

ЕЛЕКТРИЧНІ МОДЕЛІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ІЗ ЗАСОБАМИ КОНЦЕНТРАЦІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Отримано 27 серп. 2025 р.; рекомендовано до публікації 22 вер. 2025 р.
Доступно онлайн 30 вер. 2025 р.

**Бондаренко Д. В.¹, Матях С. В.², Суржик Т. В.³,
Шейко І. О.⁴, Новицький С. В.⁵**

Автор для кореспонденції: Бондаренко Дмитро,
e-mail: dima7007bond@gmail.com

¹ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-5629-930X>

² канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-1707-3519>

³ д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-1418-7748>

⁴ мол. наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0002-5770-3677>

⁵ аспірант
<https://orcid.org/0009-0005-5647-6635>

^{1, 2, 3, 4, 5} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена розробці електричних моделей фотоелектричних систем живлення із застосуванням концентраторів сонячного випромінювання. У роботі були показані шляхи розвитку фотоелектричних систем у напрямку концентрації сонячного випромінювання для подальшої генерації електричної енергії. Відмічено роль моделювання фотоелектричних джерел енергії, а особливо джерел з оптичними концентраторами. Розглянуто основні конструктивні особливості концентраторів сонячного випромінювання та їхні схеми. Показано, що в таких схемах необхідно використовувати високоефективні фотоелектричні модулі, наприклад, на основі багатошарових структур. На основі електричних моделей для стандартних фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії в роботі були розроблені електричні моделі фотоелектричних джерел з концентраторами сонячного випромінювання, які опромінюють фотоелементи з горизонтальними багатошаровими й вертикальними багатошаровими напівпровідниковими структурами. Електрична модель фотоелектричного джерела з вертикальним багатошаровим фотоелементом набула подальшого спрощення. Відмічено, що електричні моделі дозволяють проводити моделювання фотоелектричних джерел різноманітної конструкції за допомогою стандартних програмних засобів електричного та електронного моделювання. Також було акцентовано, що концентроване сонячне випромінювання можливо використовувати в когенераційних джерелах енергії, тобто для генерації як електричної енергії, так і теплової енергії. Були зроблені висновки і проаналізовані переваги та недоліки фотоелектричних систем з концентраторами сонячного випромінювання.

Ключові слова: електрична модель, фотоелектричний модуль, сонячне випромінювання, концентратор, моделювання.

ELECTRICAL MODELS OF PHOTOVOLTAIC CELLS FOR USE WITH SOLAR CONCENTRATION DEVICES

Received Aug. 27, 2025; accepted Sept. 22, 2025
Available online Sept. 30, 2025

**Bondarenko D.¹, Matiakh S.², Surzhyk T.³,
Sheiko I.⁴, Novytskyi S.⁵**

Author for correspondence: Bondarenko Dmytro,
e-mail: dima7007bond@gmail.com

¹ PhD
<https://orcid.org/0000-0002-5629-930X>

² PhD
<https://orcid.org/0000-0002-1707-3519>

³ Dr. of Science
<https://orcid.org/0000-0002-1418-7748>

⁴ Junior Researcher
<https://orcid.org/0000-0002-5770-3677>

⁵ postgraduate stud.
<https://orcid.org/0009-0005-5647-6635>

^{1, 2, 3, 4, 5} Institute of renewable energy, NAS
of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. The article is devoted to the development of electrical models of photovoltaic power systems using solar radiation concentrators. The work shows the ways of developing photovoltaic systems in the direction of concentrating solar radiation for further generation of electrical energy. The role of modeling of photovoltaic energy sources, especially sources with optical concentrators, is noted. The work considers the main design

features of solar radiation concentrators and their schemes. It is shown that in such schemes it is necessary to use highly efficient photovoltaic modules, for example, based on multilayer structures. Based on the electrical models for standard photovoltaic solar energy converters, the work developed electrical models of photovoltaic sources with solar radiation concentrators that irradiate photovoltaic cells with horizontal multilayer and vertical multilayer semiconductor structures. The electrical model of a photovoltaic source with a vertical multilayer photovoltaic cell has been further simplified. It was noted that electrical models allow modeling of photovoltaic sources of various designs using standard electrical and electronic modeling software. It was also emphasized that concentrated solar radiation can be used in cogeneration energy sources, i.e. for generating both electrical energy and thermal energy. Conclusions were drawn and the advantages and disadvantages of photovoltaic systems with solar radiation concentrators were analyzed.

