УДК 621.31 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.2

О. В. АНДРОНОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

В. В. КУРАК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

МОДЕЛЮВАННЯ НЕПОКРИТОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОЛЕКТОРА В MATLAB/SIMULINK

Сполучення фотоелектричного модуля та сонячного теплового колектора в фотоелектричний тепловий (PVT) колектор дозволяє реалізувати принцип когенерації і, тим самим, підвищити ефективність перетворення сонячного випромінювання в теплову та електричну енергії. Питання оптимізації конструкцій і режимів експлуатації таких колекторів вимагає проведення моделювання.

В роботі запропонована імітаційна модель непокритого фотоелектричного теплового колектора, реалізована в програмному середовищі Matlab/Simulink. Розроблена еквівалентна теплова схема колектора, що описує процеси передачі теплоти від фотоелектричного модуля до рідкого теплоносія та процеси теплообміну між конструктивними елементами колектора та оточуючим середовищем. На основі теплової та електричної схем з використанням блоків Simscape створено імітаційну модель непокритого PVT колектора, яка дозволяє визначати генеровані теплову та електричну потужності, ефективності перетворення енергії, температури конструктивних елементів при стаціонарних та змінних умовах оточуючого середовища для різних режимів роботи фотоелектричного модуля.

В якості зразка обрано колектор SUNSYSTEM PVT 240, конструктивні параметри якого покладено в основу розрахунків значень блоків Simscape. Проведено моделювання випробувань колектора в стаціонарних зовнішніх умовах експлуатації. За отриманою характеристичною кривою теплопродуктивності визначено коефіцієнт тепловтрат та максимальну теплову ефективність. Порівняння цих параметрів, отриманих моделюванням, зі значеннями зі специфікації колектора показало розбіжність менше 5%. Відхилення значень електричної потужності, отриманих моделюванням при різних температурних умовах роботи, від розрахункових не перевищує 3%, що свідчить про коректність запропонованої моделі. Проведене моделювання для змінних умов експлуатації показало високу ефективність роботи непокритих PVT колекторів для кліматичних умов України.

Дана модель може бути використана для оптимізації конструкції непокритих фотоелектричних теплових колекторів, визначення режимів їх роботи для різних кліматичних умов, бути основою для обґрунтування економічної доцільності впровадження систем генерації на основі фотоелектричних теплових колекторів.

Ключові слова: *непокритий фотоелектричний тепловий колектор, PVT, модель, Matlab/Simulink, ефективність, потужність, фотоелектричний модуль.*

O. V. ANDRONOVA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9597-8068

V. V. KURAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-4303-5671

© О. В. Андронова, В. В. Курак, 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

SIMULATION OF UNCOVERED PHOTOVOLTAIC THERMAL COLLECTOR IN MATLAB/SIMULINK

The combination of a photovoltaic module and a solar thermal collector into a photovoltaic thermal (PVT) collector allows implementing the principle of cogeneration and, thereby, increasing the efficiency of solar radiation conversion into thermal and electrical energy. The task for optimizing the designs and operating modes of such collectors requires modeling.

The paper proposes a simulation model of an uncovered photovoltaic thermal collector implemented in the Matlab/Simulink software. An equivalent thermal scheme of the collector representing the processes of heat transfer from the photovoltaic module to the liquid coolant and the processes of heat exchange between the structural elements of the collector and the environment has been developed. Based on the thermal and electrical schemes a simulation model of an uncovered PVT collector which allows determining the generated thermal and electrical power, energy conversion efficiency and temperature of structural elements under stationary and variable environmental conditions for different operating modes of the photovoltaic module was created using Simscape blocks.

The SUNSYSTEM PVT 240 collector was chosen as a sample, and the structural parameters of this collector were used as the basis for calculating the values of the Simscape blocks. A simulation of collector tests in stationary external operating conditions was carried out. The heat loss coefficient and maximum thermal efficiency were determined based on the obtained heat performance curve. A comparison of these parameters obtained by simulation with the values from the collector specification showed a discrepancy of less than 5%. The deviation of the electrical power values obtained by simulation under different temperature operating conditions from the calculated ones does not exceed 3% which indicates the correctness of the proposed model. The simulation for variable operating conditions showed high efficiency of uncovered PVT collectors for the Ukrainian climate.

