

PACS: 88.05.Ec; 88.05.Lg

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

Л.О. Яворська, Я.С. Яворський, Л.І. Никируй, Р.С. Яворський

Проектування та оптимізація гібридних тонкоплівкових PV-TE систем перетворення енергії. Огляд

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна, lilia.katanova@pnu.edu.ua

Сучасний розвиток відновлюваних джерел енергії вимагає вдосконалення технологій перетворення енергії для сталого енергозабезпечення. Одним із найбільш перспективних методів отримання електроенергії є використання фотоелектричних (PV) перетворювачів, що дозволяють безпосередньо перетворювати сонячне випромінювання в електрику. Проте одним з їх недоліків є те, що вони нагріваються, в результаті чого зменшується потужність. У даній статті проведений огляд гібридних PV-TE систем, що складаються з фотоелектричних модулів, термоелектричних генераторів і проміжного теплопровідного шару. Такі системи дозволяють не тільки охолоджувати фотоелектричні елементи, але й додатково генерувати електроенергію за рахунок ефекту Зеебека, який перетворює температурний градієнт у різницю потенціалів. Проаналізовано основні конструктивні підходи, зокрема тандемні конфігурації з тепловою концентрацією та системи зі спектральним розділенням. Виявлено та розглянуто основні виклики для подальшої оптимізації системи. Зокрема, це проблеми термічного управління, обмежена ефективність комерційних термоелектричних матеріалів, електрична інтеграція двох компонентів із принципово різними ВАХ.

Ключові слова: відновлювальна енергетика, фотоелектричний модуль (PV), термоелектричний генератор (TEG), гібридні системи, фото-термоелектричні (PV-TE) системи.

Подано до редакції 04.03.2025; прийнято до друку 29.12.2025.

Зміст

Вступ

- I. Порівняльний аналіз матеріалів і конфігурацій PV-TE систем**
- II. Принцип дії та ключові характеристики компонентів системи**
- III. Конструкції та конфігурації гібридних PV-TE систем**
 - 3.1 Класична конструкція з тепловим концентратором**
 - 3.2 Системи зі спектральним розділенням**
 - 3.3 Методи охолодження холодної сторони TEG**
- IV. Проблеми термічного регулювання**
 - 4.1 Обмеження матеріалів та інтерфейсів**
 - 4.2 Проблеми електричної оптимізації та вартості**

Висновки

Вступ

Сучасний розвиток відновлюваних джерел енергії відіграє ключову роль у забезпеченні сталого

енергопостачання та зменшенні впливу на довкілля [1]. Одним із найбільш перспективних методів отримання електроенергії є використання фотоелектричних (PV) перетворювачів, що

дозволяють безпосередньо перетворювати сонячне випромінювання в електрику. Найбільш поширеним є використання кремнієвих сонячних панелей з плоскими фотоелектричними елементами [2-4].

Однак сонячні панелі, що базуються на одному напівпровідниковому матеріалі, працюють лише в обмеженому діапазоні спектра сонячного світла, що знижує їхню ефективність [5,6]. Одним із способів часткового вирішення цієї проблеми є застосування гетероструктур, які складаються з кількох шарів фотоелектричних елементів із різною забороненою зоною. Це дозволяє більш ефективно використовувати спектр сонячного випромінювання. Теоретично такі структури можуть досягати ефективності до 86,8% за умови використання необмеженої кількості шарів [7]. Втім, на практиці додавання кожного нового шару збільшує складність та вартість технології, тому сучасні гетероструктурні сонячні елементи зазвичай містять 3-4 шари й досягають максимальної ефективності близько 45 %.

Температура робочої поверхні фотоелектричних модулів безпосередньо впливає на їхню ефективність. Підвищення температури призводить до зміни ширини забороненої зони напівпровідника, зниження напруги холостого ходу та збільшення рекомбінаційних втрат, що загалом зменшує вихідну потужність системи [8]. Високі температури також сприяють деградації матеріалів, з яких виготовлені сонячні панелі, що скорочує їх термін експлуатації [9,10]. Тому пошук ефективних методів охолодження фотоелектричних елементів є одним із важливих напрямів розвитку сонячної енергетики.