Keywords: *electrical model, photovoltaic module, solar radiation, concentrator, modeling.*

Використані позначення та скорочення

АБ – акумуляторна батарея

АРМ – активна розподільна мережа

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ММ – мікромережа

РГ – розподілена генерація

РК – розподільна компанія

ОСЗЕ – оператор спільного зберігання енергії

СЗЕ (УЗЕ) – система (установка) збереження енергії

P2P (peer-to-peer) – обмін на горизонтальному рівні

Вступ. Відновлювані джерела енергії, які використовують сонячне випромінювання, набувають дедалі більшого застосування і розповсюдження [1]. Але важливим недоліком таких джерел енергії є те, що вони перетворюють не весь обсяг випромінювання, яке надходить на земну поверхню. Для підвищення ефективності перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію завдяки збільшенню променеприймальної апертури за сталих геометричних розмірів фотоелектричного перетворювача в багатьох роботах пропонується застосування оптичних концентраторів сонячного випромінювання [2, 3].

Щоб здійснювати розрахунки та проводити розроблення енергетичних систем з концентраторами сонячного випромінювання, необхідно проводити попереднє моделювання. Зазначимо, що ефективним методом моделювання енергетичних системи є моделювання з використанням електричних моделей [4], для чого потрібно взяти до уваги еквівалентні схеми фотоелектричних перетворювачів [5, 6] і розробити їх електричні моделі. Електричні моделі дозволяють проводити симуляцію автономних джерел електричного живлення та джерел живлення, які включені в енергетичну систему, а також джерел разом з накопичувачами і навантаженням [7], використовуючи стандартні програмно-аналітичні засоби моделювання [8, 9].

Мета роботи. Розробити електричні моделі фотоелектричних систем живлення із застосуванням концентраторів сонячного випромінювання.

Фотоелектричний концентратор. Фотоелектричний концентратор (ФЕК) – це технологія сонячної енергетики, яка використовує оптичні елементи, як-от лінзи або дзеркала, для концентрації сонячного світла на невеликих високоефективних сонячних елементах. Основна ідея ФЕК полягає в тому, щоби сфокусувати велику кількість сонячного світла на значно меншій площі

фотоелемента [10]. Це дає змогу використовувати менші, але дорожчі (наприклад, GaAs) [11] та ефективніші сонячні елементи (наприклад, багатоперехідні елементи, які мають вищу ефективність перетворення світла на електричну енергію, ніж звичайні кремнієві сонячні елементи) [12].

Складовими системи є елементи оптичної системи, сонячні фотоелектричні перетворювачі, система відстеження. Так, елементами оптичної системи можуть бути звичайні лінзи [13] (рис. 1), лінзи Френеля (які часто використовуються для фокусування світла завдяки їхній тонкій легкій конструкції) [14], параболічні чи параболічно-сегментовані дзеркала (які відбивають сонячне світло, концентруючи його в одній точці або по лінії) (рис. 2) [15], хвилеводні голографічні концентратори (які забезпечують кутове відхилення світла за допомогою голограм і транспортування його шляхом повного внутрішнього відбиття). Сонячними фотоелементами виступають високопродуктивні сонячні елементи, які розташовуються на променеприймальній конструкції й перетворюють концентроване світло на електричну енергію. Крім того, важливою складовою є система відстеження, оскільки сонячне світло повинно бути точно сфокусоване на невеликих елементах, і тому системи ФЕК зазвичай потребують двовісних систем відстеження Сонця, які постійно змінюють орієнтацію концентратора, щоб він завжди був направлений на Сонце.

Електрична модель процесів розподілення фотонів. Електричними моделями фотелектричних перетворювачів сонячного випромінювання є електричні кола, які моделюють процеси перетворення енергії сонячної радіації на електричну та теплову енергію, використовуючи теорію електричних кіл. Такий підхід дозволяє зручно та швидко проводити моделювання енергетичних систем з різними компонентами в одному моделювальному процесі.

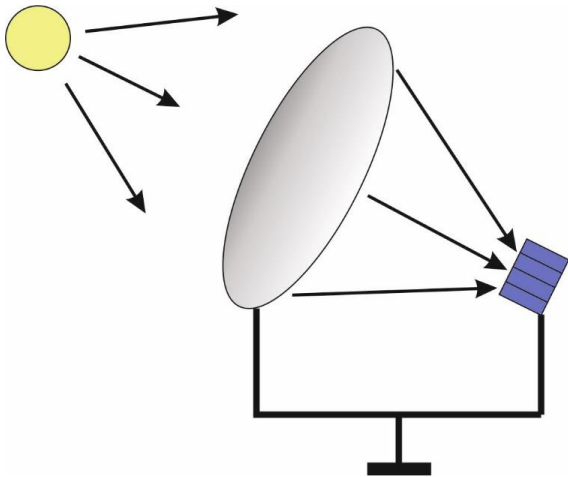


Рис. 1. Система концентрування з використанням лінз

Fig. 1. Concentrating system using lenses

Так, у роботі [16] була розроблена електрична модель процесів перетворення сонячного випромінювання на електричну та теплову енергію (рис. 3). На цій моделі показано, що згідно зі спектральним розподілом фотони, які надходять від Сонця, можуть брати участь у різних генерувальних процесах, тобто енергія сонячного випромінювання може перетворюватись як у різних частинах перетворювача сонячного випромінювання, так і