Developed model can be used to optimize the construction of uncovered photovoltaic thermal collectors, determine their operating modes for different climatic conditions, and also be the basis for substantiating the economic feasibility of implementing generation systems based on photovoltaic thermal collectors.

Key words: *uncovered photovoltaic thermal collector, PVT, model, Matlab/Simulink, efficiency, power, photovoltaic module.*

Постановка проблеми

Фотоелектричні теплові (PVT) колектори поєднують у собі конструкції фотоелектричного модуля та сонячного теплового колектора, що дозволяє одночасно отримувати теплову та електричну енергії від одного пристрою при економії місця розташування перетворювачів. Утилізація теплоти розігріву фотоелектричного модуля за допомогою теплового колектора дозволяє підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну, а також підвищує загальний к.к.д. за рахунок когенерації.

За виконанням PVT колектори поділяються на покриті, непокриті, вакуумовані та концентруючі. В залежності від типу теплоносія, що використовується в теплових колекторах для охолодження фотоелектричних модулів, розрізняють конструкції PVT колекторів з рідинним або повітряним охолодженням [1-3]. Вироблення теплової та електричної енергії визначається конструктивними і режимними параметрами, кліматичними умовами місця розташування, тому оптимізація продуктивності і ефективності PVT колекторів являє собою складну задачу, для розв'язання якої використовують методи моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [4] розроблено динамічну чисельну тривімірну модель фотоелектричного теплового колектора з листово-трубним абсорбером. Розглянуто вплив нерівномірного розподілу температури по поверхні фотоелектричного перетворювача на генеровану електричну потужність, а також вплив кількості склінь та низькоемісійного покриття на теплову та електричну потужності колектора. Показано, що запропонована модель є корисним інструментом для проектування та оптимізації конструкції колектора та режимів роботи систем на його основі.

Динамічну модель непокритого фотоелектричного теплового колектора, побудовану на основі рівнянь енергетичних балансів для кожного компонента, реалізовано в програмному середовищі Matlab/Simulink [5]. Модель дозволяє визначати температурні режими роботи, потужність та ефективність генерації теплової та електричної енергії протягом року для режиму роботи модуля у точці максимальної потужності. Досліджено вплив товщини теплоізоляції та витрати теплоносія на ефективність перетворення сонячної енергії. Показано перспективність використання даної моделі для аналізу енергетичних показників фотоелектричних теплових колекторів.

Для визначення економічної ефективності систем на основі PVT колекторів в середовищі Matlab/Simulink розроблено модель, що базується на рівняннях теплопродуктивності теплового колектора та вироблення електричної енергії фотоелектричним модулем, ефективність якого є функцією температури [6]. Досліджено вплив оптичного ккд та щільності розташування сонячних елементів у модулі на теплову та електричну ефективність фотоелектричного теплового колектора.

Запропоновано імітаційну модель покритого фотоелектричного теплового колектора в середовищі Matlab/Simulink, побудовану на основі електричних, теплових та гідравлічних блоків Simscape [7]. Модель використовує аналітичне розв'язання диференціальних рівнянь енергетичного балансу першого порядку для компонентів PVT колектора для визначення процесів теплопередачі в системі «оточуюче середовище – скляне

