

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.383.51

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.190-197](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.190-197)

О. П. Голик, доц., канд. техн. наук, Р. В. Жесан, доц., канд. техн. наук,  
О. В. Корсіков, О. А. Неруш

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна  
e-mail: degoelena@gmail.com

## Методика дослідження вольт-амперних характеристик сонячних елементів в штучних умовах

В статті запропоновано для проведення аналізу методів підвищення ефективної роботи фотоелектричних модулів попередньо досліджувати роботу сонячних елементів, з яких складається фотоелектричний модуль, в штучних умовах з метою визначення показників зміни потенційного бар'єра і, як наслідок, усунення s-подібного вигину вольт-амперної характеристики сонячного елемента. **сонячний елемент, вольт-амперна характеристика, спектральний діапазон, температура, струм**

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах енергетичної кризи в Україні нагальним завданням є вирішення проблеми більшої генерації електроенергії. Традиційно генерація електроенергії відбувається за рахунок теплових та атомних електростанцій. Але постійні обстріли енергетичного сектору України пошкодили значну кількість електростанцій, що призвело до дефіциту електроенергії для споживачів. В таких умовах доцільним є застосування альтернативних джерел енергії. Найдоступнішим серед цих джерел є сонячна енергія. Як правило, для перетворення сонячної енергії в електричну застосовують фотоелектричні модулі з сонячних елементів (СЕ), матеріалом для яких слугують напівпровідники. Ефективність перетворення сонячної енергії в напівпровідникових матеріалах суттєво залежить від зміни зовнішньої температури оточуючого середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1] наведено переваги, недоліки, різновиди та типи фотоелектричних модулів та СЕ. В статті [2] зазначено, що при низьких зовнішніх температурах виникає ефект вигину вольт-амперної характеристики (ВАХ) СЕ, що призводить до зменшення напруги і, як наслідок, зниження потужності.

В роботі [3] виконано аналіз методів та засобів для контролю ВАХ сонячних батарей. Розглянуто існуючі стендові засоби за допомогою яких можна здійснювати контроль ВАХ сонячних батарей та проведено аналіз їх переваг та недоліків. Авторами в статті встановлено, що універсального засобу вимірювання ВАХ СЕ не існує. Тому для розв'язання цього завдання авторами запропоновано удосконалення імпульсних засобів, яке полягає в тому, що необхідно розширити діапазон струму та зменшити виділення тепла в циклі вимірювання, що дозволить зменшити методичну похибку вимірювання.

Пропозиції щодо перспектив та подальших досліджень сонячних установок наведено в роботі [4]. Авторами проведено аналіз основних напрямків поліпшення роботи сонячних електростанцій та приведені результати експериментальних досліджень сонячних панелей. На основі експериментальних даних було побудовано ВАХ фотоелектричних панелей. В результаті проведення експериментів авторами було підтверджено, що на роботу фотоелектричних панелей суттєво впливають рівень

освітленості та температури оточуючого середовища. Також автори зазначають, що в природному середовищі неможливо забезпечити однакові умови освітлення, температури та затінення для всіх СЕ одночасно. Тому для аналізу роботи сонячних панелей при однакових зовнішніх умовах доцільно мати експериментальну установку, яка повинна забезпечувати постійний рівень освітлення та температури. В такому випадку можна буде моделювати ВАХ та здійснювати підбір сонячних панелей з однаковими параметрами.

Для проектування та проведення випробувань фотоелектричних батарей великих розмірів авторами в [5] запропоновано підхід для побудови ВАХ фотоелектричних батарей, згідно якого за допомогою ВАХ окремого СЕ можна отримати моделі при різних умовах освітленості, затінення та температури з відповідними параметрами фотоелектричних батарей будь-якого розміру. Розроблено математичну модель та визначено її перехідні коефіцієнти. Автори стверджують, що використання запропонованого методу дозволить точно визначити схемні витрати для будь-яких матеріалів фотоперетворювачів (Si, GaAs тощо).