перетворюватись на різні типи енергії, наприклад на електричну і теплову енергію. Ліва частина схеми на рис. 3 моделює те, як фотони поглинаються та розподіляються за спектром, а права частина схеми на рис. 3 моделює процеси народження частинок чи квазічастинок.

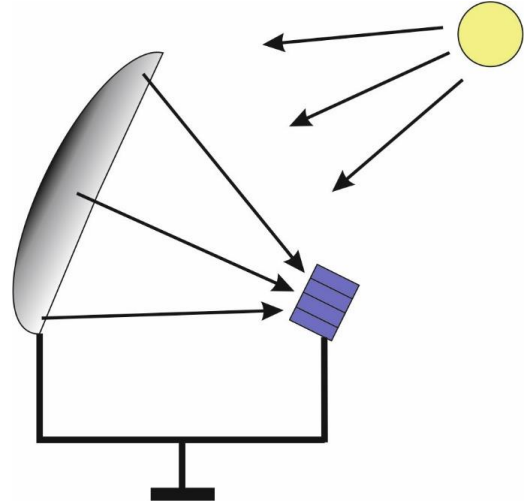


Рис. 2. Рефлекторна система концентрування

Fig. 2. Reflective concentration system

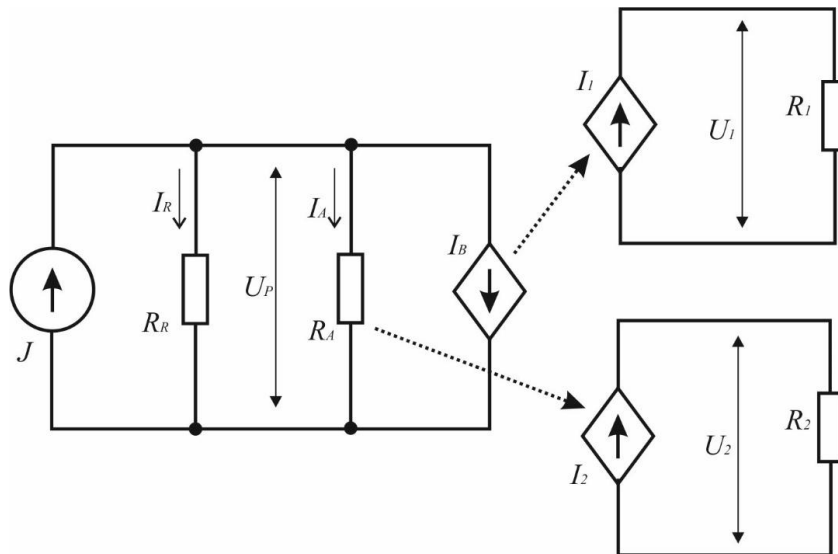


Рис. 3. Електрична модель розподілення фотонів на процеси утворення носіїв заряду і тепла

Fig. 3. Electrical model of photon distribution into charge carrier and heat generation processes

Зазначимо, що оскільки в межах цієї роботи ми детально не аналізуємо теплові процеси, то втрати фотонів на утворення тепла в схемі на рис. 3 представлено опором R_A .

Рівняння електричної моделі (див. рис. 3), які описують процеси розподілення фотонів з утворенням носіїв заряду та фотонів, мають такий вигляд:

$$J = \frac{U_P}{R_R} + \frac{U_P}{R_A} + I_B, \quad (1)$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}, \quad (3)$$

де J моделює густину потоку фотонів сонячного випромінювання; I_B моделює процес перетворення фотонів на носії заряду; R_A моделює процес перетворення фотонів на тепло; I_1 моделює процес утворення носіїв заряду; I_2 моделює процес генерації тепла; R_R моделює втрати фотонів при проходженні фотонів через лінзу чи відбиванні на дзеркалі; R_1 моделює втрати носіїв заряду; R_2 моделює процеси розсіювання тепла.

Типи фотоелементів. Для застосування фотоелектричних перетворювачів у джерелах з концентрацією сонячного випромінювання використовуються високоефективні сонячні елементи, переважно двох конструкцій. Це горизонтальні багат шарові елементи [17, 18] і вертикальні багат шарові елементи [19, 20]. У горизонтальних багат шарових елементах сонячні промені надходять на фронтальну частину й поглинаються пошарово, шар за шаром (рис. 4), а у вертикальних багат шарових елементах сонячні промені надходять на бокову, торцеву частину й поглинаються усіма шарами одночасно (рис. 5).