покриття – фотоелектричний модуль – пластина абсорбера – канал з теплоносієм – теплоізоляція – оточуюче середовище». Перевагами моделі є врахування зміни оптичних властивостей прозорого покриття в залежності від кута падіння сонячної радіації, однак, в моделі не реалізовано режим максимальної потужності для фотоелектричного модуля, що унеможливлює визначення паспортних параметрів колектора. Проведене порівняння експериментально отриманих значень для системи на основі PVT колектора із результатами моделювання показало розбіжність, що не перевищує 5%. В роботі [8] дану модель використано для визначення впливу надходження сонячної радіації та температури оточуючого середовища на теплову та електричну продуктивності та ефективності колектора. Досліджено температурні умови роботи та тепловтрати з тильної та фронтальної поверхонь колектора в оточуюче середовище. Авторами роботи [9] перевірено коректність даної моделі шляхом порівняння експериментально отриманих даних для подібних колекторів з результатами моделювання. Отримано залежності температури теплоносія від температури фотоелектричного модуля, а також зміни останньої в залежності від надходження сонячної радіації, які дозволяють оцінити вироблення енергії колектором для кліматичних умов Кенії.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є створення на основі блоків Simscape імітаційної моделі непокритого фотоелектричного теплового колектора, яка б дозволяла досліджувати енергетичні параметри колектора в режимі максимальної потужності фотоелектричного перетворювача при змінних умовах експлуатації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Більшість непокритих PVT колекторів виготовляються на основі стандартних фотоелектричних модулів шляхом додавання системи тепловідводу, виконаної у вигляді плоского сонячного колектора, тобто абсорбера з каналами для теплоносія, розміщених у шарі теплоізоляції (рис. 1). З'єднання теплової та електричної компонент відбувається або через шар теплопровідного клею або методом механічного притискання, останній варіант зменшує вартість, але й ефективність тепловідводу від фотоелектричного модуля є нижчою.

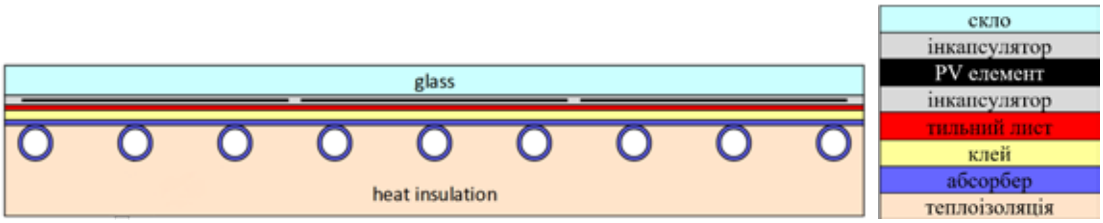


Рис. 1. Принципова схема типового непокритого фотоелектричного теплового колектора з рідинним охолодженням [1]

Фотоелектричний модуль у складі PVT колектора розглядається як послідовно з'єднані сонячні елементи, для опису яких використовується однодіодна еквівалентна схема: сонячний елемент розглядається як комбінація паралельно включених джерела струму, діоду та шунтуючого опору R_{sh}, послідовно до яких підключено опір R_s. Світлова вольт-амперна характеристика реального сонячного елемента у відповідності до однодіодної еквівалентної схеми запишеться експоненціальним рівнянням з п'ятьма параметрами: струм насичення діода I_0, послідовний R_s та шунтуючий R_{sh} опори, коефіцієнт якості p-n переходу A та фотострум $I_ф$, пропорційний сонячному випромінюванню, що надходить на поверхню елемента:

$$I = I_{\Phi} - I_0\left[\exp\left(\frac{e\left(U + IR_s\right)}{AkT}\right) - 1\right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}\,. \qquad (1)$$

Створення моделі теплової компоненти колектора в програмному середовищі Matlab/Simulink базується на еквівалентній тепловій схемі, яка описує процеси передачі теплоти від фотоелектричного модуля до теплоносія в каналах теплового колектора, а також тепловтрати з фронтальної та тильної поверхні PVT колектора в оточуюче середовище (рис. 2).

