напруги холостого ходу від внутрішнього опору СЕ  
**Fig. 3** – Graph of the dependence of the open-circuit voltage on the internal resistance of the CE

Використання моделей кількісних та якісних показників параметрів СЕ сприяє отриманню наукових результатів, які підвищують ефективність, якості та надійності сонячних технологій, що підтримує розвиток сталих енергетичних рішень і сприяє переходу до екологічно чистих джерел енергії.

Моделювання СЕ допомагає оптимізувати конструкцію фотомодулів, що збільшує їх ККД. Це дозволить ефективно використовувати сонячну енергію та знизити витрати на її виробництво.

Дослідження в області фотогальваніки сприяють створенню нових вискоелективних матеріалів, таких як перовскіти або органічні сполуки. Моделі допоможуть передбачити їх поведінку та характеристики.

Моделі СЕ можуть бути адаптовані для прогнозування продуктивності СЕ у різних кліматичних умовах, що дозволить розробити універсальні рішення для сонячних систем. Моделі СЕ дозволять краще зрозуміти, як СЕ можуть ефективно працювати в комбінації з іншими

відновлюваними джерелами енергії, такими як вітрова або гідроенергетика, створюючи гнучкі енергосистеми. За допомогою моделей СЕ можна передбачати термін служби СЕ та виявляти потенційні проблеми, що забезпечить ефективне обслуговування та управління у інформаційно-вимірвальних системах.

Моделі дозволять створити інформаційно-вимірвальні системи, які автоматично адаптуватимуть роботу сонячних установок залежно від поточних умов, підвищуючи загальну ефективність. Оптимізація виробничих процесів із використанням моделей допоможе скоротити витрати на матеріали, що зробить сонячні технології доступними. Моделювання дозволяє виявити та усунути слабкі місця у конструкції та матеріалах СЕ, що веде до створення надійних та довговічних СЕ. Використання моделей СЕ в освітніх закладах сприяє розвитку наукових досліджень у галузі відновлюваних джерел енергії та формуванню нових фахівців у цій галузі.

## Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що моделі сонячних елементів є ключовим інструментом для наукового обґрунтування, проєктування та оптимізації фотоелектричних систем. Їх застосування забезпечує формування цілісного уявлення про електрофізичні процеси, що відбуваються в сонячних елементах, та дозволяє інтегрувати різноманітні параметри в єдину аналітичну систему.

Встановлено, що використання системного підходу до моделювання сприяє ідентифікації критичних факторів, які обмежують ефективність функціонування сонячних елементів, а також дозволяє обґрунтувати напрями їх технічного вдосконалення. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними забезпечує верифікацію моделей, виявлення причин відхилень та створює передумови для підвищення точності розрахунків вихідної потужності та коефіцієнта корисної дії.

Доведено, що врахування зовнішніх експлуатаційних факторів, зокрема температури, рівня освітленості та інших кліматичних параметрів, є необхідною умовою адекватного відтворення реальних режимів роботи сонячних елементів. Це дозволяє підвищити достовірність прогнозування їх енергетичної продуктивності та забезпечити адаптацію моделей до змінних умов функціонування.

Обґрунтовано доцільність використання моделей для прогнозування деграда-

ційних процесів, що є важливим для оцінювання надійності, планування режимів експлуатації та визначення терміну служби фотоелектричних модулів. Застосування відповідних моделей дає змогу кількісно оцінювати як поточні, так і довгострокові зміни параметрів вольт-амперних характеристик.

Показано, що сучасні підходи до моделювання сонячних елементів потребують подальшого розвитку в напрямі деталізації матеріалознавчих аспектів, зокрема врахування електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів, їх мікроструктурних характеристик та температурно-залежних ефектів. Інтеграція зазначених факторів у моделі дозволить суттєво підвищити точність прогнозування ефективності функціонування фотоелектричних систем у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, удосконалення моделей сонячних елементів є важливим науково-практичним напрямом, що сприятиме підвищенню ефективності використання сонячної енергії, забезпеченню енергетичної стійкості та розвитку відновлюваної енергетики в умовах зростаючих екологічних та економічних викликів. Застосування адекватних моделей дозволяє підвищити обґрунтованість інженерних рішень, забезпечити точність прогнозування генерації електроенергії та досягти економічної та екологічної ефективності функціонування фотоелектричних систем.

