

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.383.51:621.362

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.1.1>

О.В. АНДРОНОВА

Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-9597-8068

В.В. КУРАК

Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-4303-5671

С.С. ГРИГОРЕНКО

Херсонський національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ФОТОТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО  
ПЕРЕТВОРЮВАЧА

*Продуктивність фотоелектричних перетворювачів обмежена температурним фактором, який викликає падіння генерованої потужності та ефективності при підвищенні робочої температури. Для вирішення проблеми нагрівання запропоновано ряд підходів, включаючи інтегрування з термоелектричним генератором. В таких системах теплова енергія утилізується термоелектричним модулем для отримання додаткової електричної потужності, при цьому температура фотоелектричного перетворювача знижується, що підвищує його енергетичні показники. Різноманітність використовуваних матеріалів перетворювачів, конструкцій та умов експлуатації вимагає дослідження режимів роботи інтегрованих фототермоелектричних систем в кожному конкретному застосуванні.*

*У цій роботі розглядається фототермоелектричний перетворювач на основі механічно стикованих монокристалічного кремнієвого фотоелектричного перетворювача та низькотемпературного термоелектричного модуля з  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , доступних на ринку енергетичного обладнання. Досліджується вплив умов експлуатації запропонованого інтегрованого фототермоелектричного перетворювача на його температурні режими роботи та енергетичні показники, для чого створено імітаційну модель перетворювача в програмному середовищі Matlab/Simulink.*

*Виходячи з критичної температури роботи фотоелектричного перетворювача, шляхом моделювання визначено зовнішні умови експлуатації інтегрованого перетворювача, зокрема доцільний діапазон значень ступеня концентрації потоку сонячного випромінювання, для якого проведено оцінку внеску фотоелектричного та термоелектричного перетворювачів в генеровану потужність гібрида на їх основі, а також визначено ефективність перетворювачів. Показано, що енергетичний вигравш від інтегрування фотоелектричного та термоелектричного перетворювачів спостерігається при ступенях концентрації сонячного випромінювання, вищих за 16, і дозволяє збільшити потужність фототермоелектричного перетворювача в 1,6 разів у порівнянні з суто фотоелектричним, що працює в аналогічних умовах освітлення. На основі аналізу отриманих даних запропоновано шляхи підвищення ефективності інтегрованого фототермоелектричного перетворювача.*

*Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, термоелектричний генератор, інтегрований фототермоелектричний перетворювач, імітаційна модель, генерована потужність, ефективність, ступінь концентрації.*

Е.В. АНДРОНОВА

Херсонский национальный технический университет  
ORCID: 0000-0001-9597-8068

В.В. КУРАК

Херсонский национальный технический университет  
ORCID: 0000-0002-4303-5671

С.С. ГРИГОРЕНКО

Херсонский национальный технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ФОТОТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Производительность фотоэлектрических преобразователей ограничена температурным фактором, вызывающим снижение генерируемой мощности и эффективности при повышении рабочей температуры. Для решения проблемы нагрева предложен ряд подходов, включая интегрирование с*

термоелектрическим генератором. В таких системах тепловая энергия утилизируется термоэлектрическим модулем для получения дополнительной электрической мощности, при этом температура фотоэлектрического преобразователя снижается, что повышает его энергетические показатели. Разнообразие используемых материалов преобразователей, конструкций и условий эксплуатации требует исследования режимов работы интегрированных фототермоэлектрических систем в каждом конкретном применении.

В данной работе рассматривается фототермоэлектрический преобразователь на основе механически стыкованного монокристаллического кремниевого фотоэлектрического преобразователя и низкотемпературного термоэлектрического модуля из  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , доступных на рынке энергетического оборудования. Исследуется влияние условий эксплуатации предложенного интегрированного фототермоэлектрического преобразователя на его температурные режимы работы и энергетические показатели, для чего создана имитационная модель преобразователя в программной среде Matlab/Simulink.

Исходя из критической температуры работы фотоэлектрического преобразователя, путем моделирования определены внешние условия эксплуатации интегрированного преобразователя, в частности целесообразный диапазон значений степени концентрации потока солнечного излучения, для которого проведена оценка вклада фотоэлектрического и термоэлектрического преобразователей в генерируемую мощность гибрида на их основе, а также определена эффективность преобразователей. Показано, что энергетический выигрыш от интегрирования фотоэлектрического и термоэлектрического преобразователей наблюдается при степенях концентрации солнечного излучения свыше 16 и позволяет увеличить мощность фототермоэлектрического преобразователя в 1,6 раз по сравнению с фотоэлектрическим, работающим в аналогичных условиях освещения. На основе анализа полученных данных предложены пути повышения эффективности интегрированного фототермоэлектрического преобразователя.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, термоэлектрический генератор, интегрированный фототермоэлектрический преобразователь, имитационная модель, генерируемая мощность, эффективность, степень концентрации.

O.V. ANDRONOVA

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0001-9597-8068

V.V. KURAK

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0002-4303-5671

S.S. GRIGORENKO

Kherson National Technical University

## SIMULATION OF A PHOTOTHERMOELECTRIC CONVERTER OPERATION

The performance of photoelectric converters is limited by the temperature factor that causes a decrease of generated power and efficiency when the operating temperature rises. A number of approaches have been proposed to solve the heating problem, including integration with a thermoelectric generator. In such systems, thermal energy is utilized by a thermoelectric module to obtain additional electrical power, while the photovoltaic converter temperature decreases, leading to improve electrical generation. The variety of converter materials, designs, and operating conditions require investigation of the integrated photothermoelectric systems operating modes in each specific application.