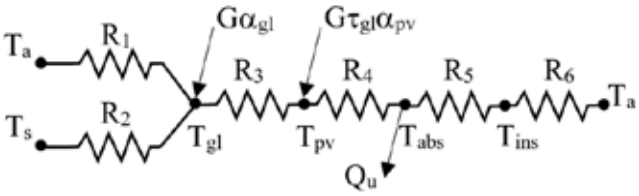


Рис. 2. Еквівалентна теплова схема колектора

При розрахунку надходжень тепла від сонячної радіації G враховано кількість теплоти, поглинутої скляним покриттям $G\alpha_{gl}$ та фотоелектричним модулем $G\tau_{gl}\alpha_{pv}$. Частина теплоти використовується корисно для нагріву теплоносія Q_u, а частина втрачається в оточуюче середовище.

Втрати енергії через верхню поверхню колектора враховуються двома термічними опорами: конвекції R_1 та випромінювання R_2. Опір передачі теплоти від верхнього шару скла до навколишнього середовища R_1 обернено пропорційний коефіцієнту конвективної тепловіддачі h_c, який визначається з урахуванням швидкості вітру v над колектором з емпірічного рівняння [5]:

$$h_c = 2{,}8 + 3{,}0v. \tag{1}$$

Нагріта фронтальна поверхня колектора втрачає тепло шляхом випромінювання до небозводу, що має температуру T_s:

$$T_s = 0{,}0522T_a^{1,5}, \tag{2}$$

де T_a – температура оточуючого середовища.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\frac{1}{R_2} = h_r = \varepsilon_{gl}\sigma\left(T_{gl}^2 + T_s^2\right)\left(T_{gl} + T_s\right), \tag{3}$$

де ε_{gl} і T_{gl} – відповідно ступінь чорноти та температура скляного ламінату; σ – стала Стефана-Больцмана.

При визначенні тепловтрат з тильної поверхні враховано тільки конвекцію R_6, оскільки радіаційними тепловтратами можна знехтувати через близькість температур тильної поверхні ізоляції T_{ins} та зовнішнього повітря T_a.

Термічні опори R_3, R_4 та R_5 визначаються властивостями матеріалів шарів конструкції колектора: інкапсулятора, фотоелектричного перетворювача, клею, абсорбера, тильної теплоізоляції:

$$R = \sum \delta_i / \lambda_i, \tag{4}$$

де δ_i – товщина шару конструкції, λ_i – коефіцієнт теплопровідності.

Розроблена в програмі Matlab/Simulink модель непокритого фотоелектричного теплового колектора представлена на рис. 3.