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

## Список використаних джерел:

1. Моделювання основних характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів n-ZnS/p-CdTe і n-CdS/p-CdTe / А. С. Опанасюк, Д. І. Курбатов, Т. О. Берестюк, О. А. Доброжан, Р. В. Лопатка. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення у сучасних технологіях*. 2013. № 18. С. 149–155.
2. Гаєвський О. Ю., Іванчук В. Ю. Моделювання вольт-амперної характеристики фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3(78). С. 54-61. DOI : [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).54-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).54-61)
3. Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory / Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko P., Nosyk A. *Eastern-European*

*Journal of Enterprise Technologies*. 2021 Vol. 3, no. 8(111). Pp. 75–89. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>

4. Буджак Я. С., Єрохов В. Ю., Мельник І. І. Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2011. № 4/8(52). С. 24-29.

5. Моделювання залежності зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів / М. О. Слабінога, Ю. М. Кучірка, О. С. Криницький, Н. М. Юрків. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 2(41). С. 18–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2\(41\)-18-24](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2(41)-18-24)

6. Мороз В. І.; Турич О. В. Комп'ютерне моделювання сонячних батарей. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Електроенергетичні та електромеханічні системи, 2012. № 736. С. 104-108.

7. Кривда В., Василенко О., Федорова М. Моделювання електричних характеристик сонячної панелі. *Електротехніка та комп'ютерні системи*, 2017. № 26(102). С. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.26.102.2017.3>

8. Мартинюк В. І., Клен К. С., Жуйков В. Я. Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2021. № 26(2). С. 237316–1. doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.237316> .

9. Підвищення ефективності промислових зразків кремнієвих сонячних елементів / Р. В. Зайцев, М. В. Кіріченко, К. О. Мінакова, А. М. Дроздов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*, 2021. № 2(3). С. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.01>

10. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor / Budanov P., Khomiak E., Kyrysov I., Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4, № 8(118). Pp. 60-70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>

11. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента / І. Г. Кирисов, П. Ф. Буданов, Е. А. Хом'як, К. Ю. Бровко. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 1. С. 35-38. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38>

12. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів. *Машинобудування* : зб. наук. пр. Харків, 2022. Вип. 29. С. 104-117. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-104-117>

13. Budanov P., Kyrysov I. Qualimetric method of quality assessment of solar battery parameters. *Машинобудування* : зб. наук. пр. Харків, 2024. Вип. 33. С. 64-77. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-64-77>

**Отримано: 14.04.2026 / Переглянуто: 15.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026**

**KYRYSOV I.**, Doctor of Philosophy,

Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: [igorkirisov@karazin.ua](mailto:igorkirisov@karazin.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-8880>

**MELNYKOV V.**, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: [melnykov.viacheslav@gmail.com](mailto:melnykov.viacheslav@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6427-6805>

**BUDANOV M.**, Doctor of Philosophy,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: [budanov@karazin.ua](mailto:budanov@karazin.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8032-0562>

**PONOMARENKO O.**,

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: [olena.ponomarenko@karazin.ua](mailto:olena.ponomarenko@karazin.ua) ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-1777>

<sup>1</sup>*V.N. Karazin Kharkiv National University  
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

## RESEARCH OF QUANTITATIVE AND QUALITATIVE PARAMETERS OF THE SOLAR CELL MODEL

The article provides a comprehensive analysis of modern models of solar cells that describe their electrophysical characteristics and internal processes of converting solar energy into electricity. The approaches to mathematical modeling of photovoltaic converters are summarized, taking into account their structural and material features and physical mechanisms of generation and recombination of charge carriers.

The dependence of the main photovoltaic parameters of solar cells on the influence of external and internal factors, in particular temperature, intensity and spectral composition of solar radiation, is studied. It is established that an increase in temperature leads to the degradation of key operational characteristics, in particular the efficiency, open circuit voltage, fill factor and current-voltage characteristics. It is substantiated that these changes are due to variations in the bandgap width, an increase in the level of recombination processes and a decrease in the mobility of charge carriers in semiconductor materials.

An improved method for calculating the main electrophysical parameters of solar cells, in particular the short-circuit current and open-circuit voltage, has been developed, which is based on taking into account the multilayer structure of materials, their physicochemical properties and operating conditions. The proposed approach allows to increase the accuracy of determining the output power, efficiency and stability of the current-voltage characteristics in real operating conditions.

Particular attention is paid to the analysis of the influence of changes in illumination, including variations in the intensity and spectral composition of solar radiation, which significantly affect the generation of photocurrent and the formation of output electrical parameters. It is shown that dynamic changes in lighting conditions during the day or in conditions of unstable radiation cause nonlinear changes in the characteristics of solar cells, which must be taken into account when modeling and operating them.

The need for further improvement of existing models of solar cells by integrating temperature, spectral and structural factors is justified, which will ensure increased reliability of calculations and efficiency of functioning of photovoltaic systems in real operating conditions.

**Keywords:** solar cell, solar cell model, photovoltaic conversion, mathematical modeling, electrophysical parameters, efficiency, current-voltage characteristic, information and measuring systems, qualimetry, photovoltaic module.