In this paper, we consider a photothermoelectric converter based on mechanically connected single-crystal silicon photoelectric converter and  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  low-temperature thermoelectric module that are widely presented on the power equipment market. A simulation model of such converter has been created in the Matlab/Simulink software environment to study the influence of operating conditions on energy performance and temperature operating conditions of integrated photothermoelectric converter.

Based on photovoltaic converter critical operating temperature the integrated converter external operating conditions, in particular, the expedient range of solar radiation flux concentration ratio, were determined by modeling. The photovoltaic and thermoelectric contribution to the whole power of the hybrid photothermoelectric converter was estimated, and the corresponding converters efficiencies were determined. It is shown, that the energy gain from the photoelectric and thermoelectric converters integration is observed at solar radiation concentration ratio above 16 and allows increasing the power of a photothermoelectric converter by 1.6 times compared to only photoelectric convertor operating in similar irradiance conditions. Based on the analysis of obtained data, the ways to increase the integrated photothermoelectric converter efficiency are proposed.

*Keywords: photoelectric converter, thermoelectric generator, integrated photothermoelectric converter, simulation model, generated power, efficiency, concentration ratio.*

### Постановка проблеми

Зниження ефективності сонячних елементів із підвищенням їх температури – відома проблема фотоелектричних систем. Температурна залежність виробленої потужності та ефективності перетворення спричинює значні втрати енергії протягом терміну служби сонячних панелей, а нагрівання фотоелектричних панелей у довгостроковому періоді призводить до збільшення темпів деградації сонячних елементів.

Більша частина сонячної енергії перетворюється у сонячному елементі на тепло внаслідок термалізації збуджених електронів високої енергії та поглинання низькоенергетичних фотонів, що підвищує температуру фотоелектричного перетворювача (ФЕП), і до 90% втрат в сонячних елементах відноситься до теплових [1, 2]. Тому існує значний інтерес до охолодження фотоелементів за допомогою низки методів, таких як водяне або повітряне охолодження (гібридні сонячні колектори) або використання термоелектричних охолоджувачів (модулів Пельтьє).

Одним з варіантів вирішення проблеми нагріву є застосування гібридних фототермоелектричних (ФТЕ) систем, що складаються з ФЕП та термоелектричного генератора (ТЕГ) [3-6]. В таких системах тепла енергія утилізується ТЕГ для отримання додаткової електричної потужності, при цьому температура ФЕП знижується, що підвищує його енергетичні показники у порівнянні з ФЕП, окремо працюючим в аналогічних умовах опромінення [7, 8].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні розглядаються дві концепції: ФТЕ перетворювачі з оптично пов'язаними пристроями або системи з розділенням спектру, коли на ФЕП спрямовується тільки фотоактивна частина спектру сонячного випромінювання, а інфрачервона – на ТЕГ; інтегровані ФТЕ або системи термічно пов'язаних перетворювачів, коли ТЕГ приведені у тепловий контакт з тильною поверхнею сонячних елементів. У ФТЕ перетворювачах з розділенням спектру ТЕГ не знаходиться в тепловому контакті із сонячним елементом, він утилізує тільки інфрачервону частину сонячного спектру, не маючи можливості перетворити на електричну енергію теплові втрати фотоелектричної частини. В той же час, більшість теплових втрат припадає на ультрафіолетову та видиму частини сонячного спектру, що поглинаються саме ФЕП [2], а утилізація цього тепла за допомогою ТЕГ в ФТЕ з розділенням спектру не передбачається їх конструкцією. Тому з точки зору підвищення ефективності перетворення сонячного випромінювання концепція інтегрованих ФТЕ перетворювачів, в яких сонячний елемент знаходиться в тепловому контакті з ТЕГ, на сьогодні викликає більший інтерес [1, 3, 4].

Теоретичні та експериментальні дослідження параметрів інтегрованих ФТЕ перетворювачів показали збільшення продуктивності на  $20 \div 107,9\%$ , а ефективності максимум на  $3,5\%$  для умов неконцентрованого сонячного випромінювання [1, 3]; зростання ефективності перетворення на  $2 \div 5\%$  для умов слабоконцентрованого випромінювання [1, 9], а при кратності концентрації близько 300 – зростання ефективності на  $3,5 \div 10\%$ , а продуктивності на  $18,5\%$  [7, 10, 11] у порівнянні з окремо працюючим ФЕП.

Подальше покращення отриманих показників прогнозується за умови підбору оптимальних режимів роботи ФТЕ перетворювача, що забезпечуються при певних ступенях концентрації сонячного випромінювання та оптимальних опорах навантаження ФЕП та ТЕГ; покращення якості напівпровідникових матеріалів перетворювачів; використання наноструктур для підвищення поглинальної здатності поверхні ФЕП, оптимізації спектру фоточутливості; оптимізації геометричних параметрів ТЕГ, таких як довжина та площа поперечного перерізу гілки, коефіцієнт заповнення; підбору системи охолодження ТЕГ; зниження термоконтактного опору між ТЕГ та ФЕП; використання мікроканального теплового насоса тощо. Оптимізація ФТЕ перетворювачів проводиться методами аналітичного, чисельного, та імітаційного моделювання [11-13]. Останній метод дозволяє не тільки визначати параметри, а й відтворювати процеси функціонування досліджуваних систем при заданих умовах експлуатації.

### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження роботи інтегрованого фототермоелектричного перетворювача шляхом імітаційного моделювання в Matlab/Simulink.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Конструкція інтегрованого ФТЕ перетворювача складається з механічно стикованих ФЕП 2 та ТЕГ 3 (рис. 1). Пропонується використовувати ФЕП з верхнім покриттям 1, виконаним зі скла, оскільки це підвищує продуктивність ФТЕ перетворювачів [1]. Для збільшення різниці температур між гарячою і холодною сторонами ТЕГ і для підтримки температури сонячних елементів нижче критичної робочої температури до модуля ТЕГ приєднується теплообмінник 4 з примусовим охолодженням 5. Для зменшення термоконтактного опору контакт холодної та гарячої сторони ТЕГ з теплообмінником та

ФЕП відбувається через шари термопаста 6.

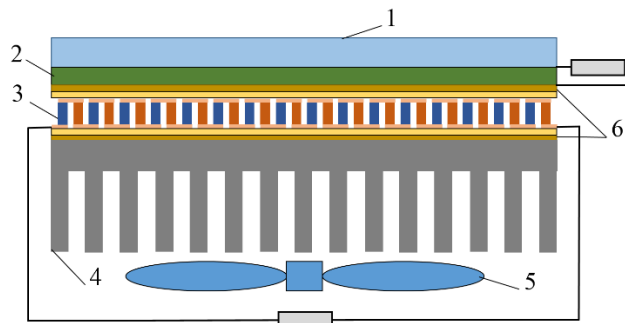


Рис. 1. Конструкція інтегрованого ФТЕ перетворювача:

1 – загартоване скло; 2 – ФЕП; 3 – ТЕГ; 4 – теплообмінник; 5 – вентилятор; 6 – термопаста

В якості перетворювачів обрано кремнієві монокристалічні ФЕП, електричні параметри яких визначались на основі даних зі специфікації фотоелектричного модуля LG 330N1C NeON2 A5 335W CELLO 12BB, та низькотемпературний ТЕГ на основі  $Bi_2Te_3$  марки MTG 2,6-0,8-263T1S. Прийнято, що площа ФЕП дорівнює площі ТЕГ та становить  $5 \times 5 \text{ см}^2$ .

Енергетичні параметри ФТЕ перетворювача визначено на основі параметрів ФЕП та ТЕГ, що електрично розв'язані на різні навантаження. Електрична потужність та ефективність ФТЕ перетворювача:

$$P_{\text{ФТЕ}} = P_{\text{ФЕП}} + P_{\text{ТЕГ}},$$

$$\eta_{\text{ФТЕ}} = \frac{P_{\text{ФТЕ}}}{P_{\text{H}}}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{ФЕП}}, P_{\text{ТЕГ}}$  – потужності ФЕП та ТЕГ у складі ФТЕ перетворювача відповідно, Вт;  
 $P_{\text{H}}$  – потужність потоку сонячного випромінювання, що надходить на поверхню ФЕП:

$$P_{\text{H}} = X I_t S, \quad (2)$$

де  $I_t$  – густина потоку сонячного випромінювання,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $X$  – ступінь концентрації випромінювання;  
 $S$  – площа поверхні перетворювача,  $\text{м}^2$ .

Ефективність ФЕП у складі ФТЕ перетворювача:

$$\eta_{\text{ФЕП}} = \frac{U_{\text{mpp}} I_{\text{mpp}}}{P_{\text{H}}}, \quad (3)$$

де  $U_{\text{mpp}}$  – напруга та струм фотоелектричного перетворювача у точці максимальної потужності, В;  
 $I_{\text{mpp}}$  – струм ФЕП у точці максимальної потужності, А.

Сонячне випромінювання, що надходить на поверхню ФТЕ перетворювача, перетворюється у ФЕП на електрику та тепло:

$$P_{\text{H}} = P_{\text{ФЕП}} + Q, \quad (4)$$

де  $Q$  – тепловий потік, що виділяється ФЕП, який частково втрачається в оточуюче середовище з поверхні ФЕП шляхом конвекції та випромінюванням, а частково передається шляхом теплопровідності до гарячої сторони ТЕГ.

Теплова потужність, що надходить на гарячу сторону ТЕГ, включає в себе джоулеві тепловиділення ФЕП і ТЕГ, а також поглинену частину спектра сонячного випромінювання  $Q_{\text{рад}}$ , що не використовується для вироблення електроенергії ФЕП, за вирахуванням теплових втрат із поверхні ФЕП у оточуюче середовище  $Q_{\text{пов втр}}$ :

$$Q_{\text{H ТЕГ}} = I_{\text{mpp}}^2 r_{\text{ФЕП}} + I_{\text{ТЕГ}}^2 r_{\text{ТЕГ}} + Q_{\text{рад}} - Q_{\text{пов втр}}, \quad (5)$$

де  $r_{\text{ФЕП}}, r_{\text{ТЕГ}}$  – внутрішні опори ФЕП та ТЕГ відповідно, Ом.

