

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В СОНЯЧНІЙ ТЕРМОФОТОЕЛЕКТРИЧНІЙ ПАНЕЛІ

Анотація. В роботі запропоновано дизайн комбінованої сонячної термофотоелектричної панелі, в якій одночасно генерується електрична та теплова енергія. Тепловий режим в шарах термофотоелектричної панелі досліджувався на основі розробленої нестационарної нелінійної математичної моделі та створеного програмного додатку. В результаті комп'ютерного моделювання доведені перспективи використання термофотоелектричної панелі відповідного дизайну для термічної стабілізації сонячних елементів та генерації низькопотенційної теплоти.

Ключові слова: нестационарна математична модель, система нелінійних диференціальних рівнянь, числові методи, сонячні елементи, розподіл температур, термофотоелектрична панель, низькопотенційна теплота.

Постановка проблеми. Пряме фотоелектричне перетворення енергії Сонця є найбільш розвинутою та адаптованою технологією, яка широко використовується в наземній і космічній енергетиці. Фотоелектричні сонячні панелі забезпечують споживачів електричною енергією, яка відповідає світовим екологічним та економічним стандартам. В той же час фотоелектричні системи мають низькі питомі енергетичні показники, що обмежує їх застосування. По-перше, ці низькі енергетичні показники обумовлені фізичною природою фотоелектричного процесу та сучасним рівнем технологій створення відповідних сонячних елементів [1]. По-друге, для отримання промислових значень електричної потужності, сонячні панелі повинні займати значні земельні ділянки, виділення яких пов'язано із об'єктивними труднощами. Збільшення площі сонячних фотоелектричних станцій призводить до проблем з комутацією між сонячними панелями, що, в свою чергу, зменшує загальну енергетичну потужність станції. Не меншою проблемою, що призводить до падіння енергетичної потужності фотоелектричних станцій, є температурні коливання в місці їх розташування. Зниження ефективності при збільшенні температури характерно для більшості типів сучасних промислових сонячних елементів [2]. Тому важливою науковою проблемою є мінімізація впливу температур на енергетичні показники сонячних панелей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує два основних шляхи розв'язання цієї проблеми – створення нових типів сонячних елементів з малою залежністю ефективності від температури або зміна дизайну сонячних панелей. В світі проводяться інтенсивні наукові дослідження і отримані зразки нових високоефективних сонячних

елементів, в яких ККД мало залежить від температури або навіть зростає при її підвищенні [3]. Але висока вартість таких сонячних елементів не дозволяє використовувати їх в промислових масштабах.

Зміна дизайну сонячних панелей може призводити до підвищенню їх енергетичної ефективності навіть при використанні традиційних сонячних елементів типу моно c-Si (кремнієві монокристалічні) або poly-Si (кремнієві полікристалічні) та ін. Зміна дизайну сонячних панелей проводиться пасивними та активними методами. До пасивних методів відноситься відповідне розташування сонячних панелей з точки зору врахування географічних та кліматичних факторів [4,5], а також особливостей монтажу [6]. До сучасних пасивних методів зміни дизайну сонячних панелей відноситься також введення в їх конструкцію фазоперехідного матеріалу, в якому накопичується зайве тепло, але на даний момент такі системи ще не набули широкого промислового впровадження.

На відміну від комбінованих фазоперехідних сонячних панелей, все більш розповсюдженими стають комбіновані термофотоелектричні (PV/T) панелі [7]. Дизайн таких панелей формується шляхом введення в їх конструкцію додаткових каналів з теплоносієм, який знімає залишкове тепло з сонячних елементів. Це може призводити до термостабілізації або навіть охолодження сонячних елементів, що підвищують їх ефективність. Крім того, додаткова теплота, яка передається конвекцією теплоносію, може використовуватись за призначенням.