В роботі [6] було розроблено метод для визначення невідомих параметрів однорідної моделі для фотоелектричних модулів на основі значень бази даних. Запропонований алгоритм дає можливість визначити коефіцієнти струму, напруги та опору оптимальних до ідеальних умов роботи фотоелектричного модуля.

З метою вимірювання шунтового опору СЕ в [7] авторами запропоновано та обґрунтовано безконтактний метод за допомогою якого можна здійснювати неруйнівний контроль сонячних панелей в режимі їх експлуатації. Автори зазначають що це дозволить здійснювати діагностику раптових відключень, аварій та деградації сонячних модулів у складі сонячних електростанцій.

У статті [8] наведено результати аналізу залежності фотоелектричних характеристик СЕ залежно від різних параметрів. Авторами зазначено, що при підвищенні температури відбувається зниження таких характеристик СЕ, як коефіцієнт корисної дії, струм короткого замикання, коефіцієнт заповнення та інших параметрів, які характеризують ВАХ. Крім того автори виділяють окремим показником освітленість, яка істотно впливає на перетворення сонячної енергії. Було проведено моделювання для різних умов інтенсивності та освітленості, і в результаті доведено яким чином змінюється струм та напруга при змінному освітленні впродовж дня або інтенсивності сонячного випромінювання. автори зазначають, що існуючі способи за допомогою яких можна виконувати моделювання роботи СЕ потребують удосконалення, шляхом урахування структури матеріалу, умов затінення, освітленості, температури. Це дасть можливість підвищити точність розрахунків при проектуванні та дослідженні роботи сонячних панелей в реальних умовах.

В роботі [9] наведено результати моделювання та оптимізації сонячних електростанцій за різних метеорологічних умов, шляхом комп'ютерного експерименту на основі щорічних даних 50 метеостанцій. В результаті було визначено, що при підвищеній хмарності доцільним є оптимізувати кут нахилу сонячної панелі. Для скорочення часу розрахунку автор рекомендує використовувати вибірку за 10 або 20 хвилин. Автором розроблено схему моделювання, де вхідними параметрами є час, інтенсивність сонячного випромінювання, температура навколишнього середовища та швидкість вітру. Методом інтегрування отриманих значень було зроблено прогнозування генерації електроенергії протягом року.

В джерелах [10, 11, 12] зазначено, що згідно з проведеними експериментальними дослідженнями автори вказують на наявність суттєвого впливу температури на показники ВАХ СЕ. При цьому при істотному зростанні температури вихідна потужність СЕ може знизитись від 22% до 30%. Відповідно при зниженні температури

якість роботи напівпровідникових матеріалів може покращитись. Сонячні елементи втрачають свою ефективність у випадках коли працюють в умовах за межами оптимального діапазону температур. Для кристалічних кремнієвих СЕ з кожним градусом Цельсія вище оптимальної температури ефективність може знизитись приблизно на 0,4%-0,5%, і як наслідок, при температурі на 25°C вище оптимальної робочої температури ефективність СЕ може зменшитись на 10-12,5%.

**Постановка завдання.** Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на ефективність роботи СЕ суттєво впливає зовнішня температура. Розроблених методів усунення цієї проблеми не існує, тому автори пропонують при проектуванні систем сонячного електропостачання здійснювати моделювання роботи фотоелектричних модулів в штучних умовах, використовуючи відповідні стимулятори метеорологічних умов. Таким чином можна сказати, що температура відіграє вирішальну роль у визначенні ефективності СЕ, оскільки ця ефективність впливає на здатність СЕ перетворювати сонячну енергію в електроенергію.

Метою роботи є дослідження вольт-амперних характеристик сонячних елементів при зміні умов освітленості та температури оточуючого середовища. Для досягнення поставленої мети в статті запропоновано методику дослідження ВАХ СЕ в штучних умовах, що дозволить в подальшому виконати аналіз методів підвищення енергоефективності роботи фотоелектричних модулів та системи сонячного електропостачання в цілому.