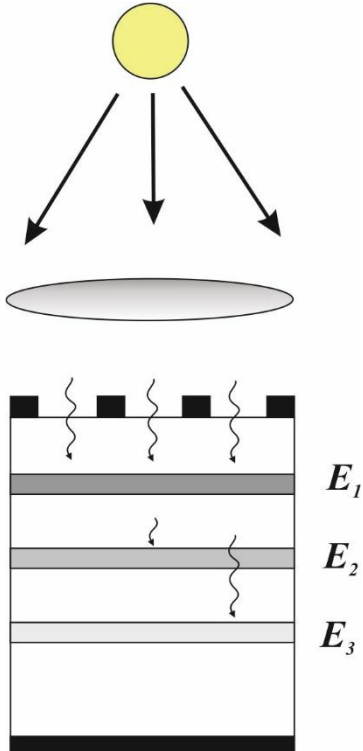


Рис. 4. Горизонтальний багат шаровий елемент

Fig. 4. Horizontal multijunction element

У фотоелементах з різною просторовою конструкцією використовуються різні матеріали, які мають відповідні властивості. Так, основною відмінністю є те, що в горизонтальному фотоелементі ширина заборонених зон напівпровідника поглинальних частин і, відповідно, спектральні перетворювальні характеристики різні ($E_1 > E_2 > E_3$), а у вертикальному фотоелементі ширина забороненої зони поглинальних шарів однакова ($E_1 = E_2 = E_3 = E_g$).

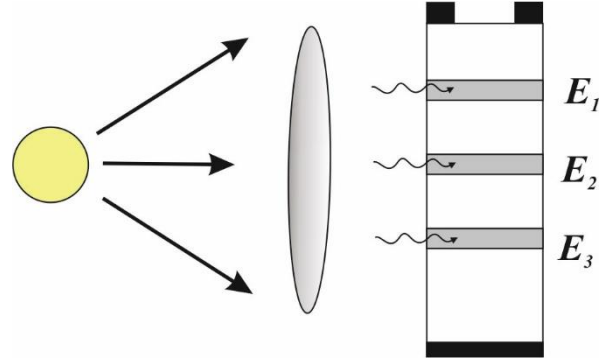


Рис. 5. Вертикальний багат шаровий елемент

Fig. 5. Vertical multijunction element

Електричні моделі фотоелементів. Електричною моделлю, що враховує всі фізичні аспекти перетворення енергії сонячного випромінювання на електричну енергію, є модель, запропонована в роботі [21] (рис. 6). Така модель містить джерело струму, яке моделює народження носіїв заряду при поглинанні фотонів у напівпровіднику, – тобто створюється струм фотоелемента, – а також містить джерело напруги, яке моделює енергетичні характеристики поглинутих фотонів і співвідноситься з шириною забороненої зони напівпровідника, тобто створює напругу фотоелемента. Опори, як і є зазвичай, моделюють втрати – втрати енергії при поглинанні і втрати частинок на розсіювання.

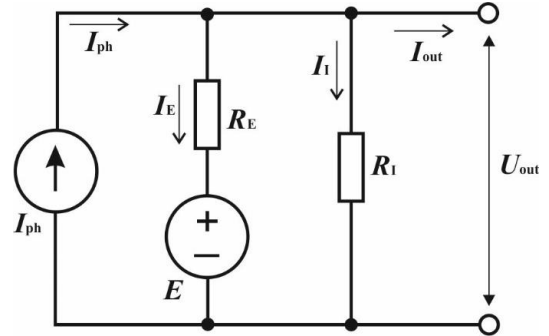


Рис. 6. Електрична модель перетворення фотонів на електричну енергію

Fig. 6. Electrical model of photon conversion into electrical energy

Рівняння електричної моделі (див. рис. 6), що описують процеси поглинання фотонів з утворенням носіїв заряду, мають такий вигляд:

$$I_{out} = I_{ph} + I_E + I_l, \quad (7)$$

$$U_{out} = E + U_{RE}, \quad (8)$$

$$U_{RE} = I_E R_E, \quad (9)$$

де I_{ph} – струм, що моделює перетворення фотонів на носії заряду; I_l – струм через внутрішній опір джерела струму; I_E – струм джерела напруги; I_{out} – вихідний струм фотоелектричного елемента; R_E – внутрішній опір джерела струму; E – напруга, що моделює перетворення фотонів на носії заряду; U_{RE} – напруга на внутрішньому

опорі джерела напруги; U_{out} – вихідна напруга фотоелектричного елемента.