Мета дослідження. Метою даної роботи є доведення перспектив удосконалення традиційної poly-Si сонячної панелі шляхом додавання шару теплоносія з фронтальної сторони. Така комбінована PV/T панель досліджувалась методами математичного та комп'ютерного моделювання на основі створеного власного програмного коду. В ході числових досліджень визначено розподіл температур в кожному шарі запропонованої PV/T панелі, вплив на цей розподіл зовнішніх (географічних, кліматичних) та внутрішніх (особливості дизайну та динаміки теплоносія) факторів.

Викладення основного матеріалу дослідження. В якості об'єкта дослідження обиралась модель сонячної панелі типу Photowatt PWX500 з poly-Si сонячними елементами. В цій панелі сонячні елементи розташовані між двома скляними поверхнями з проміжними шарами із герметіку типу EVA та скловолокна. З фронтальної сторони сонячної панелі додатково додається плоский канал з теплоносієм (водою), який може бути розділений перегородками. Вибір саме плоского каналу для теплоносія базується на його енергетичних перевагах, які доведені в [8]. Вся конструкція PV/T панелі розміщується в металевому або полімерному корпусі і з фронтальної сторони закрита захисним склом. Таким чином, запропонована модель PV/T панелі фактично є плоским сонячним колектором особливого типу, в якому генерується як теплова, так і електрична енергія. На рис. 1 схематично показана позамасштабна фізична модель запропонованої PV/T панелі.

Математична модель для визначення розподілу температур в шарах PV/T панелі запропонованого дизайну будувалась на основі нестационарної математичної моделі

для класичної сонячної панелі, яку розроблено в [9]. В математичну модель [9] додатково вводились рівняння, що описують теплообмін в захисному склі та в шарі теплоносія, а також функції апроксимації кліматичних даних в місці функціонування PV/Т панелі. Таким чином, нестационарна математична модель розподілу температур в шарах PV/Т панелі має вигляд:

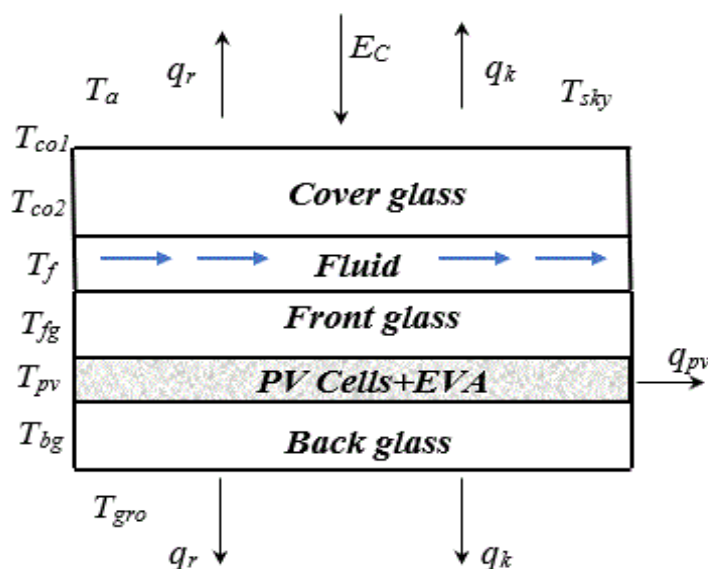


Рисунок 1 – Позамаштабна схема PV/Т панелі

- для фронтальної поверхні захисного скла:

$$\rho_{co1} h_{co1} C_{p_{co1}} \frac{dT_{co1}(t)}{dt} = \alpha_a(t)(T_a(t) - T_{co1}(t)) + \varepsilon_{co1} \sigma F_{co1sky} (T_{sky}^4(t) - T_{fg}^4(t)) + \varepsilon_{co1} \sigma F_{co1gro} (T_{gro}^4(t) - T_{co1}^4(t)) + \frac{\lambda_{co1}}{h_{co1}} (T_{co2}(t) - T_{co1}(t)) + A_{co1} E_C(t); \quad (1)$$

- для тильної поверхні захисного скла:

$$\rho_{co2} h_{co2} C_{p_{co2}} \frac{dT_{co2}(t)}{dt} = \alpha_f(t)(T_f(t) - T_{co2}(t)) + \varepsilon_{fg}^{co2} \sigma (T_{fg}^4(t) - T_{co2}^4(t)) + \frac{\lambda_{co2}}{h_{co2}} (T_{co1}(t) - T_{co2}(t)); \quad (2)$$