**In cites:** Kyrysov I., Melnykov V., Budanov M., Ponomarenko O. (2026) Research of quantitative and qualitative parameters of the solar cell model. *Engineering*, (37), 49-63. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-04> ( in Ukraine)

### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

### References:

1. Opanasiuk, AS, Kurbatov, DI, Berestiuk, TO, Dobrozhan, OA & Lopatka, RV 2013, 'Modeliuvannia osnovnykh kharakterystyk soniachnykh elementiv na osnovi heteroperekhodiv n-

ZnS/p-CdTe i n-CdS/p-CdTe' [Modeling of the basic characteristics of sonic elements based on n-ZnS/p-CdTe and n-CdS/p-CdTe heterojunctions ], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: *Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh*, no 18, Pp. 149–155.

2. Haievskiyi, OYu & Ivanchuk, VYu 2024, 'Modeliuvannia volt-ampernoï kharakterystyky fotoelektrychnoho modulia zi zminnymy faktorom idealnosti ta zvorotnym strumom nasychennia' [Modeling of the volt-ampere characteristics of a photovoltaic module with a variable ideality factor and reverse saturation current ], *Vidnovliuvana enerhetyka*, no 3(78), Pp. 54-61.

3. Budanov, P, Kyrysov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory' *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, no. 8(111). Pp. 75–89. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).54-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).54-61) (in Ukraine)

4. Budzhak, YaS, Yerokhov, VIu & Melnyk, II 2011, 'Prohnozuvannia i rozrakhunok fotoelektrychnoho peretvoriuvacha iz zadanyimi kharakterystykamy' [Prediction and calculation of a photoelectric converter with given characteristics ], *Skhidnoievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, no 4/8(52), Pp. 24-29.

5. Slabinoha, MO, Kuchirka, YuM, Krynytskyi, OS & Yurkiv, NM 2018, 'Modeliuvannia zalezhnosti zminy potuzhnosti soniachnykh panelei vid kuta padinnia promeniiv' [Modeling the dependence of the power change of solar panels on the angle of incidence changes ], *Metody ta prylady kontroliiu yakosti*, no 2(41), Pp. 18–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2\(41\)-18-24](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2(41)-18-24) (in Ukraine)

6. Moroz, VI & Turych, OV 2012, 'Kompiuterne modeliuvannia soniachnykh batarei' [Computer modeling of sonic batteries ], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*, no 736, Pp. 104-108.

7. Kryvda, V, Vasylenko, O & Fedorova, M 2017, 'Modeliuvannia elektrychnykh kharakterystyk soniachnoi panelei' [Modeling of electrical characteristics of a solar panel ], *Elektrotekhnika ta kompiuterni systemy*, no 26(102), Pp. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.26.102.2017.3> (in Ukraine)

8. Martyniuk, VI, Klen, KS & Zhuikov, VYa 2021, 'Vyznachennia parametriv skhem zamishchennia soniachnykh panelei za eksperymentalnymy danymy' [Determination of parameters of the scheme of placement of sonic panels based on experimental data ], *Mikrosystemy, elektronika ta akustyka*, no 26(2), Pp. 237316-1. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.237316> (in Ukraine)

9. Zaitsev, RV, Kirichenko, MV, Minakova, KO & Drozdov, AM 2021, 'Pidvyshchennia efektyvnosti promyslovykh zrazkiv kremniievykh soniachnykh elementiv' [Increasing the efficiency of industrial samples of silicon solar cells ], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: *Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist*, no 2(3), Pp. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.01> (in Ukraine)

10. Budanov, P, Khomiak, E, Kyrysov, I, Brovko, K, Kalnoy, S & Karpenko, O 2022, 'Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, no 8(118). Pp. 60-70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374> (in Ukraine)

11. Kyrysov, IH, Budanov, PF, Khomiak, EA & Brovko, KYu 2022, 'Pidkhody ta vymohy do modeliuvannia struktury napivprovodnykovoho sharu soniachnoho elementa' [Approaches and requirements for modeling the structure of the semiconductor layer of a sonic element ], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no 1, Pp. 35-38. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38> (in Ukraine)

12. Kyrysov, IH & Budanov, PF 2022, 'Metody doslidzhen pohlynaiuchoi poverkhni soniachnykh elementiv' [Methods of studying the absorption of surface sonic elements ], *Engineering*, iss 29, Pp. 104-117. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-104-117> (in Ukraine)

13. Budanov, P & Kyrysov, I 2024, 'Qualimetric method of quality assessment of solar battery parameters' , *Engineering*, iss 33, Pp. 64-77. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-64-77> (in Ukraine)

**Submission received: 04.14.2026/Revised: 05.15.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026**