Якщо брати до уваги схеми на рисунках 3 та 6 і нехтувати тепловими процесами при поглинанні фотонів, то електричні моделі суто фотоелектричних перетворювачів з горизонтальною багатошаровою структурою і фотоелектричних перетворювачів з вертикальною багатошаровою структурою будуть представлені схемами, які зображені на рис. 7 та рис. 8, відповідно. На цих рисунках видно, що електричні моделі таких структур є

з'єднанням джерел живлення (у кількості, відповідній кількості поглинальних шарів), а також дисипативних опорів, які відповідають за втрати енергії при поглинанні фотонів у кожному шарі та втраті носіїв заряду під час їх руху до електродів. Також електричні моделі можуть містити з'єднувальні опори, які моделюють енергетичні втрати на проміжних шарах напівпровідникової структури, що починають відігравати роль навантаження. Іншими паразитними елементами, як-от послідовний опір з'єднувальних провідників, паразитна ємність та інше, було знехтувано в цьому розгляді.

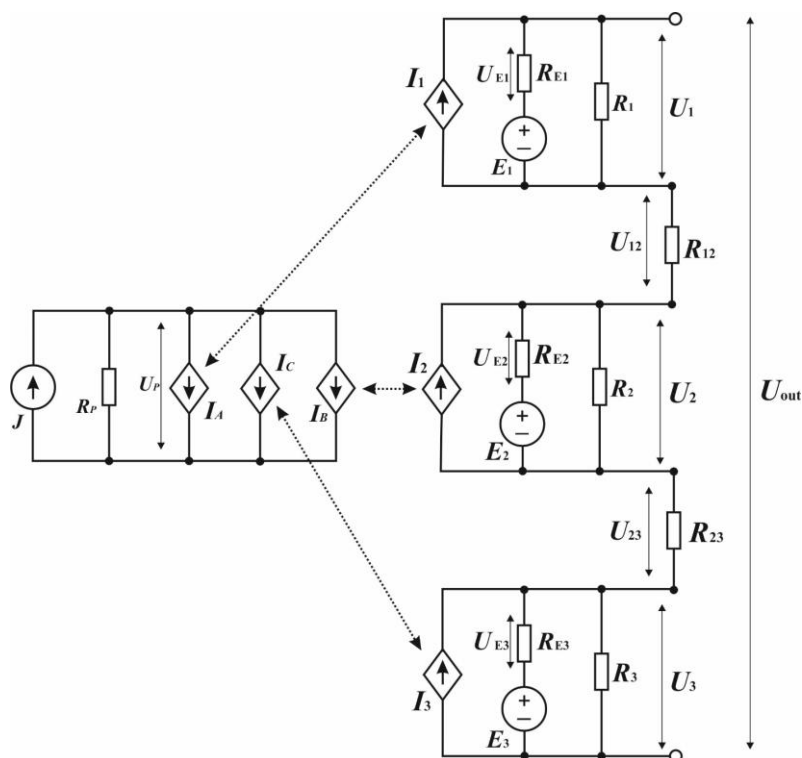


Рис. 7. Електрична модель перетворення фотонів на електричну енергію в горизонтальному багатошаровому елементі

Fig. 7. Electrical model of photon conversion into electrical energy in a horizontally multijunction element

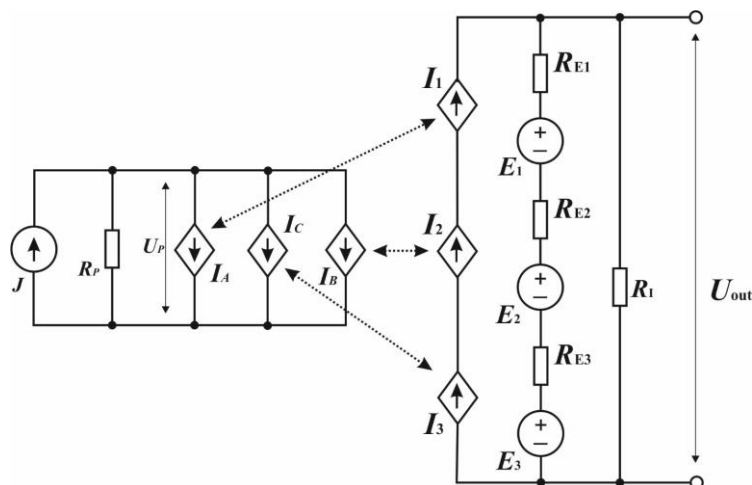


Рис. 8. Електрична модель перетворення фотонів на електричну енергію у вертикальному багатошаровому елементі