Пропонується розробити схему пристрою для вимірювання ВАХ СЕ в штучних умовах. При цьому в дослідженнях основною характеристикою фотоелектричного модуля є ВАХ, яку необхідно вимірювати при освітленні поверхні зразка СЕ випромінюванням від імітатора сонячного випромінювання (ІСВ).

**Основний матеріал.** Для дослідження впливу температури на показники ВАХ СЕ, припустимо що вимірювальне обладнання працює в таких умовах:

- вологість повітря -  $(70 \pm 10) \%$ ;
- напруга мережі -  $(220 \pm 22) \text{ В}$ ;
- температура оточуючого середовища -  $(22 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- частота змінного струму -  $(50 \pm 1) \text{ Гц}$ .

Характер співвідношення спектральної характеристики СЕ зі спектром сонячного випромінювання визначає коефіцієнт корисної дії СЕ.

В штучних (лабораторних) умовах опромінення поверхні фотоелектричного модуля відповідно до необхідної концентрації сонячного випромінювання, можна реалізувати за допомогою зміни відстані між джерелом випромінювання та СЕ. Для коригування спектра випромінювання слід застосовувати спеціальні світлофільтри, які коригують спектральний склад випромінювання, наближаючи його до стандартного сонячного спектру (АМ0) або сонячного спектру на поверхні Землі після проходження атмосфери (АМ1,5). Вимірювання необхідно виконувати постійно для всієї ВАХ.

Охолодження СЕ до  $-170^\circ\text{C}$  та потім нагрів до  $+30^\circ\text{C}$  в установці буде забезпечуватися за рахунок додаткового використання системи терморегулювання з мінікріостатом. При цьому СЕ необхідно встановити на основу терморегулятора, який знаходиться в мінікріостаті. Випромінювання від ІСВ буде проходити крізь верхнє віконце кріостата. Варіювання освітленості зразка, що розташований на вертикально орієнтованій терморегульованій основі у кріостаті, здійснюється шляхом переміщення вимірювального столика у вертикальному положенні. Для коригування параметрів ІСВ в якості контрольного вимірювального елемента використано еталонний СЕ.

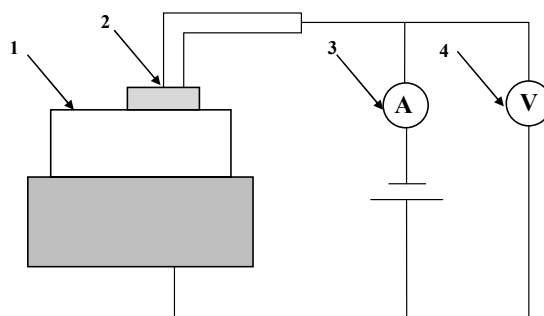
До складу установки входять:

- імітатор сонячного випромінювання;

- мінікріостат;
- вимірювальний прилад для напруги, струму та опору (калібратор-мультиметр);
- контролер температури з ПІД-регулятором;
- персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Також установка має у своєму складі механічний пристрій для плавного регулювання відстані "зразок-освітлювач". Імітатор сонячного випромінювання повинен за спектральним складом відтворювати спектр Сонця AM1,5G.

Схема для проведення вимірювань показана на рис. 1.



1 – сонячний елемент; 2 - омичний контакт; 3 - амперметр (ресстрація струму, що проходить через зразок); 4 - вольтметр

Рисунок 1 – Схема проведення вимірювань

*Джерело: розроблено авторами*

Дана установка призначена для вимірювання ВАХ дво- або чотиризондовим методом. В якості джерела-вимірювача використано прилад Keithley 2450 [13], який забезпечує генерацію струмів у межах від 500 фА до 1 А, а вимірювання від 10 фА до 1,05 А, а напруга розгортки становить  $\pm 21$  В.