Частина переданого тепла перетворюється ТЕГ на електрику. Ефективність термоелектричної частини ФТЕ перетворювача:

$$\eta_{\text{ТЕГ}} = \frac{U_{\text{ТЕГ}} I_{\text{ТЕГ}}}{Q_{\text{H ТЕГ}}}, \quad (6)$$

де  $U_{\text{ТЕГ}}, I_{\text{ТЕГ}}$  – напруга та струм, що генерує ТЕГ у режимі максимальної потужності.

Приріст ефективності, який називається індексом енергетичної доцільності (Energetic Convenience Index,  $EnCI$ ), внаслідок термоелектричної гібридизації:

$$EnCI = \eta_{\text{ФТЕ}} - \eta_{\text{ФЕП охол}}, \quad (7)$$

де  $\eta_{\text{ФЕП охол}}$  – ефективність ФЕП, що працює в аналогічних умовах опромінення та має систему охолодження.

Теплова схема інтегрованого ФТЕ перетворювача представлена на рис. 2. Враховано розігрів ФЕП сонячним випромінюванням за вирахуванням оптичних втрат на відбиття сонячної радіації від поверхонь скляного покриття та ФЕП:

$$Q_{\text{рад}} = P_H(1 - \rho_{\text{ск}})(1 - \rho_{\text{ФЕП}}), \quad (8)$$

де  $\rho_{\text{ск}}$  – коефіцієнт відбиття скляного покриття;

$\rho_{\text{ФЕП}}$  – коефіцієнт відбиття від поверхні ФЕП.

Частина тепла ФЕП  $Q_{\text{пов втр}}$  втрачається через скляне покриття в оточуюче середовище шляхом конвекції та випромінювання. Термічний опір скляного покриття  $R_5$  враховує теплопередачу теплопровідністю крізь шар скла, а термічні опори  $R_6$  та  $R_7$  – втрати тепла прозорим покриттям з температурою  $T_{\text{ск}}$  шляхом конвекції та випромінювання в оточуюче середовище:

$$\begin{aligned} Q_{\text{конв}} &= \alpha_{\text{конв}} S(T_{\text{ск}} - T_{\text{ос}}), \\ Q_{\text{випр}} &= \varepsilon \sigma_0 S(T_{\text{ск}}^4 - T_{\text{ос}}^4), \end{aligned} \quad (9)$$

де  $T_{\text{ос}}$  – температура оточуючого середовища, К;

$\varepsilon$  – ступінь чорноти скла відносно власного довгохвильового випромінювання;

$\sigma_0$  – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\alpha_{\text{конв}}$  – коефіцієнт конвективної тепловіддачі з поверхні скляного покриття [14], Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_{\text{конв}} = 5,7 + 3,8v, \quad (10)$$

де  $v$  – швидкість вітру, м/с.

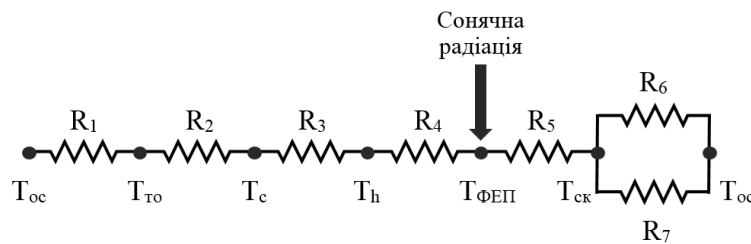


Рис. 2. Теплова схема ФТЕ перетворювача

Інша частина тепла відводиться від ФЕП до гарячої сторони ТЕГ. Контактний термічний опір  $R_4$  враховує наявність шару термопасти між ФЕП та ТЕГ, а опір  $R_2$  – між ТЕГ та теплообмінником. Термічний опір самого ТЕГ враховано блоком  $R_3$ . Відведення тепла від холодної сторони ТЕГ забезпечує ребристий мідний радіатор з примусовою системою охолодження. Його термічний опір  $R_1$  розраховано за допомогою програми Kyootherm.

Описані теплові та електричні процеси покладено в основу імітаційної моделі ФТЕ перетворювача, яку розроблено в програмному середовищі Matlab/Simulink (рис. 3).

ФЕП та ТЕГ в моделі мають окремі електричні навантаження, показання амперметрів та вольтметрів використовуються для обчислення генерованої перетворювачами потужності (блоки Р) і визначення на її основі ефективності перетворення енергії (блоки ККД). В стандартному блоці сонячного елемента передбачено врахування нагріву тільки за рахунок джоулевого тепла, тому для опису процесів теплообміну з оточуючим середовищем до теплового порту цього блоку підключено теплову мережу, що враховує скляне покриття на поверхні ФЕП (блоки теплопровідності та термічної маси), конвективний та радіаційний теплообмін, а також нагрівання ФЕП від надходження сонячної радіації. Приєднання гарячих спайв ТЕГ (порт В) до тильної сторони ФЕП здійснюється через блок теплопровідності, що описує термоконтактний опір і враховує наявність шару термопасти. До холодних спайв ТЕГ (порт А) підключено теплову мережу, в якій задано термічний опір по холодній стороні ТЕГ, що становить 0,159 К/Вт і складається з опорів ребристого радіатора з примусовим охолодженням та шару термопасти. В моделі інтегрованого перетворювача дана система охолодження задана блоками теплопровідності та термічної маси. Зовнішні умови експлуатації ФТЕ перетворювача задаються блоками надходження сонячної радіації та температури оточуючого середовища.