- для теплоносія:

$$\rho_f h_f C_{p_f} \frac{dT_f(t)}{dt} = \alpha_f(t)(T_{co2}(t) - T_f(t)) + \alpha_f(t)(T_{fg}(t) - T_f(t)) + \dot{m}_f C_{p_f} (T_f(t) - T_{in}); \quad (3)$$

- для фронтальної поверхні скла сонячної панелі:

$$\rho_{fg} h_{fg} C_{p_{fg}} \frac{dT_{fg}(t)}{dt} = \alpha_f(t)(T_f(t) - T_{fg}(t)) + \varepsilon_{fg}^{co2} \sigma (T_{co2}^4(t) - T_{fg}^4(t)) + \bar{\lambda}_{pv}^{fg} (T_{pv}(t) - T_{fg}(t)); \quad (4)$$

- для шару сонячних елементів:

$$\rho_{pv} h_{pv} C_p \frac{dT_{pv}(t)}{dt} = \bar{\lambda}_{pv}^{fg} (T_{bg}(t) - T_{pv}(t)) + \bar{\lambda}_{bg}^{pv} (T_{fg}(t) - T_{pv}(t)) + q_{pv}(t); \quad (5)$$

- тильної поверхні скла сонячної панелі:

$$\rho_{bg} h_{bg} C_p \frac{dT_{bg}(t)}{dt} = \alpha_a(t) (T_a(t) - T_{bg}(t)) + \varepsilon_{bg} \sigma F_{bgsky} (T_{sky}^4(t) - T_{bg}^4(t)) + \varepsilon_{bg} \sigma F_{bggro} (T_{gro}^4(t) - T_{bg}^4(t)) + \bar{\lambda}_{bg}^{pv} (T_{pv}(t) - T_{bg}(t)). \quad (6)$$

В математичній моделі (1) – (6) $T, h, \rho, C_p, \lambda, \varepsilon$ – температура, товщина, густина, коефіцієнт теплоємності, коефіцієнт теплопровідності та ступень чорноти кожного шару PV/Т панелі, відповідно; T_a, T_{sky}, T_{gro} – температура навколишнього повітря, неба та землі, відповідно [10]; $\bar{\lambda}$ – коефіцієнт ефективної теплопровідності відповідних шарів PV/Т панелі [11]; α_a, α_f – коефіцієнти тепловіддачі між PV/Т панеллю та навколишнім середовищем та між теплоносієм та стінками каналу, відповідно; \dot{m}_f – питома масова витрата теплоносія; A_{co1} – коефіцієнт поглинання поверхні захисного скла; σ – стала Стефана – Больцмана; F_i – коефіцієнти, в яких враховується кут розташування панелі відносно горизонту; $E_c(t), q_{pv}(t)$ – щільність теплового потоку від Сонця та від сонячних елементів, відповідно.

Розроблена математична модель (1)–(6) була розв’язана з використанням власного програмного додатку, який реалізовано на мови програмування системи комп’ютерної алгебри Mathematica [12].

Значення щільності теплового потоку від Сонця, температури навколишнього середовища та швидкості вітру, яке необхідно для визначення коефіцієнту тепловіддачі між поверхнями PV/Т панелі, знаходилось за даними відкритих весвітніх кліматичних баз [13]. Значення $q_{pv}(t)$ розраховувалось у відповідності до підходу, представленого в [2].