Одним із перспективних підходів до розв'язання цієї проблеми є використання гібридних фото-термоелектричних (PV-TE) систем. Такі системи дозволяють не тільки охолоджувати фотоелектричні елементи, але й додатково генерувати електроенергію за рахунок ефекту Зеебека, який перетворює температурний градієнт у різницю потенціалів [11,12]. Термоелектричні генератори (ТЕГ) здатні ефективно працювати в умовах високих температур,

використовуючи надлишкове тепло, що утворюється внаслідок поглинання сонячного випромінювання [13,14].

Гібридні PV-TE системи складаються з фотоелектричних модулів, термоелектричних генераторів і проміжного теплопровідного шару, який забезпечує ефективне передавання тепла між компонентами системи [15,16]. Застосування таких конструкцій дає змогу досягти підвищення загального коефіцієнта корисної дії (ККД) системи на 5-15%, залежно від умов експлуатації та типу використаних матеріалів [17,18]. Дослідження показали, що використання ТЕ-елементів у PV-системах може також продовжити термін служби фотоелектричних модулів завдяки стабілізації їхньої робочої температури [19].

В останні роки було проведено численні експериментальні та теоретичні дослідження гібридних PV-TE систем із використанням різних методів моделювання, зокрема числового аналізу методом скінченних елементів (FEM) у програмному забезпеченні COMSOL [20]. Такі дослідження дозволяють визначити оптимальні параметри системи та оцінити її ефективність у реальних умовах експлуатації [21,22].

Розвиток матеріалознавства також сприяє підвищенню ефективності термоелектричних генераторів. Зокрема, використання нових наноструктурованих матеріалів, таких як сплави на основі Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , SiGe , сприяє підвищенню термоелектричного коефіцієнта корисної дії (ZT), що робить такі генератори ще ефективнішими [23-26].

Таким чином, інтеграція термоелектричних модулів у фотоелектричні системи є перспективним напрямом підвищення ефективності сонячної енергетики. У цій статті розглядаються сучасні підходи до вдосконалення PV-TE систем, їхній фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, а також результати експериментальних і теоретичних досліджень у цій галузі.

Таблиця 1.

Фотоелектричні матеріали та їх ефективності з джерелами

Матеріал	Типовий ККД (лабораторний)	Комерційний ККД	Джерело
Монокристалічний кремній (c-Si)	26–27%	19–22%	NREL Efficiency Chart [27]
Полікристалічний кремній	22–24%	16–19%	Razykov et al., Solar Energy (2011) [2]
Аморфний кремній (a-Si)	10–12%	6–9%	Parida et al., Renewable Energy Rev. (2011) [4]
CdTe тонкоплівкові елементи	22–23%	17–19%	Fedenko et al. (2025) [10]
CIGS (Cu(In,Ga)Se_2)	23–24%	15–19%	Razykov et al. (2011) [2]
GaAs (III–V)	29–30%	≈25%	Nelson, <i>Physics of Solar Cells</i> (2003) [5]
Багатоперехідні III–V (InGaP/InGaAs/Ge)	40–47%	30–35%	NREL Efficiency Chart [27]
Перовскітні елементи (Perovskites)	25–27%	~20%	Green, <i>Third Generation Photovoltaics</i> (2006) [6]

I. Порівняльний аналіз матеріалів і конфігурацій PV-TE систем

У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики основних фотоелектричних матеріалів, що застосовуються у сучасних сонячних елементах, із зазначенням лабораторних та комерційних значень коефіцієнта корисної дії. Дані свідчать, що найбільші лабораторні ККД характерні для багатоперехідних III–V структур на основі InGaP/InGaAs/Ge, де

ефективність перевищує 40%, однак у промислових умовах ці значення знижуються до 30–35% через технологічні та економічні обмеження [27]. Монокристалічні кремнієві елементи залишаються найпоширенішими у комерційному секторі завдяки оптимальному співвідношенню ефективності, стабільності та вартості, демонструючи ККД на рівні 19–22% [2]. Полікристалічний та аморфний кремній поступаються за ефективністю, проте широко застосовуються у малопотужних і бюджетних системах [4]. Тонкоплівкові технології CdTe та CIGS

Таблиця 2.