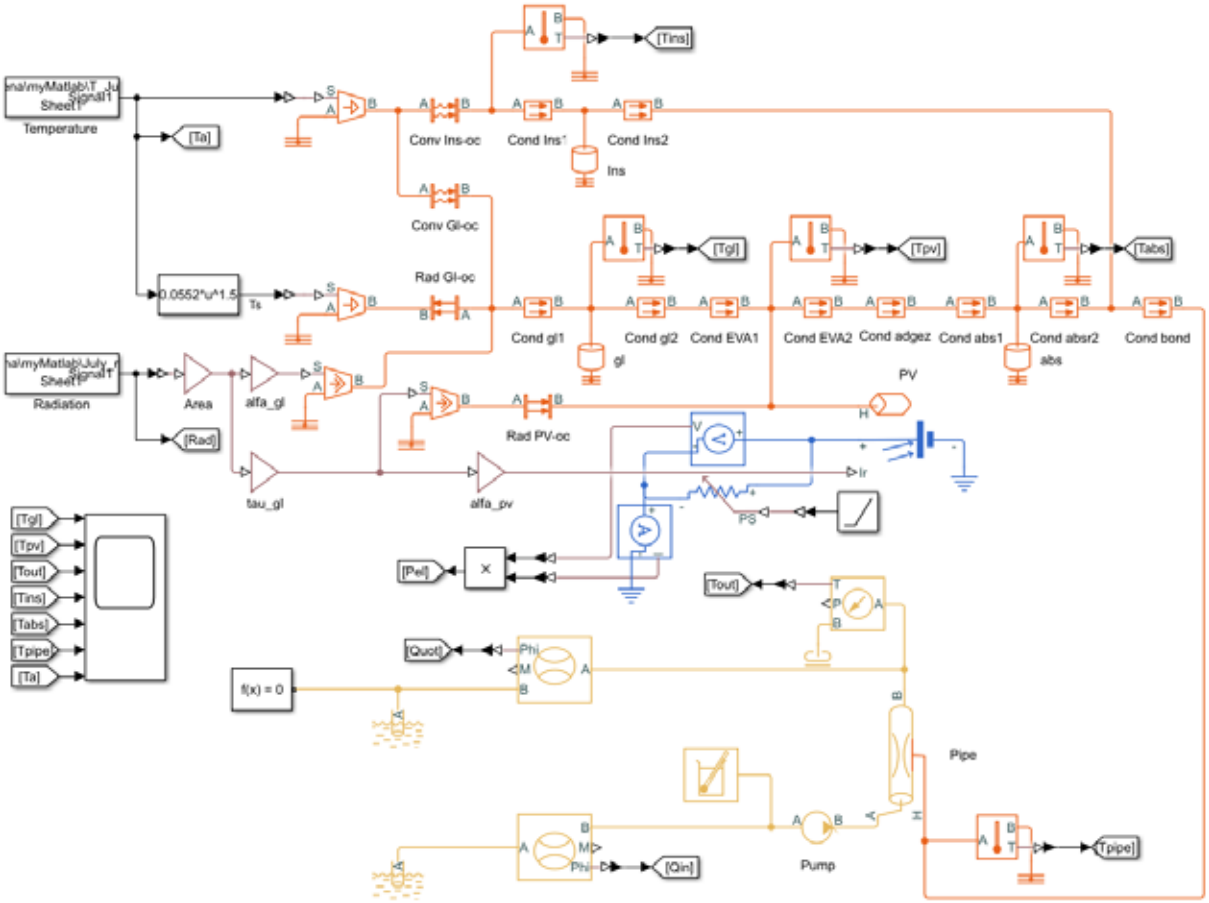


Рис. 3. Модель фотоелектричного теплового колектора

В якості досліджуваного зразка обрано непокритий колектор SUNSYSTEM PVT 240, виконаний на основі полікристалічного кремнієвого фотоелектричного модуля, параметри якого представлено у табл. 1. Розмір PVT колектора становить 1650×990×40 мм. Абсорбер виконано з алюмінієвого листа товщиною 200 мкм, канали для теплоносія – з мідних труб діаметром 15 мм сумарною довжиною 9,3 м, тильна ізоляція із жорсткого пінополіуретану товщиною 20 мм.

Таблиця 1

Електричні параметри колектора SUNSYSTEM PVT 240

Параметр	Значення
Кількість елементів / розміри елемента	60 / 156×156 мм
Максимальна потужність	240 Вт
Напруга в точці максимальної потужності	30,6 В
Струм в точці максимальної потужності	7,84 А
Напруга холостого ходу	37,2 В
Струм короткого замикання	8,52 А
Ефективність модуля	14,7%
Температурний коефіцієнт потужності	-0,45 %/ºС

Фотоелектричний модуль в розробленій моделі задано блоком Solar Cell як ланцюг послідовно з'єднаних 60 сонячних елементів. В якості навантаження обрано резистор змінного опору, що дозволяє визначити параметри колектора в режимі максимальної електричної потужності, при якому забезпечується мінімальний розігрів модуля.

Проведено моделювання випробувань фотоелектричного теплового колектора SUNSYSTEM PVT 240 при густині потоку сонячної радіації 1000 Вт/м^2, швидкості вітру 0 м/с, температурі оточуючого середовища 25ºС, витраті теплоносія (пропілен-гліколева суміш) 0,02 кг/(с·м^2). Температура теплоносія на вході в колектор задавалася на 10, 30 та 50ºС вищою за температуру оточуючого середовища. Максимальна теплова ефективність та коефіцієнти тепловтрат визначалися за характеристичною кривою продуктивності теплового колектора Q_u для стаціонарних умов випробувань:

$$\frac{Q_u}{A} = G\eta_0 - a_1\left(T_m - T_a\right) - a_2\left(T_m - T_a\right)^2, \quad (5)$$

де A – загальна площа сонячного колектора; η_0 – максимальна теплова ефективність; a_1 та a_2 – лінійний та квадратичний коефіцієнти тепловтрат; T_m – середня температура рідини в колекторі.