Інтегровані перетворювачі показують кращі характеристики в умовах концентрованого сонячного випромінювання, оскільки збільшення ступеня концентрації призводить до зростання максимальної вихідної потужності гібридної ФТЕ системи [10-12]. З іншого боку, температурний діапазон роботи кремнієвих ФЕП обмежений верхньою границею 120 °С, після чого спостерігається

зниження генерованої потужності (рис. 4), що узгоджується з літературними даними [15, 16]. Встановлено, що температура ФЕП при роботі у складі ФТЕ перетворювача перевищує 120 °С при досягненні ступеня концентрації сонячного випромінювання 50 крат, отже моделювання роботи ФТЕ перетворювача проводилося при ступенях концентрації від 1 до 50 крат. Потужність та ефективність перетворювачів визначались для режимів максимальної потужності, які задавались узгодженими навантаженнями окремо для ФЕП та ТЕГ. Для визначення індексу енергетичної доцільності також проводилося моделювання роботи окремого ФЕП із системою охолодження при аналогічних умовах освітленості.

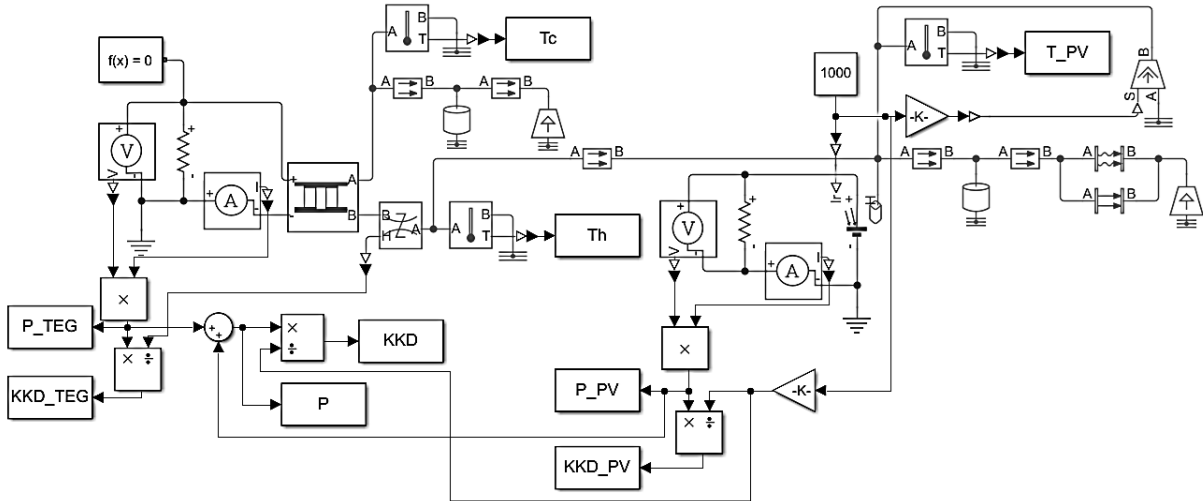


Рис. 3. Модель ФТЕ перетворювача

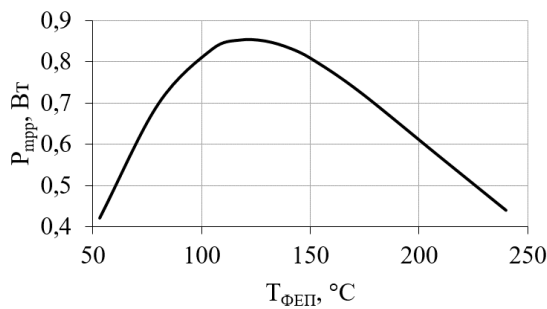


Рис. 4. Залежність генерованої потужності ФЕП від температури

Моделювання роботи ФТЕ перетворювача показало, що при збільшенні ступеня концентрації сонячного випромінювання від 1 до 10 крат спостерігається стрімке зростання генерованої потужності ФЕП як у складі ФТЕ перетворювача, так і працюючого окремо (рис. 5). Перевищення потужності окремо працюючого ФЕП над потужністю ФЕП у складі ФТЕ перетворювача пояснюється кращим тепловідводом через відсутність теплового опору ТЕГ між ФЕП та системою охолодження, і як наслідок, більш низькими температурами експлуатації в однакових умовах опромінення (рис. 6).

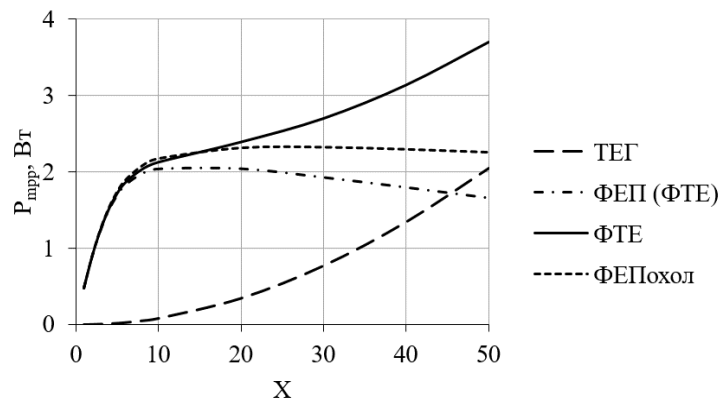


Рис. 5. Залежність максимальної потужності перетворювачів від ступеня концентрації сонячного випромінювання