Fig. 8. Electrical model of photon conversion into electrical energy in a vertically multijunction element

Оскільки у фотоелектричних елементах з вертикальною структурою поглинальних шарів енергетичні властивості частин, де відбувається перетворення фотонів

На схемі з рис. 9 джерела струму будуть такі: $I_N = I_A + I_B + I_C$ та $I_M = I_1 = I_2 = I_3$, джерело напруги – $E_M = E_1 + E_2 + E_3$, а опір джерела напруги – $R_M = R_1 + R_2 + R_3$. Для фотоелектричної схеми багатошарового горизонтального елемента з рис. 7 таке спрощення недоцільне, оскільки елементи, які складають схему, є різними за значенням та можуть нести різну моделювальну сутність.

Висновок. У роботі було побудовано електричні моделі, за допомогою яких здійснюється моделювання фотоелектричних концентрувальних перетворювачів сонячного випромінювання на електричну енергію. Відзначено, що завдяки використанню високоефективних сонячних елементів і концентрації світла системи ФВК можуть досягати значно вищої ефективності перетворення сонячної енергії на електричну порівняно зі звичайними фотоелектричними системами. Багатошарові багатопоглинальні елементи здатні поглинути більший спектр сонячного випромінювання та здійснити підвищення енергетичних характеристик фотоелемента. Також, оскільки площа високоефективних сонячних елементів, що використовуються, значно менша, це може зменшити загальну вартість системи, компенсуючи витрати на оптичні елементи та системи відстеження.

Крім того, слід відзначити, що в деяких випадках концентроване сонячне світло може використовуватися для нагріву теплоносія, що дозволяє отримувати не тільки електроенергію, а й тепло. Запропоновані в роботі електричні моделі дозволяють також проводити моделювання процесів перетворення енергії сонячного випромінювання на теплову енергію.

Перевагою використання концентраторів є те, що для виробництва тієї ж кількості енергії може знадобитися менша площа землі, ніж для традиційних фотоелектричних систем.

Але при розробці енергетичних систем з концентраторами сонячного випромінювання та проведенні моделювання треба звернути увагу на недоліки фотоелектричних концентраторів. Одним з недоліків є те, що системи ФЕК працюють ефективно лише при прямому сонячному світлі. Хмарність і розсіяне світло значно знижують їхню продуктивність, а необхідність точних систем відстеження Сонця додає складності установці та збільшує вартість обслуговування.

До того ж концентрація сонячного світла викликає значне нагрівання сонячних елементів, що може знизити їхню ефективність і термін служби. Тому потрібні ефективні системи охолодження.

Також недоліком є те, що, хоча довгострокові експлуатаційні витрати можуть бути нижчими, початкові інвестиції в системи ФЕК зазвичай вищі, ніж у звичайні фотоелектричні системи.

на носії заряду, переважно є ідентичними, то схема з рис. 8 може бути перетворена на спрощену схему (рис. 9).

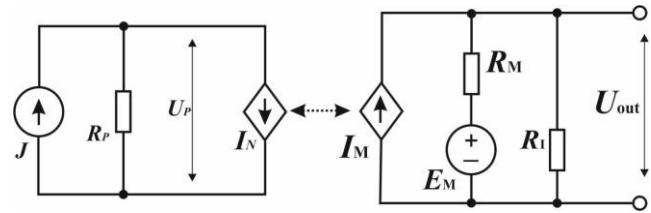


Рис. 9. Спрощена електрична модель перетворення фотонів на електричну енергію у вертикальному багатошаровому елементі

Fig. 9. Simplified electrical model of photon conversion into electrical energy in a vertically multijunction element

Але в будь-якому разі фотоелектричні концентратори дедалі більше застосовуються, зокрема, у великих сонячних електростанціях, де доступне пряме сонячне світло. Вони є перспективною технологією для регіонів з високою сонячною інсоляцією. Попри значний розвиток сонячної енергетики в Україні в цілому, інформація про широке використання саме фотоелектричних концентраторів є обмеженою. Проте, зважаючи на високий потенціал сонячної енергії в країні, а також на світові тенденції розвитку технологій, ФЕК можуть відігравати чималу роль у майбутньому енергетичному ландшафті України.