Моделювання проходило в режимі реального часу в обраній географічній локації для визначеного дня року. Геометричні параметри PV/Т панелі відповідали геометричним параметрам сонячної панелі типу Photowatt PWX500 з товщиною шарів $h_{pv} = 0.22 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_{fg} = h_{bg} = 0.0195 \text{ м}$. Товщина шару теплоносія обиралась $h_f = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а товщина захисного скла $h_{co1} = h_{co2} = 0.004 \text{ м}$. Теплові втрати з бокових поверхонь панелі не враховувались. Заявлене виробником ККД poly-Si сонячних елементів при температурі $T_{\eta=0.13} = 25^{\circ} \text{ C}$ дорівнювало $\eta = 0.13$. PV/Т панель встановлювалась під кутом $\beta = 45^{\circ}$ до горизонту, початкова температура всіх її шарів складала $T_{ноч} = 10^{\circ} \text{ C}$, а температура теплоносія на вході в канал $T_{in} = 12.5^{\circ} \text{ C}$.

На рис. 2 представлено результати розрахунків по визначенню розподілу температур в шарах PV/T панелі при питомій масовій витраті теплоносія

$$\dot{m}_f = 1.325 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}.$$

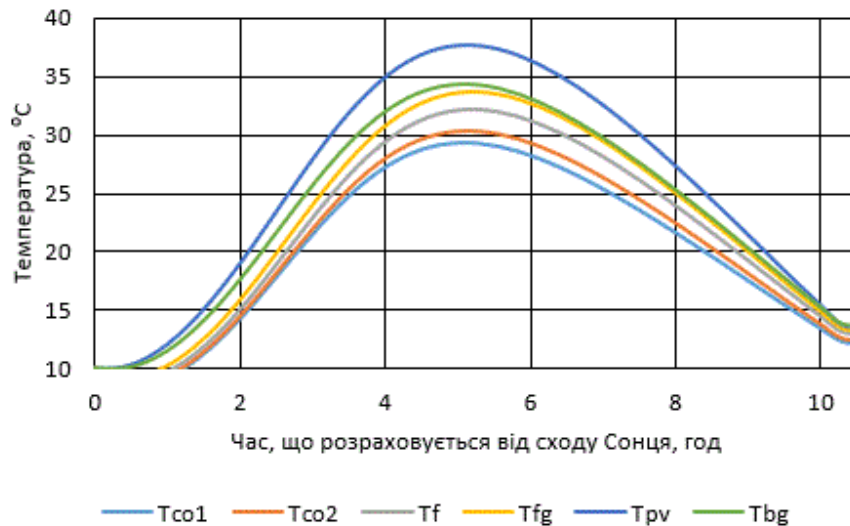


Рисунок 2 – Розподіл температур протягом світового дня в шарах PV/T панелі

Аналіз графіків показує, що найвищу температуру в PV/T панелі має шар сонячних елементів, при чому максимальна їх температура перевищує майже на 13°C температуру, яка відповідає максимальній ефективності. Таку ж температуру сонячні елементи мають і в сонячній панелі традиційного дизайну [5], тобто теплоносії, що циркулює в каналі PV/T панелі, не сприяє охолодженню сонячних елементів. В той же час в PV/T панелі температура теплоносія в середньому підвищується більш ніж на 20°C і це стає достатнім для генерації низькопотенційної теплоти. Підвищення масової витрати теплоносія призводить до ще більшого зростання температури як сонячних елементів, так і теплоносія. На рис. 3 показані розподіли температур в шарі сонячних елементів та в теплоносії при питомій масовій витраті теплоносія $\dot{m}_f = 1.325 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ та

$$\dot{m}_f = 2.65 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}, \text{ відповідно.}$$