Термоелектричні матеріали, ZT і ефективність із джерелами

Матеріал TE	ZT (типове)	Орієнтовна ефективність	Джерело
Bi_2Te_3 (n/p)	0.9–1.2	4–6%	Goldsmid, <i>Introduction to Thermoelectricity</i> (2010) [28]
Bi_2Te_3 – Sb_2Te_3 сплави	1.1–1.4	5–7%	Tritt, Vining — Nat. Mater. (2009) [24]
PbTe	1.0–1.5	6–8%	Snyder & Toberer, Nat. Mater. (2008) [25]
SiGe сплави	0.5–1.0	3–5%	DiSalvo, Science (1999) [29]
SnSe (p-тип)	1.5–2.6	8–10%	Dresselhaus et al., Adv. Mater. (2007) [26]
Органічні / полімерні TE матеріали	0.1–0.3	<1%	Zhu et al. (2019) [31]
Наноструктуровані Bi_2Te_3	1.5–2.0	7–9%	Kraemer et al., Nat. Mater. (2011) [22]

Таблиця 3.

Ефективність гібридних PV/TE систем залежно від конфігурації та умов роботи

Конфігурація PV/TE системи	Тип матеріалу TE	Умови охолодження	Приріст загальної ефективності системи	Джерело
Тандемна класична PV–TE система	Bi_2Te_3	Пасивне (радіатор)	+3–7%	Meng, Li (2014) [18]
PV–TE з повітряним охолодженням холодної сторони	Bi_2Te_3	Активне повітряне	+5–10%	Omer & Infield (2000) [19]
PV–TE з водяним або рідинним охолодженням	Bi_2Te_3	Активне рідинне	+8–12%	Garud & Lee (2022) [17]
PV–TE з тепловою концентрацією (мідна пластина / збільшена площа TE)	Bi_2Te_3 – Sb_2Te_3	Пасивне	+6–10%	Zhang & Xuan (2019) [32]
PV–TE зі спектральним розділенням (розділення ІЧ та видимого світла)	PbTe або Bi_2Te_3	Пасивне + оптичний фільтр	+10–15%	Ju et al. (2012) [33]
PV–TE з відбиваючим компонентом та фокусуванням світла	Bi_2Te_3	Пасивне	+12–18%	Yang et al. (2023) [34]
PV–TE під сонячними концентраторами (CPV–TE)	III–V + Bi_2Te_3 або SnSe	Високотемпературне	до +20%	Faddouli et al. (2024) [26]
PV–TE з високим ZT (наноструктуровані Bi_2Te_3 або SnSe)	SnSe, Bi_2Te_3 nano	Активне/пасивне	15–22% (моделювання)	Kraemer et al. (2011) [22]

демонструють конкурентні характеристики, зокрема стабільність при підвищених температурах і добру спектральну чутливість, що робить їх перспективними для інтеграції у гібридні PV-TE системи [2,10]. Окремо слід відзначити перовскітні сонячні елементи, які за короткий період продемонстрували стрімке зростання лабораторного ККД до 25–27%, однак їх широке застосування стримується проблемами довговічності та деградації [6].

Таблиця 2 узагальнює основні термоелектричні матеріали, що використовуються або розглядаються для створення термоелектричних генераторів у складі гібридних систем, разом із типовими значеннями термоелектричної добротності ZT та орієнтовної ефективності перетворення теплової енергії. Найбільш поширеними у низькотемпературному діапазоні залишаються сплави на основі Bi_2Te_3 та $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{--Sb}_2\text{Te}_3$, які при $ZT \approx 1$ забезпечують ефективність у межах 4–7% і добре сумісні з температурними режимами фотоелектричних модулів [28]. Матеріали на основі PbTe та SiGe ефективніші у середньо- та високотемпературних застосуваннях, однак їх використання в класичних PV-TE системах є обмеженим через температурне невідповідність [25,29]. Перспективними вважаються SnSe та наноструктуровані Bi_2Te_3 , які завдяки

зниженню теплопровідності та оптимізації електронних властивостей демонструють підвищені значення ZT до 2 і більше, що потенційно дозволяє отримати ефективність термоелектричного перетворення на рівні 8–10% [22,26]. Разом з тим такі матеріали потребують складних технологій синтезу та поки що залишаються об'єктом інтенсивних наукових досліджень.