ПОСИЛАННЯ

- Бондаренко Д. В., Матях С. В., Суржик Т. В., Шейко І. О., Кравченко М. В. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ ЗА МАТЕРІАЛАМИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТ. Відновлювана енергетика. 2024. № 3(78). С.76–83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
- Сонячний концентратор. https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячний_концентратор [Дата звернення: 17.12.2024]
- K. Lovegrove and W. Stein, Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments, and Applications (Woodhead Publishing Series in Energy), 2nd edn., Woodhead Publishing, 2020, 832 p.
- Chua L., Lin Pen-Min. Computer-aided analysis of electronic circuits. NJ: Prentice-Hall, Inc, 1975. 737 p.
- Al-Ezzi AS, Ansari MNM. Photovoltaic Solar Cells: A Review. Applied System Innovation. 2022. № 5(4):67. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
- Chenni R., Makhoul M., Kerbach T., Bouzid A. A detailed modeling method for photovoltaic cells. Energy. 2007. V. 32, Issue 9. P. 1724–1730. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.12.006>

7. Бондаренко Д. ЕКВІВАЛЕНТНІ СХЕМИ АКУМУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЯКІ ПІДКЛЮЧЕНІ ДО СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕМЕНТІВ. Відновлювана енергетика. 2019. № 3(58). С. 30–34. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).30-34](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).30-34)
8. CircuitLab. Retrieved from <https://www.circuitlab.com>. 2025.
9. Simulink. Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. 2025
10. Iqbal W., Ullah I., Shin S. Optical Developments in Concentrator Photovoltaic Systems. A Review. Sustainability. 2023. # 15(13): 10554. <https://doi.org/10.3390/su151310554>
11. Fahrenbruch A., Bube R. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion. NY: Academic Press Inc., 1983. 580 p.
12. Andrew Blakers, Ngwe Zin, Keith R. McIntosh, Kean Fong. High Efficiency Silicon Solar Cells. Energy Procedia. 2013, V. 33. Pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.033>.
13. Barrios J., Cortez J., Herman G., Larroder A., Jeco B., Watanabe K., Okada Y. The use of convex lens as primary concentrator for multi-junction solar cells. Emergent Scientist. 2018. V. 2/ № 5. <https://doi.org/10.1051/emsci/2018004>
14. Bachhav, Chetan & Sonawwanay, Puskaraj. Study on design and performance enhancement of Fresnel lens solar concentrator. Materials Today: Proceedings. 2011/ № 56(10). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.168>.
15. Кіріченко М. В., В. О. Никитін, Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунов, А. В. Меріуц, і Д. С. Шкода. «Дослідження конструкції концентратора сонячного випромінювання для автономних фотоенергетичних установок». Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2022. Вип. 1(4). С. 35–43. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.01.02>.
16. Бондаренко Д. В. ЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ ГІБРИДНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОЛЕКТОРА. Відновлювана енергетика. 2025. № 1(80). С. 44–50. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).44-50](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).44-50)
17. Dimroth, F., Grave, M., Beutel, P., Fiedeler, U., Karcher, C., Tibbits, T.N.D., Oliva, E., Siefert, G., Schachtner, M., Wekkeli, A., Bett, A.W., Krause, R., Piccin, M., Blanc, N., Drazek, C., Guiot, E., Ghyselen, B., Salvetat, T., Tauzin, A., Signamarcheix, T., Dobrich, A., Hannappel, T. and Schwarzburg, K. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. Prog. Photovolt: Res. Appl. 2014. № 22. Pp.277–282. <https://doi.org/10.1002/pip.2475>
18. Kensuke Nishioka, Tatsuya Takamoto, Takaaki Agui, Minoru Kaneiwa, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki. Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2006. V. 90. Issue 9. Pp. 1308–1321. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.08.003>.
19. Yupeng Xing, Peide Han, Shuai Wang, Yujie Fan, Peng Liang, Zhou Ye, Xinyi Li, Shaoxu Hu, Shishu Lou, Chunhua Zhao, Yanhong Mi. Performance analysis of vertical multi-junction solar cell with front surface diffusion for high concentration. Solar Energy. 2013. V. 94. Pp. 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.030>.
20. Pozner, R., Segev, G., Sarfaty, R., Kribus, A. and Rosenwaks, Y. Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics. Prog. Photovolt: Res. Appl. 2012. № 20: 197–208. <https://doi.org/10.1002/pip.1118>
21. Бондаренко Д. В. СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНУ І ТЕПЛОВУ ЕНЕРГІЇ. Відновлювана енергетика. 2024. № 4(79). С. 59–63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).59-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).59-63)
22. W. Li, M.C. Paul, N. Sellami, T. Sweet, A. Montecucco, J. Siviter, H. Baig, M. Gao, T. Mallick, A. Knox, Six-parameter electrical model for photovoltaic cell/module with compound parabolic concentrator. Solar Energy. 2016. V. 137. Pp. 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.050>.