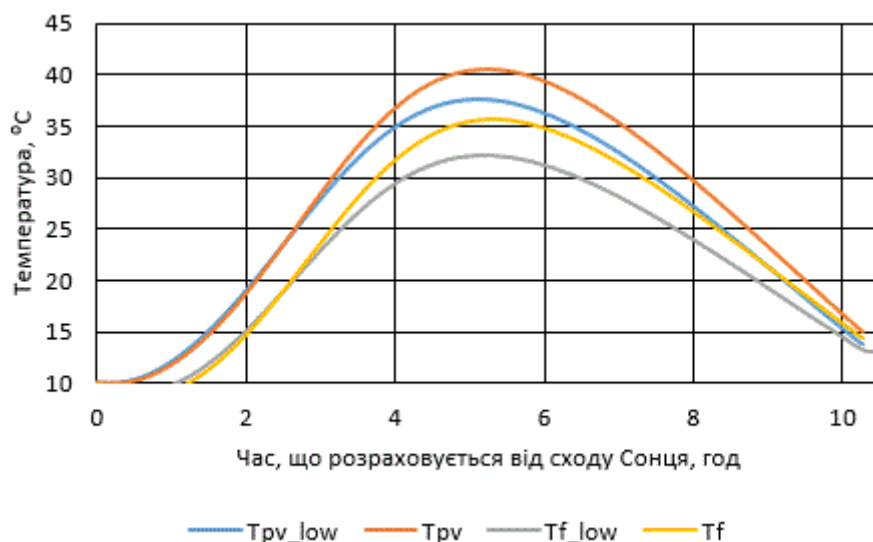


Рисунок 3 – Розподіл температур протягом світового дня в шарі сонячних елементів та в теплоносії PV/Т панелі

Висновки. В роботі запропоновано дизайн сонячної PV/Т панелі для одночасної генерації електричної та теплової енергії. Розроблена математична модель, створений програмний додаток та проведені числові дослідження довели, що обраний дизайн PV/Т панелі забезпечує лише термостабілізацію сонячних елементів, не охолоджуючи їх. В той же час, отриманий рівень середніх температур теплоносія в PV/Т панелі є достатнім для генерацію низькопотенційної теплоти.

ЛІТЕРАТУРА

1. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
2. Захаров Д.В., Книш Л.І. Математичне моделювання впливу температурного режиму на ефективність сонячної панелі, Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій, 2022, Т.34, С. 48-58.
3. Fazal M.A., Rubaiee Saeed, Progress of PV cell technology: Feasibility of building materials, cost, performance, and stability, Solar Energy, 2023, Vol.258, P.203 – 219.
4. Rakhimov E.Yu., Avezova N.R., Emamgholizadeh Samad, Ziaii Mansour, Assessment of the Technical Potential of PV Stations on the Example of the Fergana Valley. Part II: Analysis of Sunny, Partly Cloudy and Cloudy Days, Applied solar energy, 2024, Vol. 60, P. 346 – 356.
5. Книш Л.І., Захаров Д.В. Нестационарна математична модель розподілу температур в шарах сонячної панелі при реальних умовах її функціонування, Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”, м. Київ, 22–24 травня 2024р., С.202.
6. Delia D'Agostino, Danny Parker, Paco Melià, Giovanni Dotelli, Optimizing photovoltaic electric generation and roof insulation in existing residential buildings, Energy and Building, 2022, Vol.255, 111652.

7. Adnan Ibrahim, Mohd Yusof Othman, Mohd Hafidz Ruslan, Sohif Mat, Kamaruzzaman Sopian, Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, Vol.15, Is.1, P.352 – 365.
8. Cristofari C., Notton G., Canaletti J.L. Thermal behavior of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions, *Solar Energy*, 2009, Vol. 83, P. 1123–1138.
9. Захаров Д. В., Книш Л. І. Нестационарна математична модель розподілу температур в шарах сонячної панелі. *Технічна механіка*, 2023 (3), С.79 – 87.
10. Kudish A.I., Evseev E.G., Walter G., Leukefeld T., Simulation study of a solar collector with a selectively coated polymeric double walled absorber plate, *Energy Conversion and Management*, 2002, Vol.43, P. 651 – 671.
11. Cristofari C., Notton G., Poggi P., Louche A., Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector, *Solar Energy*, 2002, Vol. 72 (2), P. 99–112.
12. <https://www.wolframcloud.com>
13. <https://neo.gsfc.nasa.gov>