В якості мінікріостату можна використати типовий кріостат, що використовується в побутових холодильниках. Як правило, до складу такого кріостату входять:

- трубка для подачі рідкого азоту;
- кварцове скло;
- контактна група для нагрівача та чотирьох зондів;
- теплопровідні пластини;
- керамічна пластина для нагрівання;
- кювета з вакуумними стінками.

Застосування калібратора-мультиметра Keithley 2450 обґрунтовано його технічними характеристиками, наявністю сенсорного екрану та можливістю широкого інтерфейсу підключення. Крім того присутня можливість експорту даних в електронні таблиці, що дозволить виконати обробку результатів вимірювань та побудувати ВАХ СЕ.

В якості ІСВ доцільно обирати вже готові пристрої відповідно до стандарту IEC 60904-9, які налаштовані на спектральний збіг та нерівномірність освітлення [14-16]. Також до їхнього складу може входити світлофільтр.

Для проведення вимірювань запропоновано зразок СЕ з гетероструктурою, який показаний на рис. 2. Процес вимірювання полягає у зміні енергії спорідненості до електрону близько до шару (p) $\alpha$ -Si. Для проведення вимірювань припустимо, що зміна ВАХ для структури, наведеної на рис. 2, при низьких температурах відбувається

внаслідок наявності бар'єра між зонами (n)c-Si:H та (p) $\alpha$ -Si, який є "корисним" бар'єром для неосновних носіїв заряду.

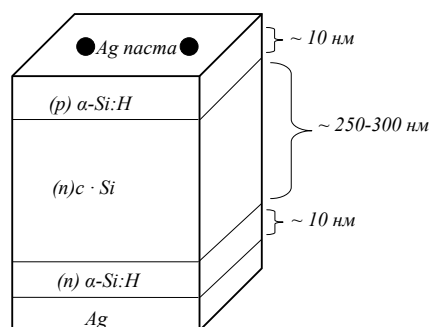


Рисунок 2 – Схема гетероструктури сонячного елемента на основі кремнію

Джерело: розроблено авторами

В свою чергу також із міною цієї енергії можна змінити висоту потенційного бар'єра, а потім після виконання розрахунків для різних температур простежити його вплив на ВАХ СЕ. Але при охолодженні він є бар'єром і для основних носіїв ("дирок"). Як правило, зонні діаграми гетероструктури мають вигляд, показаний на рис. 3.

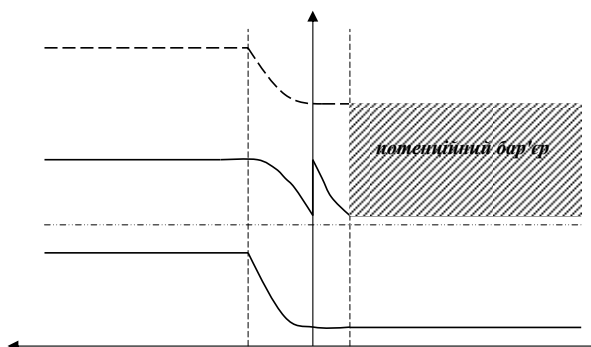


Рисунок 3 – Типові зонні діаграми сонячного елемента з гетероструктурою

Джерело: розроблено авторами

Алгоритм проведення вимірювань:

1. Експериментальний зразок необхідно закріпити (приклеїти) за допомогою срібної паста на робочу поверхню (стіл) з голками-зондами. Розміри зразків повинні бути обмежені конструктивними особливостями обраного криостата та не перевищувати розмір 20x20 мм.

2. Стіл має чотири виходи для кожного вимірювального зонду. Для зменшення впливу шкідливого опору на вимірювальних проводах застосовано 2 нижніх та 2 верхніх контакти.

3. Помістити зразок до камери криостата.

4. Електричні виходи контактів зондів слід підключити до вимірювача імітансу (може бути окремий прилад або, як в даному випадку, калібратор-мультиметр).

5. Забезпечити наявність вакууму в середині камери криостата (обов'язкова наявність насоса).