Результати моделювання випробувань представлено у табл. 2. Порівняння отриманих результатів із тепловими параметрами зі специфікації колектора SUNSYSTEM PVT 240 показує відхилення менше 5%. Відхилення значень електричної потужності від розрахованих за температурою фотоелектричного модуля не перевищувало 3%, що свідчить про коректність запропонованої моделі.

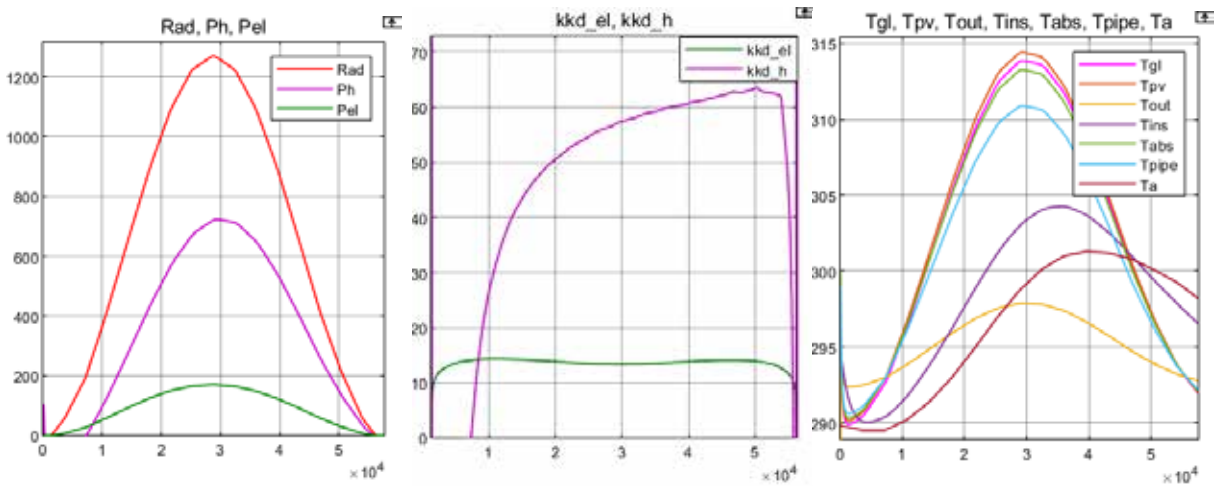
Таблиця 2

Теплові параметри PVT колектора

Параметр	Моделювання	Специфікація	Відхилення
Максимальна теплова ефективність	0,533	0,559	4,6%
Лінійний коефіцієнт тепловтрат, Вт/(м^2·К)	9,53	9,13	4,5%
Номінальна теплова потужність, Вт	871	900	3,2%

Проведено моделювання роботи PVT колектора впродовж характерного дня липня для кліматичних умов м. Херсон. Надходження сонячної радіації на нахилену під кутом 30º поверхню розраховано з використанням даних НАСА [10], погодинний розподіл температур прийнято згідно ДСТУ Б А.2.2-12:2015. На основі отриманої залежності оптимального опору навантаження від інтенсивності сонячної радіації забезпечено режим максимальної електричної потужності фотоелектричного модуля.

Генерація електрики PVT колектором відбувається протягом світлового дня, тоді як генерація теплової енергії починається через 1 год 36 хв після сходу Сонця, що пов'язано з необхідністю прогріву колектора (рис. 4, а). Кількість генерованої теплової енергії та теплова ефективність PVT колектора більші у другій половині світлового дня (рис. 4, б), що пояснюється більш високими температурами зовнішнього повітря T_a (рис. 4, в), тобто зменшеними тепловтратами в оточуюче середовище. Максимальна ефективність теплового перетворення становить 63,55 %, а максимальна теплова потужність за даних умов експлуатації 723 Вт (рис. 4, а).