REFERENCES

1. Bondarenko D., Matiakh S., Surzhyk T., Sheiko I., Kravchenko M. DEVELOPMENT TRENDS OF SOLAR POWER ENGINEERING BASED ON THE MATERIALS OF THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE «RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE 21. Vidnovluvana Energetika. 2024. № 3(78). Pp. 76–83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
2. Concentrated solar power. https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power [Applying date: 20.07.2025]
3. K. Lovegrove and W. Stein, Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments, and Applications (Woodhead Publishing Series in Energy), 2nd edn., Woodhead Publishing, 2020. 832 p.
4. Chua L., Lin Pen-Min. Computer-aided analysis of electronic circuits. NJ: Prentice-Hall, Inc, 1975. 737 p.
5. Al-Ezzi AS, Ansari MNM. Photovoltaic Solar Cells: A Review. Applied System Innovation. 2022. № 5(4): 67. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
6. Chenni R., Makhlof M., Kerbach T., Bouzid A. A detailed modeling method for photovoltaic cells. Energy. 2007. V. 32. Issue 9. Pp. 1724–1730. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.12.006>.

7. Bondarenko, D. EQUIVALENT CIRCUITS OF ELECTRIC POWER ACCUMULATORS CONNECTED TO SOLAR PHOTOCELLS. *Vidnovluvana Energetika*. 2019. № 3(58). Pp. 30–34. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).30-34](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).30-34)
8. CircuitLab. Retrieved from <https://www.circuitlab.com>. 2025.
9. Simulink. Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. 2025
10. Iqbal W., Ullah I., Shin S. Optical Developments in Concentrator Photovoltaic Systems. A Review. *Sustainability*. 2023. # 15(13): 10554. <https://doi.org/10.3390/su151310554>
11. Fahrenbruch A., Bube R. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion. NY: Academic Press Inc., 1983. 580 p.
12. Andrew Blakers, Ngwe Zin, Keith R. McIntosh, Kean Fong. High Efficiency Silicon Solar Cells. *Energy Procedia*. 2013. V. 33. Pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.033>.
13. Barrios J., Cortez J., Herman G., Larroder A., Jeco B., Watanabe K., Okada Y. The use of convex lens as primary concentrator for multi-junction solar cells. *Emergent Scientist*. 2018. V. 2. № 5. <https://doi.org/10.1051/emsci/2018004>
14. Bachhav, Chetan & Sonawwanay, Puskaraj. Study on design and performance enhancement of Fresnel lens solar concentrator. *Materials Today: Proceedings*. 2011. № 56(10). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.168>.
15. Kirichenko, M., V. Nikitin, R. Zaitsev, G. Khrypunov, A. Meriuts, and D. Shkoda. "Research of the Design of a Solar Radiation Concentrator for Autonomous Photoenergy Installation". *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2022. № 1 (4). Pp. 35–43. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.01.02>.
16. Bondarenko, D. Electrical model of the hybrid photovoltaic thermal collector. *Vidnovluvana Energetika*. 2025. № 1(80). Pp. 44–50. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).44-50](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).44-50)
17. Dimroth, F., Grave, M., Beutel, P., Fiedeler, U., Karcher, C., Tibbits, T.N.D., Oliva, E., Siefer, G., Schachtner, M., Wekkeli, A., Bett, A.W., Krause, R., Piccin, M., Blanc, N., Drazek, C., Guiot, E., Ghyselen, B., Salvetat, T., Tauzin, A., Signamarcheix, T., Dobrich, A., Hannappel, T. and Schwarzburg, K. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2014. № 22. Pp. 277–282. <https://doi.org/10.1002/pip.2475>
18. Kensuke Nishioka, Tatsuya Takamoto, Takaaki Agui, Minoru Kaneiwa, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki. Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. V. 90. Issue 9. Pp. 1308–1321. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.08.003>.
19. Yupeng Xing, Peide Han, Shuai Wang, Yujie Fan, Peng Liang, Zhou Ye, Xinyi Li, Shaoxu Hu, Shishu Lou, Chunhua Zhao, Yanhong Mi. Performance analysis of vertical multi-junction solar cell with front surface diffusion for high concentration. *Solar Energy*. 2013. V. 94. Pp. 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.030>.
20. Pozner, R., Segev, G., Sarfaty, R., Kribus, A. and Rosenwaks, Y. (2012), Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 20: 197–208. <https://doi.org/10.1002/pip.1118>
21. Bondarenko, D. Developing electrical models to simulate the conversion of solar radiation into electrical and thermal energy. *Vidnovluvana Energetika*. 2024. № 4(79). Pp. 59–63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\)59-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)59-63)
22. W. Li, M.C. Paul, N. Sellami, T. Sweet, A. Montecucco, J. Siviter, H. Baig, M. Gao, T. Mallick, A. Knox, Six-parameter electrical model for photovoltaic cell/module with compound parabolic concentrator. *Solar Energy*. 2016. V. 137. Pp. 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.050>.