У таблиці 3 представлено порівняльний аналіз ефективності гібридних фотоелектрично-термоелектричних систем залежно від конфігурації, типу термоелектричного матеріалу та умов охолодження. Наведені результати показують, що класичні тандемні PV-TE системи з пасивним охолодженням забезпечують помірний приріст загального ККД на рівні 3–7% за рахунок утилізації теплових втрат фотоелектричного елемента [18,30]. Застосування активного повітряного або рідинного охолодження холодної сторони ТЕГ дозволяє підтримувати вищий температурний градієнт, що збільшує приріст ефективності системи до 8–12% [17,19]. Найбільший потенціал демонструють системи зі спектральним розділенням, тепловою концентрацією та оптичним фокусуванням, де сумарний приріст ККД може перевищувати 15%, а в деяких модельних роботах – досягати 20% і більше [32,33]. Однак такі рішення потребують складної оптичної та теплової інфраструктури, що обмежує їх практичне впровадження і підкреслює необхідність оптимального компромісу між ефективністю, складністю та економічною доцільністю гібридних PV-TE систем.

II. Принцип дії та ключові характеристики компонентів системи

Ефективність гібридної фотоелектрично-термоелектричної (PV-TE) системи є складною функцією, що визначається характеристиками її окремих компонентів. Глибоке розуміння фізичних принципів, що лежать в основі їхньої роботи, а також їхніх сильних та слабких сторін, є ключовим для аналізу, моделювання та оптимізації гібридної системи [35].

Основою будь-якого сонячного модуля є фотоелектричний перетворювач – напівпровідниковий пристрій, що працює на базі внутрішнього фотоелектричного ефекту в структурі з р-п переходом (рис. 1). Процес перетворення енергії починається, коли фотон сонячного випромінювання з енергією, що перевищує ширину забороненої зони напівпровідника (E_g), поглинається матеріалом. Це поглинання призводить до генерації пари вільних носіїв заряду – електрона та дірки. Внутрішнє електричне поле р-п переходу, що існує в збідненій області, просторово розділяє ці носії заряду до того, як вони встигнуть рекомбінувати: електрони спрямовуються в n-область, а дірки – в р-область. Такий спрямований рух створює фотогенерований струм (I_{ph}) та різницю потенціалів на виході елемента. Залежно від технології, сонячні елементи бувають кількох типів: від найбільш поширених та економічно доцільних кристалічних кремнієвих (c-Si) до тонкоплівкових, наприклад, на основі аморфного кремнію (a-Si), та високоефективних багато-перехідних (MJ) гетероструктурних елементів, що складаються з кількох шарів напівпровідників із різною шириною забороненої зони (напр., InGaP/InGaAs/Ge). Останні дозволяють більш повно використовувати сонячний спектр, досягаючи ККД близько 35% [27].

Вихідна потужність фотоелектричного елемента розраховується з ВАХ фотоелектричного елемента:

$$P_{PV} = \max (J_{PV} V_{PV}) \quad (1)$$

де J_{PV} є фотоелектричний струм, V_{PV} є фотоелектрична напруга.

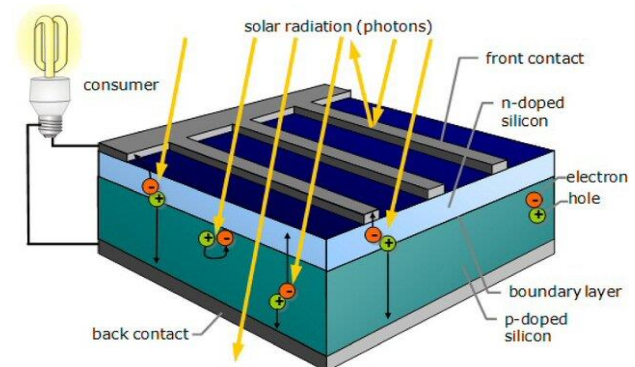


Рис. 1. Принцип роботи фотоелектричного елемента [39].