REFERENCES

1. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
2. Zakharov D.V., Knysh L.I., Mathematical modeling of the influence of temperature on the efficiency of the solar panel, *Problems of computational mechanics and strength of structures*, 2022, Vol.34, P.48-58.
3. Fazal M.A., Rubaiee Saeed, Progress of PV cell technology: Feasibility of building materials, cost, performance, and stability, *Solar Energy*, 2023, Vol.258, P.203 – 219.
4. Rakhimov E.Yu., Avezova N.R., Emamgholizadeh Samad, Ziaii Mansour, Assessment of the Technical Potential of PV Stations on the Example of the Fergana Valley. Part II: Analysis of Sunny, Partly Cloudy and Cloudy Days, *Applied solar energy*, 2024, Vol. 60, P. 346 – 356.
5. Knysh L., Zakharov D., Non-stationary mathematical model of temperature distributions in solar panel layers during real operating conditions, *Materials of the XXV International scientific and practical conference «Renewable energy and energy efficiency in the XXI century»*, Kyiv, May 22-24, 2024, P.202.
6. Delia D'Agostino, Danny Parker, Paco Melià, Giovanni Dotelli, Optimizing photovoltaic electric generation and roof insulation in existing residential buildings, *Energy and Building*, 2022, Vol.255, 111652.
7. Adnan Ibrahim, Mohd Yusof Othman, Mohd Hafidz Ruslan, Sohif Mat, Kamaruzzaman Sopian, Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, Vol.15, Is.1, P.352 – 365.
8. Cristofari C., Notton G., Canaletti J.L. Thermal behavior of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions, *Solar Energy*, 2009, Vol. 83, P. 1123–1138.
9. Zakharov D.V., Knysh L.I., Non-stationary mathematical model of the temperature distribution in solar panel layers, *Technical mechanics*, 2023, №3, P. 79 -87.
10. Kudish A.I., Evseev E.G., Walter G., Leukefeld T., Simulation study of a solar collector with a selectively coated polymeric double walled absorber plate, *Energy Conversion and Management*, 2002, Vol.43, P. 651 – 671.

11. Cristofari C., Notton G., Poggi P., Louche A., Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector, *Solar Energy*, 2002, Vol. 72(2), P. 99–112.

12. <https://www.wolframcloud.com>

13. <https://neo.gsfc.nasa.gov>

Received 02.10.2024.

Accepted 15.10.2024.

Mathematical modeling of the thermal regime in solar photovoltaic thermal panel

Design of a combined solar photovoltaic thermal panel (PV/T) for the simultaneous generation of electrical and thermal energy was proposed in this study. The basis of the new design is a traditional solar panel with poly-Si solar cells. A flat channel with a heat transfer fluid is added to the front size of such a panel. This channel is bounded by cover glass. A non-stationary mathematical model was developed for determination of temperature regime in the PV/T panel. This model consists to the system of nonlinear ordinary differential equations, which describes mutual influence of external and internal heat flows and temperatures. A Math-software was created based on the developed mathematical model. The numerical studies were conducted in in real-time mode for selected geographical location of the PV/T panel. Heat flux density from the Sun, wind speed and ambient temperature were determined based on data from open worldwide climate databases. As result of computer modeling, the typical temperature distributions in each layer of the PV/T panel during daylight hours were founded. It was determined that the heat transfer fluid moving in a transparent channel from the front side of the solar panel does not cool the solar cell. This heat transfer fluid ensures only their thermal stability at the corresponding value of the specific mass flow rate. With an increase of the specific mass flow rate of the heat transfer fluid, the growth of solar cells temperature is observed under unchanged environmental conditions. An the same time, the proposed design of the PV/T panel ensures a significant increase of the heat transfer fluid temperature. This makes it possible to use it in low-potential heat generation systems. This leads to an increase in the economic efficiency of solar panels, economy of occupied areas, optimization of system of production, consumption and storge of thermal and electrical energy.

Книш Людмила Іванівна – д.т.н., професор, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (м. Дніпро).

Захаров Денис Віталійович – аспірант кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (м. Дніпро).

Knysh Liudmyla – doctor of technical science, professor, professor of department of computer technologies of Oles Honchar Dnipro National University (Dnipro).

Zakharov Denis – PhD student of department of computer technologies of Oles Honchar Dnipro National University (Dnipro).