6. За допомогою термоконтролера стабілізувати значення температури на заданих проміжках. Для цього стіл повинен мати температурний сенсор на основі платини (pt100). Цей сенсор є одним з двох датчиків температури, а інший датчик встановлений в криостаті. Завдяки цьому відбувається термостабілізація в камері криостата. Також регулювання температури слід здійснювати джерелом живлення згідно показників платинового термоопору, який слід розташовувати максимально поблизу вимірювального зразка. Робочий температурний діапазон криостата повинен

знаходиться в межах 100-450 °K. З метою запобігання створення конденсату ззовні кріостат повинен мати подвійний шар теплоізоляції.

7. За допомогою відповідного програмного забезпечення, що входить до складу вимірювального обладнання, фіксувати значення ємності та провідності експериментального зразка в діапазоні частот від 25 Гц до 1 МГц.

8. Виконати обробку отриманих даних та побудувати графіки залежності ємності та провідності гетеропереходу експериментального зразка від температури при різних частотах.

9. З метою отримання максимумів частот на основі отриманих залежностей необхідно побудувати графік залежності похідної ємності від температури.

10. Відповідно до значень максимумів частот необхідно побудувати графік Арреніуса, згідно нахилу якого можна визначити значення енергії активації. Чисельне значення енергії активації повинно приблизно дорівнювати висоті потенційного бар'єра на межі між шарами (n)c-Si:H та (p) $\alpha$ -Si.

Було висунуто гіпотезу, що зменшення або збільшення потенційного бар'єра дасть можливість позбутися s-подібного вигину ВАХ СЕ.

Методика проведення експериментальних досліджень наступна. Вихідним параметром для розрахунку концентрації сонячного випромінювання є значення фотоструму еталонного СЕ при умовах, що освітленість за одну сонячну постійну при температурі зразка 25°C. Встановлення необхідного рівня енергетичної освітленості забезпечується шляхом зміни відстані між зразком та освітлювачем. Здійснюються вимірювання значень струму короткого замикання еталонного зразка з метою досягнення ним значення для кратності в одне сонце, яке зазначено в паспорті еталону.

Для цього при відкритій заслінці на ІСВ на під'єднаному вимірювальному приладі буде відбуватися реєстрація значень струму короткого замикання еталону. Після чого слід зафіксувати відстань "зразок-освітлювач". Таким чином буде створено прив'язку значень еталонного зразка до СЕ, яка забезпечить реєстрацію енергетичної освітленості та контроль її відтворюваності при довготривалих температурних дослідженнях. Процес дослідження впливу температури на ВАХ СЕ та його коефіцієнт корисної дії при заданому рівні енергетичної освітленості полягає у послідовній зміні температури від -170°C до +30°C.

Для підтвердження або спростування гіпотези необхідно виконати вимірювання декількох зразків з різними характеристиками. Під час проведення моделювання необхідно змінювати висоту потенційного бар'єра між шарами (p) $\alpha$ -Si та (n)c-Si таким чином, щоб усунути s-подібний вигин ВАХ СЕ. Отримані дані в подальшому дадуть можливість зробити висновок щодо підвищення ефективності СЕ на основі кремнієвої гетероструктури з р-шаром аморфного гідрогенізованого та n-шаром кристалічного кремнію з метою позбавлення від залежності потенційного бар'єра на межі шарів від носіїв заряду при охолодженні.

**Висновки.** Оскільки не існує універсального способу чи засобу усунення проблеми впливу температури оточуючого середовища на енергоефективність СЕ, актуальним є проведення досліджень вимірювання ВАХ СЕ в різних температурних умовах. Запропонована в статті методика дослідження ВАХ СЕ в штучних умовах дозволяє змоделювати умови роботи сонячних елементів під впливом зміни зовнішньої температури та освітленості. Запропонована установка може бути зібрана в різних варіантах залежно від розмірів зразків, які досліджуються, та наявної можливості матеріальних витрат.