Фотоелектрична ефективність виражається так:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{A_{GG}} \quad (2)$$

де A_{GG} – освітлена площа, G – інтенсивність сонячного випромінювання.

Фундаментальною проблемою всіх PV-елементів є значні втрати енергії через термалізацію. Фотони з енергією, меншою за E_g , проходять крізь матеріал без поглинання, тоді як енергія фотонів, що значно перевищує E_g , лише частково йде на генерацію пари носіїв, а її надлишок швидко розсіюється у вигляді теплових коливань кристалічної ґратки (фононів). Внаслідок цього значна частина поглинутого випромінювання не перетворюється на електрику, а деградує в тепло (Q_h), нагріваючи робочу поверхню. Підвищення температури є ключовим негативним фактором, що знижує продуктивність: воно призводить до зміни ширини забороненої зони, збільшення внутрішнього струму витоку, що спричиняє падіння напруги холостого ходу (V_{oc}), та зростання швидкості рекомбінації носіїв, що зменшує загальну вихідну потужність. Саме ця проблема перетворює тепло з небажаного фактора на цінний ресурс для другого компонента гібридної системи – термоелектричного генератора (TEG).

ТЕГ є твердотільним пристроєм, який перетворює теплову енергію безпосередньо в електричну за допомогою ефекту Зеебека [28]. Його модуль складається з великої кількості напівпровідникових «ніжок» n- та p-типу, з'єднаних електрично послідовно металевими електродами. Коли між сторонами модуля створюється градієнт температур ($T_h > T_c$), носії заряду (електрони в n-типі та дірки в p-типі) починають інтенсивніше дифундувати від гарячої сторони до холодної. Це накопичення зарядів на холодній стороні створює різницю потенціалів, яка генерує струм Зеебека ($I_{Seebeck}$) у зовнішньому колі (рис. 2).

Ефективність термоелектричного генератора визначається як відношення виробленої електричної потужності до кількості тепла, що проходить через гарячий спай (Q_h):

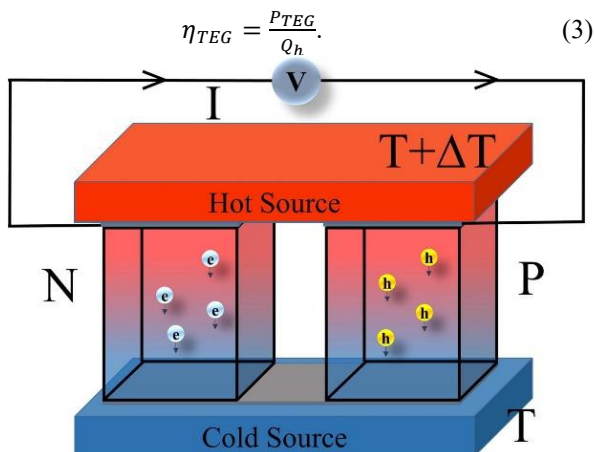


Рис. 2. Термоелектричний модуль [34].

Максимальна ефективність TEG залежить від середньої робочої температури

($T_{avg} = \frac{T_h + T_c}{2}$) та безрозмірної термоелектричної добротності матеріалу

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa}, \quad (4)$$

де σ – електропровідність, κ – теплопровідність. Формула для максимальної ефективності має вигляд:

$$\eta_{TEG, max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT_{avg}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{avg}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (5)$$