а) б) в)

Рис. 4. Моделювання роботи фотоелектричного теплового колектора для умов характерного дня липня

Наявність системи охолодження дозволяє підтримувати температуру фотоелектричного модуля меншою 42 ºС (рис. 4, в). Підвищення температури модуля в біляполуденні години призводить до зменшення ефективності з 14,35 % до 13,38 % (рис. 4, б). Загальна ефективність перетворення сонячного випромінювання фотоелектричним тепловим колектором для характерної доби липня не перевищує 77,44%. Високі досяжні ефективності перетворення та потужності генерації свідчать про доцільність застосування непокритих PVT колекторів для кліматичних умов України.

Розроблена модель дозволяє визначати генеровані теплову та електричну потужності, ефективності перетворення, температури компонентів непокритого фотоелектричного теплового колектора при стаціонарних або змінних зовнішніх умовах експлуатації для різних режимів роботи фотоелектричного модуля, і, таким чином, проводити імітацію випробувань колектора та дослідження його роботи в заданих кліматичних умовах.

Висновки

На сьогодні запропоновано ряд моделей фотоелектричних теплових колекторів, частину з яких реалізовано в програмному середовищі Matlab/Simulink. Втім, до цього часу в літературних джерелах було описано лише одну створену на основі блоків Simscape імітаційну модель покритого колектора, недоліком якої є неможливість відстеження точки максимальної потужності, що занижує значення генерованої електричної енергії.

Розроблена в даній роботі імітаційна модель непокритого фотоелектричного теплового колектора на основі блоків Simscape дозволяє визначати теплову та електричну потужності, ефективності перетворення, температури компонентів колектора для заданих режимів роботи фотоелектричного модуля при стаціонарних або змінних параметрах сонячної радіації та температури оточуючого середовища, забезпечуючи роботу фотоелектричного модуля в точці максимальної потужності.

Проведено моделювання випробувань колектора SUNSYSTEM PVT 240. Відхилення отриманих теплових та електричних параметрів від паспортних не перевищує відповідно 5 % та 3 %, що свідчить про коректність запропонованої моделі. Моделювання роботи колектора при змінних зовнішніх умовах показало можливість застосування моделі в якості інструменту для аналізу ефективності непокритих PVT колекторів.

Список використаної літератури

1. Zenhäusern D., Bamberger E., Baggenstos A. PVT Wrap-Up. Energy systems with photovoltaic-thermal solar collectors [Electronic resource]. Institut für Solartechnik SPF, 2017. 89 p. Access mode: https://www.ost.ch/en/details/projects/pvt-wrap-up-energy-systems-with-photovoltaic-thermal-solar-collectors-1381 (last access: 10.10.25). Title from the screen.

2. Lämmle M., Herrando M., Ryan G. Basic concepts of PVT collector technologies, applications and markets IEA SHC Task 60/Report D5 [Electronic resource]. International Energy Agency, 2020. 25 p. Access mode: https://task60.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task60-D5-Basic-Concepts-of-PVT-Technologies.pdf (last access: 12.10.25). Title from the screen. DOI:10.18777/ieashc-task60-2020-0002

3. Abdullah A.L., Misha S., Tamaldin N., Rosli M.A.M., Sachit F.A. Photovoltaic Thermal /Solar (PVT) Collector (PVT) System Based on Fluid Absorber Design: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. Vol. 48, Iss. 2. 2018. pp. 196-208.