Отримані в результаті вимірювань значення струму та напруги дають можливість обрати їх оптимальні параметри з урахуванням зміни температури оточуючого середовища, що в свою чергу дасть можливість при проектуванні систем електропостачання з сонячними установками коректно розрахувати їх потужність із забезпеченням максимального коефіцієнта корисної дії.

## Список літератури

1. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина 1 : навч. посіб. / О. П. Голик, Р. В. Жесан, І. В. Волков [та ін.]. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2020. 192 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/9295>.
2. Tsykh V., Kulchak A., Yavorskyi A. Analysis of research on the influence of temperature on the degradation and efficiency of solar panels. *Power Engineering: economics, technique, ecology*. 2024. No. 2. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303071>.
3. Божко К. М., Гуренко Г. С., Защепкіна Н. М. Research of the bench means for measuring current-voltage characteristics of solar cells and batteries. *ScienceRise*. 2016. Vol. 11. P. 30–32. doi.org/10.15587/2313-8416.2016.84426 .
4. Маєвський Д. А., Винаков О. Ф., Кетрарь О. А. Експериментальний аналіз роботи сонячних панелей із різними характеристиками. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2024. Т. 41, № 117. С. 12–22. URL: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/download/3285/1189/>.
5. Безручко К. В., Книш Л. І., Сінченко С. В. Забезпечення точності опису характеристик груп фотоперетворювачів і фотоелектричних батарей на основі цільових експериментів на комплексному обладнанні. *Vidnovluvana energetika*. 2020. № 3(62). С. 35–41. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3\(62\).35-41](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3(62).35-41).
6. A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data / R. Ndegwa et al. *Journal of Renewable Energy*. 2020. Vol. 2020. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/7580279> .
7. Божко К. М., Мушкет К. Я. Безконтактний метод вимірювання шунтового опору окремих сонячних елементів у складі панелі. *Технічна інженерія*. 2023. № 2(92). С. 174–181. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-174-181](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-174-181) .
8. Budanov P. Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell. *Машинобудування*. 2024. No. 34. P. 92–103. URL: [periodicals.karazin.ua/engineering/article/view/25095/22615](https://periodicals.karazin.ua/engineering/article/view/25095/22615).
9. Mayer M. J. Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 241. P. 114313. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114313>.
10. New Design of Solar Photovoltaic and Thermal Hybrid System for Performance Improvement of Solar Photovoltaic / R. Hossain et al. *International Journal of Photoenergy*. 2020. Vol. 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8825489>.
11. Azimi-Nam S., Farhani F. Effect of Temperature on Electrical Parameters of Phosphorous Spin-on Diffusion of Polysilicon Solar Cells. *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2017. Vol. 4, no. 1. P. 41–45. URL: [https://www.jree.ir/article\\_70105\\_08c49abfb6019aa4d7f0c12b508a998d.pdf](https://www.jree.ir/article_70105_08c49abfb6019aa4d7f0c12b508a998d.pdf).
12. How Temperature Impacts Solar Cell Efficiency - Solar N Plus. *Solar N Plus*. URL: <https://www.solarnplus.com/how-temperature-impacts-solar-cell-efficiency/>
13. Сенсорний калібратор-мультиметр 6,5 розрядів Keithley 2450. *Техенком – вимірювальні прилади та обладнання*. URL: <https://cutt.ly/SrwPyzff>.
14. Стенд лабораторний "Імітатор сонячного елемента" GES-100. *ООО "СПЕКТРО ЛАБ" - обладнання для лабораторій*. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1958350888-stend-laboratornyj-imitator.html> .
15. Симулятори сонячного світла - ТОВ «Селток Фотонікс». *ТОВ «Селток Фотонікс» - перший професійний каталог оптоелектроніки*. URL: [https://seltokphotonics.com/catalog/analytical-laboratory-equipment/solar-simulator/?srsltid=AfmBOorZmQG8\\_bwSqXK-Uk0mEXFjXGg2kWlnXWY1UbNLg4sbTNjevE\\_u](https://seltokphotonics.com/catalog/analytical-laboratory-equipment/solar-simulator/?srsltid=AfmBOorZmQG8_bwSqXK-Uk0mEXFjXGg2kWlnXWY1UbNLg4sbTNjevE_u).
16. Інновації в оптиці. Сонячний симулятор. *Wavelength opto-electronic*. URL: <https://wavelength-oe.com/uk/innovation-in-optics-solar-simulator/>.