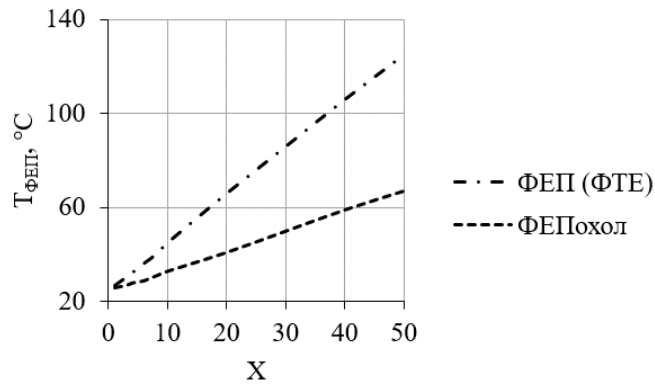


Рис. 6. Температура ФЭП в умовах слабоконцентрованого сонячного випромінювання

При  $X=1 \div 10$  вклад ТЕГ у генеровану потужність ФТЕ перетворювача є незначним і зростає від 0,12 % до 3,79 %, що обумовлено низькими значеннями різниці температур між гарячою та холодною сторонами ТЕГ, яка не перевищує 10 °С (рис. 7).

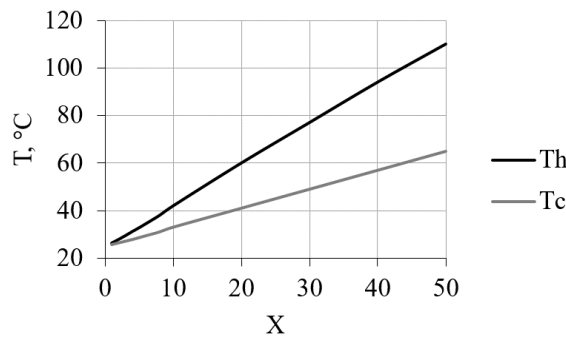


Рис. 7. Залежність температур холодної та гарячої сторін модуля ТЕГ від ступеня концентрації

Починаючи від  $X=10$  темпи зростання генерованої потужності ФЭП спадають: при роботі ФЭП у складі ФТЕ перетворювача максимальна генерація спостерігається при  $X=16$ , а для окремо працюючого ФЭП – при  $X = 25$ . Подальший спад генерації ФЭП можна пояснити збільшенням втрат на омичному опорі ФЭП зі зростанням генерованого струму (джоулевими втратами). Натомість ТЕГ, температурні умови роботи якого покращуються із збільшенням ступеня концентрації (рис. 7), починаючи від  $X=10$  демонструє все більший внесок в генеровану потужність, який при  $X=46$  дорівнює 50%, а при  $X=50$  становить 55%. Це призводить до збільшення потужності ФТЕ перетворювача у 1,6 разів у порівнянні з окремо працюючим ФЭП.

Зростання ступеня концентрації випромінювання призводить до зменшення ефективності ФЭП та ФТЕ перетворювача та збільшення ефективності ТЕГ (рис. 8). Енергетичний вигравш від інтегрування ТЕГ з ФЭП спостерігається при  $X>16$ , про що свідчать позитивні значення індексу енергетичної доцільності (рис. 9). Найбільше значення  $EnCI$  в досліджуваному діапазоні ступенів концентрації становить 1,15% і спостерігається при  $X=50$  крат.

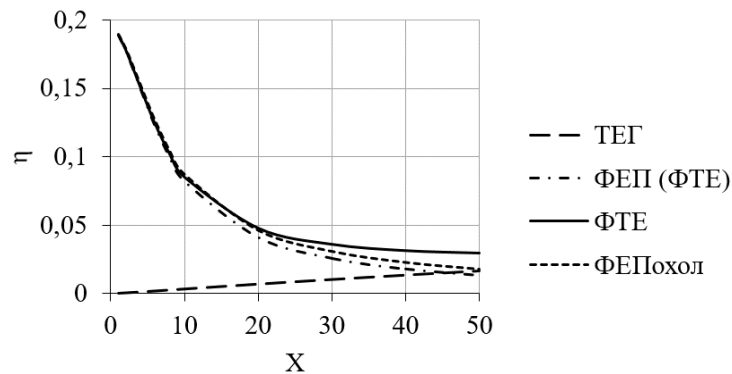


Рис. 8. Вплив ступеня концентрації випромінювання на ефективність перетворювачів

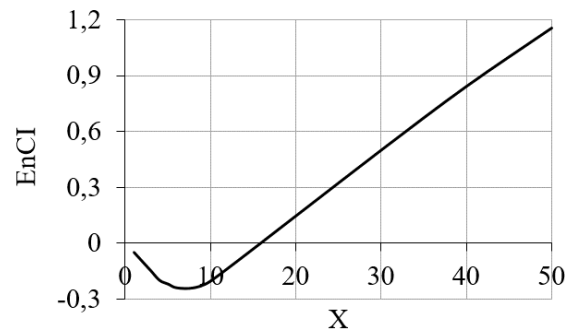


Рис. 9. Індекс енергетичної доцільності ФТЕ перетворювача

Отже, при збільшенні кратності концентрації сонячного випромінювання від 1 до 50 потужність ФТЕ перетворювача зростає у 7,8 разів і становить 3,7 Вт, а ефективність падає у 6,4 рази до 2,9%.