4. Guarracino I., Mellor A., Ekins-Daukes N.J., Markides C.N. Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 101. 2016. pp. 778-795. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.056

5. Brahim T., Abdelati R., Jemni A. Dynamic simulation of roll bond PVT solar collector under Simulink/Matlab. *Engineering Research Express*. Vol. 6, 2024. 045340. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad8ff5

6. Basaran K., Koç İ. Performance and Techno-Economic Analysis of a Hybrid Photovoltaic/Thermal System for Building Application in Turkey [Electronic resource]. 2021. 28 p. Access mode: https://www.researchsquare.com/article/rs-220189/v1 (last access: 23.10.25). Title from the screen. DOI:10.21203/rs.3.rs-220189/v1

7. Grigore R.M., Vernica S.G., Popa S.E., Banu I.V. Simulation and Experimental Results for Energy Production Using Hybrid Photovoltaic Thermal Technology. *Energies*. Vol. 17, Iss. 6. 2024. 1422. https://doi.org/10.3390/en17061422

8. Bugała A., Arendacz A., Bugała D. Simulation analysis of a photovoltaic-thermal energy generator for residential prosumers in Matlab/Simulink. *Przegląd elektrotechniczny*. R. 100, No. 3, 2024. pp. 142–148. DOI:10.15199/48.2024.03.26

9. Ngunzi V., Njoka F., Kinyua R. Modeling, simulation and performance evaluation of a PVT system for the Kenyan manufacturing sector. *Heliyon.* Vol. 9, Iss.8. 2023. e18823. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18823

10. Power data access viewer [Electronic resource] Access mode: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (last access: 20.10.2025). Title from the screen.

References

1. Zenhäusern D., Bamberger E., Baggenstos A. (2017) PVT Wrap-Up. Energy systems with photovoltaic-thermal solar collectors [Electronic resource]. Institut für Solartechnik SPF. 89 p. Access mode: https://www.ost.ch/en/details/projects/pvt-wrap-up-energy-systems-with-photovoltaic-thermal-solar-collectors-1381 (last access: 10.10.25). Title from the screen.

2. Lämmle M., Herrando M., Ryan G. (2020) Basic concepts of PVT collector technologies, applications and markets IEA SHC Task 60/Report D5 [Electronic resource]. International Energy Agency. 25 p. Access mode: https://task60.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task60-D5-Basic-Concepts-of-PVT-Technologies.pdf (last access: 12.10.25). Title from the screen. DOI:10.18777/ieashc-task60-2020-0002

3. Abdullah A.L., Misha S., Tamaldin N., Rosli M.A.M., Sachit F.A. (2018) Photovoltaic Thermal /Solar (PVT) Collector (PVT) System Based on Fluid Absorber Design: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. Vol. 48, Iss. 2. pp. 196-208.

4. Guarracino I., Mellor A., Ekins-Daukes N.J., Markides C.N. (2016) Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 101. pp. 778-795. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.056

5. Brahim T., Abdelati R., Jemni A. (2024) Dynamic simulation of roll bond PVT solar collector under Simulink/Matlab. *Engineering Research Express*. Vol. 6. 045340. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad8ff5

6. Basaran K., Koç İ. (2021) Performance and Techno-Economic Analysis of a Hybrid Photovoltaic/Thermal System for Building Application in Turkey [Electronic resource]. 28 p. Access mode: https://www.researchsquare.com/article/rs-220189/v1 (last access: 23.10.25). Title from the screen. DOI:10.21203/rs.3.rs-220189/v1

7. Grigore R.M., Vernica S.G., Popa S.E., Banu I.V. (2024) Simulation and Experimental Results for Energy Production Using Hybrid Photovoltaic Thermal Technology. *Energies*. Vol. 17, Iss. 6. 1422. https://doi.org/10.3390/en17061422

8. Bugała A., Arendacz A., Bugała D. (2024). Simulation analysis of a photovoltaic-thermal energy generator for residential prosumers in Matlab/Simulink. *Przegląd elektrotechniczny*. R. 100, No. 3. pp. 142–148. DOI:10.15199/48.2024.03.26

9. Ngunzi V., Njoka F., Kinyua R. (2023) Modeling, simulation and performance evaluation of a PVT system for the Kenyan manufacturing sector. *Heliyon.* Vol. 9, Iss.8. e18823. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18823

10. Power data access viewer [Electronic resource] Access mode: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (last access: 20.10.2025). Title from the screen.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025