## References

1. Holyk, O., Zhesan, R., Volkov, I., Chekanov, O., & Berezjuk, I. (2020). Energhozberezhennja ta vykorystannja ponovljувanykh dzherel energiji. Chastyna 1. Lysenko V.F.
2. Tsykh, V., Kulchak, A., & Yavorskyi, A. (2024). Analysis of research on the influence of temperature on the degradation and efficiency of solar panels. *Power Engineering: economics, technique, ecology*, (2). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303071> [in Ukraine].
3. Bozhko, K. M., Ghurenok, Gh. S., & Zashhepkina, N. M. (2016). Research of the bench means for measuring current-voltage characteristics of solar cells and batteries. *ScienceRise*, 11, 30–32. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.84426>.
4. Majevsjkyj, D. A., Vynakov, O. F., & Ketrarj, O. A. (2024). Eksperymental'nyj analiz roboty sonjachnykh panelej iz riznymy kharakterystykamy. *Elektrotekhnichni ta komp'juterni systemy*, 41(117), 12–22. <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/download/3285/1189/>.
5. Bezruchko, K. V., Knysh, L. I., & Sinchenko, S. V. (2020). Zabezpechennja tochnosti opysu kharakterystyk ghrup fotoperetvorjувachiv i fotoelektrychnykh batarej na osnovi ciljovykh eksperymentiv na kompleksnomu obladdnanni. *Vidnovluvana energetika*, (3(62)), 35–41. doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3(62). 35-41.

6. Ndegwa, R., Simiyu, J., Ayieta, E., & Odero, N. (2020). A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data. *Journal of Renewable Energy*, 2020, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2020/7580279>.
7. Bozhko, K. M., & Mushket, K. Ja. (2023). Bezkontaktnyj metod vymirjuvannja shuntovogho oporu okremykh sonjachnykh elementiv u skladi paneli. *Tekhnichna inzhenerija*, (2(92)), 174–181. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-174-181](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-174-181).
8. Budanov, P., Kupriyanov, O., Melnykov, V., & Kononov, V. (2024). Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell. *Машинобудування*, (34), 92–103. <https://periodicals.karazin.ua/engineering/article/view/25095/22615> [in Ukraine].
9. Mayer, M. J. (2021). Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants. *Energy Conversion and Management*, 241, 114313. [doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114313](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114313).
10. Hossain, R., Ahmed, A. J., Islam, S. M. K. N., Saha, N., Debnath, P., Kouzani, A. Z., & Mahmud, M. A. P. (2020). New Design of Solar Photovoltaic and Thermal Hybrid System for Performance Improvement of Solar Photovoltaic. *International Journal of Photoenergy*, 2020, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2020/8825489>.
11. Azimi-Nam, S., & Farhani, F. (2017). Effect of Temperature on Electrical Parameters of Phosphorous Spin-on Diffusion of Polysilicon Solar Cells. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 4(1), 41–45. [https://www.jree.ir/article\\_70105\\_08c49abfb6019aa4d7f0c12b508a998d.pdf](https://www.jree.ir/article_70105_08c49abfb6019aa4d7f0c12b508a998d.pdf).
12. *How Temperature Impacts Solar Cell Efficiency - Solar N Plus*. (2024, 2 червня). Solar N Plus. <https://www.solarnplus.com/how-temperature-impacts-solar-cell-efficiency/>
13. *Sensornyj kalibrator-mul'tymetr 6,5 rozrjadiv Keithley 2450. (b. d.). Tekhenkom – vymirjuvaljni prylady ta obladnannja (Ukraina, Kyjiv)*. <https://cutt.ly/SrwPyzzf>.
14. *Stend laboratornyj "Imitator sonjachnogho elementa" GES-100 OOO "SPEKTRO LAB" - obladnannja dlja laboratorij* <https://spectrolab.com.ua/ua/p1958350888-stend-laboratornyj-imitator.html>
15. *Symuljatory sonjachnogho svitla - TOV «Seltok Fotoniks». (b. d.). TOV «Seltok Fotoniks» - pershyj profesijnyj katalog optoelektroniky*. [https://seltokphotonics.com/catalog/analytical-laboratory-equipment/solar-simulator/?srsId=AfmBOorZmQG8\\_bwSqXK-Uk0mEXFjXGg2kWlnXWy1UbNLg4sbTNjevE\\_u](https://seltokphotonics.com/catalog/analytical-laboratory-equipment/solar-simulator/?srsId=AfmBOorZmQG8_bwSqXK-Uk0mEXFjXGg2kWlnXWy1UbNLg4sbTNjevE_u).
16. *Innovaciji v optycki. Sonjachnyj symuljator. (b. d.). Wavelength opto-electronic*. <https://wavelength-oe.com/uk/innovation-in-optics-solar-simulator/>.