Аналіз отриманих результатів показує, що для підвищення ефективності ФТЕ перетворювача слід збільшувати різницю температур між гарячою та холодною сторонами ТЕГ, що за умови незмінних параметрів системи охолодження є можливим при зростанні кратності концентрації сонячного випромінювання. Втім, збільшення інтенсивності світлового потоку, що спрямовується на поверхню ФТЕ перетворювача, призводить до зростання фотоструму та температури ФЕП, і як наслідок, до збільшення втрат корисної електричної потужності і падіння ефективності фотоелектричної генерації. Отже, для підвищення ефективності ФТЕ перетворювачів доцільним є застосування ФЕП з меншим в порівнянні зі звичайними серійними кремнієвими елементами внутрішнім послідовним опором, що дозволить мінімізувати джоулеві втрати при високих інтенсивностях сонячного опромінення, та виготовлених з напівпровідників, які забезпечать більшу термостабільність параметрів, тобто, менший температурний коефіцієнт максимальної потужності. Прикладом таких ФЕП можуть бути спеціалізовані концентраторні сонячні елементи на основі твердих розчинів сполук  $A^3B^5$ , зокрема, арсеніду галію, допустима температура роботи яких сягає 200 °С.

#### Висновки

1. В програмному середовищі Matlab/Simulink розроблено імітаційну модель інтегрованого ФТЕ перетворювача для дослідження його електричних й теплових параметрів та режимів роботи. Створена модель дозволяє шляхом зміни вхідних даних у відповідних блоках варіювати тип ФЕП та ТЕГ, значення термоконтактного опору, параметри системи охолодження ТЕГ, надходження сонячної радіації, тощо.

2. Проведено моделювання роботи інтегрованого ФТЕ перетворювача, що складається з ФЕП на основі монокристалічного кремнію та низькотемпературного ТЕГ з  $Bi_2Te_3$ , у визначеному діапазоні ступенів концентрації сонячного випромінювання від 1 до 50 крат, який обмежується температурою ФЕП. Встановлено, що при кратностях концентрації потоку сонячного випромінювання до 10 основний внесок у збільшення генерованої потужності інтегрованого перетворювача дає ФЕП, а внесок ТЕГ не перевищує 3,79%, що пояснюється низькими значеннями різниці температур між холодними та гарячими спаями (до 10 °С). При подальшому збільшенні ступенів концентрації випромінювання спостерігається стрімке зростання потужності ФТЕ перетворювача зумовлене вкладом ТЕГ, який при  $X=50$  становить 55%.

3. Показано, що при збільшенні кратності концентрації від 1 до 50 потужність ФТЕ перетворювача зростає у 7,8 разів. Визначено, що енергетичний вигравш від інтегрування ТЕГ з ФЕП спостерігається при  $X>16$ , а найбільше значення  $EnCI$  в досліджуваному діапазоні ступенів концентрації становить 1,15%.

4. Для підвищення ефективності ФТЕ перетворювача за умови незмінних параметрів системи охолодження запропоновано збільшувати кратність концентрації сонячного випромінювання, застосовуючи при цьому ФЕП зі зменшеним внутрішнім послідовним опором та вищою, аніж у кремнієвих, температурною стабільністю параметрів.

#### Список використаної літератури

1. Lorenzi B. Practical development of efficient thermoelectric – photovoltaic hybrid systems based on wide-gap solar cells / B. Lorenzi, P. Mariani, A. Reale, A. Di Carlo, G. Chen, D. Narducci // Applied Energy. – 2021. – № 300. – 117343-10 p. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117343
2. Dupré O. Thermal Behavior of Photovoltaic Devices / O. Dupré. – Springer International Publishing AG. – 2017. – 103 p. doi:10.1007/978-3-319-49457-9
3. Li G. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation / Li G., S. Shittu, T.M.O. Diallo, M. Yu, X. Zhao, J. Ji // Energy. – 2018. – №158. – P. 41-58. doi:10.1016/j.energy.2018.06.