**Olena Holyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Zhesan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Korsikov Oleksandr**, **Nerush Oleksandr**; *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Methodology for Studying the Current-Voltage Characteristics of Solar Cells in Artificial Conditions**

The efficiency and productivity of converting solar energy into electricity using photovoltaic converters is significantly affected by the ambient temperature. That is, the ability of a photovoltaic cell to convert sunlight into electricity is most significantly affected by the operating temperature of the cell. And as a result, this affects the energy efficiency of solar-based power supply systems. Temperature has the greatest effect on the short-circuit current and open-circuit voltage of a photovoltaic cell. With increasing temperature, the open-circuit voltage can decrease significantly, and the short-circuit current increases slightly. However, the overall change in these parameters leads to a decrease in the maximum output power of the photovoltaic cell. Currently, there are no universal methods for regulating the impact of ambient temperature on photovoltaic systems. Therefore, for the correct design and installation of photovoltaic systems, it is necessary to pre-model their operation, ensuring the maximum possible range of optimal temperatures. During modeling, it is advisable to study the current-voltage characteristics and spectral characteristics of the photovoltaic cell. The purpose of the article is to analyze the methods and means of constructing and studying the current-voltage characteristics of silicon photovoltaic cells under different conditions of changing illumination and ambient temperature.

To achieve this goal, the article proposes a structure for a measuring instrument installation for studying the current-voltage characteristics of photovoltaic cells in laboratory conditions. The installation should include: a solar radiation simulator, a cryostat, a calibrator-multimeter, a temperature controller, and a personal computer with appropriate software. Using a solar radiation simulator, the surface of the photovoltaic cell must be irradiated with different intensities and illumination. In this case, adjustments can be made using spectral filters. During simulation, measurements must be constantly performed for the entire current-voltage characteristic. The presence of a temperature control system (cryostat) in the circuit makes it possible to provide conditions for changing the ambient temperature. In addition, the installation includes a device for smoothly adjusting the distance between the sample and the solar radiation simulator. A calibrator-multimeter is used to generate and measure current, voltage, and resistance. The article presents a diagram of the heterostructure of a silicon photovoltaic cell.

Since the current-voltage characteristic of a photovoltaic cell has an s-shaped bend, which creates a potential barrier between the zones of the main charge carriers, during modeling it is necessary to achieve such optimal values of temperature and illumination at which the height of the potential barrier will change and, as a result, it will be possible to get rid of the s-shaped bend of the current-voltage characteristic of the photovoltaic cell. The results of such modeling can later be used in the design at the initial stage of installation of power supply systems based on solar energy.

**solar cell, volt-ampere characteristic, spectral range, temperature, current**

*Одержано (Received) 28.02.2025*

*Прорецензовано (Reviewed) 07.03.2025*

*Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025*