4. Zulakmal M.Y. Solar photovoltaic/thermal-thermoelectric generator performance review / M.Y. Zulakmal, A. Fudholi, N.S. Rukman, S. Mat, H.Y. Chan, K. Sopian // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 012120-11 p. doi:10.1088/1755-1315/268/1/012120
5. Vorobiev Yu. Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion / Yu. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez, P. Vorobiev, L. Bulat // Solar Energy. – 2006. - № 80. – P. 170–176. doi:10.1016/j.solener.2005.04.022
6. Kraemer D. Photovoltaic-thermoelectric hybrid systems: A general optimization methodology / D. Kraemer, L. Hu, A. Muto, X. Chen, G. Chen, M. Chiesa // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 92, Issue 24. – 243503-3 p. doi:10.1063/1.2947591
7. Beeri O. Hybrid photovoltaic-thermoelectric system for concentrated solar energy conversion: Experimental realization and modeling O. Beeri, O. Rotem, E. Hazan, E.A. Katz, A. Braun, Y. Gelbstein // Journal of Applied Physics. – 2015. - № 118. – 115104-8 p. doi:10.1063/1.4931428
8. Zhang J. Enhanced performance of photovoltaic–thermoelectric coupling devices with thermal interface materials / J. Zhang, H. Zhai, Z. Wu, Y. Wang, H. Xie, M. Zhang // Energy Reports. – 2020. - № 6. – P. 116–122. doi:10.1016/j.egyr.2019.12.001
9. Lorenzi B. Theoretical efficiency of hybrid solar thermoelectric-photovoltaic generators / B. Lorenzi, G. Chen // Journal of Applied Physics. – 2018. - № 124. – 024501-11 p. doi:10.1063/1.5022569
10. Xu X. Performance Analysis of a Combination System of Concentrating Photovoltaic / Thermal Collector and Thermoelectric Generators / X. Xu, S. Zhou, M.M. Meyers, B.G. Sammakia, B.T. Murray // Journal of Electronic Packaging. – 2014. – Vol. 136, Issue 4. – 041004-7 p. doi:10.1115/1.4028060
11. Lamba R. Solar driven concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid system: Numerical analysis and optimization / R. Lamba, S.C. Kaushik // Energy Conversion and Management. – 2018. – № 170. – P. 34–49. doi:10.1016/j.enconman.2018.05.048
12. Yin E. Optimal design method for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system / E. Yin, Q. Li, Y. Xuan // Applied Energy. – 2018. - № 226. – P. 320–329. doi:10.1016/j.apenergy.2018.05.127
13. Verma V. Complementary performance enhancement of PV energy system through thermoelectric generation / V. Verma, A. Kane, B. Singh // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 58. – P. 1017–1026. doi:10.1016/j.rser.2015.12.212
14. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 910 p.
15. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
16. Колтун М.М. Солнечные элементы / М.М. Колтун. – М.: Наука, 1987. - 192 с.

#### References

1. Lorenzi B., Mariani P., Reale A., Di Carlo A., Chen G., Narducci D. Practical development of efficient thermoelectric – photovoltaic hybrid systems based on wide-gap solar cells. Applied Energy, 2021, no. 300, 117343-10 p. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117343
2. Dupré O. Thermal Behavior of Photovoltaic Devices. Springer International Publ., 2017. 103 p. doi:10.1007/978-3-319-49457-9
3. Li G., Shittu S., Diallo T.M.O., Yu M., Zhao X., Ji J. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation. Energy, 2018, no. 158, pp. 41-58. doi:10.1016/j.energy.2018.06.
4. Zulakmal M.Y., Fudholi A., Rukman N.S., Mat S., Chan H.Y., Sopian K. Solar photovoltaic/thermal-thermoelectric generator performance review. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, 012120-11 p. doi:10.1088/1755-1315/268/1/012120
5. Vorobiev Yu., Gonzalez-Hernandez J., Vorobiev P., Bulat L. Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. Solar Energy, 2006, no. 80, pp. 170–176. doi:10.1016/j.solener.2005.04.022
6. Kraemer D., Hu L., Muto A., Chen X., Chen G., Chiesa M. Photovoltaic-thermoelectric hybrid systems: A general optimization methodology. Applied Physics Letters, 2008, Vol. 92, Issue 24, 243503-3 p. doi:10.1063/1.2947591
7. Beeri O., Rotem O., Hazan E., Katz E.A., Braun A., Gelbstein Y. Hybrid photovoltaic-thermoelectric system for concentrated solar energy conversion: Experimental realization and modeling. Journal of Applied Physics, 2015, no. 118, 115104-8 p. doi:10.1063/1.4931428
8. Zhang J., Zhai H., Wu Z., Wang Y., Xie H., Zhang M. Enhanced performance of photovoltaic–thermoelectric coupling devices with thermal interface materials. Energy Reports, 2020, no. 6, pp. 116–122. doi:10.1016/j.egyr.2019.12.001
9. Lorenzi B., Chen G. Theoretical efficiency of hybrid solar thermoelectric-photovoltaic generators. Journal of Applied Physics, 2018, no. 124, 024501-11 p. doi:10.1063/1.5022569

10. Xu X., Zhou S., Meyers M.M., Sammakia B.G., Murray B.T. Performance Analysis of a Combination System of Concentrating Photovoltaic / Thermal Collector and Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Packaging*, 2014, Vol. 136, Issue 4, 041004-7 p. doi:10.1115/1.4028060
11. Lamba R., Kaushik S.C. Solar driven concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid system: Numerical analysis and optimization. *Energy Conversion and Management*, 2018, no. 170, pp. 34–49. doi:10.1016/j.enconman.2018.05.048
12. Yin E., Li Q., Xuan Y. Optimal design method for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system. *Applied Energy*, 2018, no. 226, pp. 320–329. doi:10.1016/j.apenergy.2018.05.127
13. Verma V., Kane A., Singh B. Complementary performance enhancement of PV energy system through thermoelectric generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, no. 58, pp. 1017–1026. doi:10.1016/j.rser.2015.12.212
14. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.
15. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rummyantsev V.D. *Fotoelektricheskoye preobrazovaniye kontsentrirrovannogo solnechnogo izlucheniya*. Leningrad: Nauka Publ., 1989. 310 p.
16. Koltun M.M. *Solnechnyye elementy*. Moscow: Nauka Publ., 1987. 192 p.