Ефективність цього процесу для конкретного матеріалу описується безрозмірним коефіцієнтом термоелектричної добротності (ZT), що залежить від коефіцієнта Зеебека (S), питомого електричного опору (ρ) та теплопровідності (κ). Для високої ефективності матеріал повинен мати високий коефіцієнт Зеебека для генерації більшої напруги, низький електричний опір для мінімізації втрат Джоуля та, що критично важливо, низьку теплопровідність для підтримки максимального градієнта температур між гарячою та холодною сторонами. Найбільш поширеними матеріалами для TEG є халькогенідні сплави на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) та сурми (Sb_2Te_3) [28]. У гібридній системі TEG виконує подвійну функцію: генерує додаткову потужність (PTE) з відпрацьованого тепла фотоелемента та одночасно активно охолоджує його. Це охолодження відбувається не тільки за рахунок пасивного тепловідведення, але й завдяки ефекту Пельтьє – явищу, оберненому до ефекту Зеебека, яке полягає в поглинанні тепла на гарячому спайі TEG при проходженні через нього струму [29]. Таким чином, обидва компоненти системи працюють у симбіозі: TEG підвищує продуктивність PV-елемента, стабілізуючи його температуру, і водночас перетворює невикористану теплову енергію на додаткову електрику, підвищуючи загальну ефективність перетворення сонячної енергії.

Загальна ефективність PV-TE системи ($\eta_{заг}$) визначається як сума ефективностей PV-елемента (η_{PV}) та додаткової ефективності, забезпеченої TEG. Якщо TEG використовує тепло, що пройшло через PV-елемент, то частина енергії, яка могла б бути перетворена PV-елементом, вже використана. Більш точна формула враховує, що TEG перетворює частину тієї енергії, яка не була перетворена PV-елементом. Одна з поширених моделей:

$$\eta_{заг} = \eta_{PV} + \eta_{TEG} \cdot (1 - \eta_{PV} - \alpha_{opt}), \quad (6)$$

де α_{opt} – частка оптичних втрат (відбиття, неповне поглинання), а $(1 - \eta_{PV} - \alpha_{opt})$ представляє теплову енергію, доступну для TEG.

Інша спрощена модель, що часто використовується:

$$\eta_{заг} = \eta_{PV} + \eta_{TEG} \cdot \beta \quad (7)$$

де β – частка тепла від PV, що надходить на TEG.

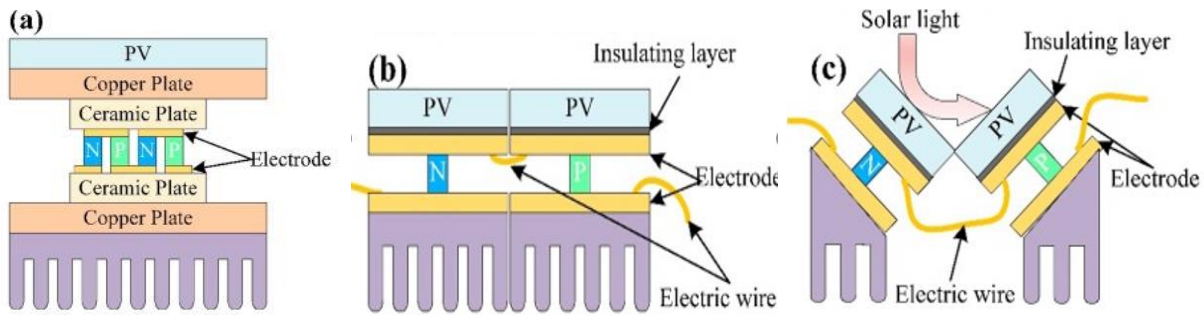


Рис. 3. Схеми (а) звичайної системи PV-TE, (б) системи PV-TE без керамічних пластин, (с) системи PV-TE з V-подібною канавкою. [32].

III. Конструкції та конфігурації гібридних PV-TE систем

Проектування ефективної гібридної PV-TE системи вимагає ретельного розгляду та оптимізації оптичних, теплових та електричних аспектів. Залежно від способу використання сонячного спектра, теплового контакту між елементами та загальної архітектури, існуючі системи можна класифікувати за кількома основними підходами, кожен з яких спрямований на вирішення певних проблем та підвищення загальної ефективності [37]. Найбільш поширеним підходом є тандемна конфігурація, де фотоелектричний елемент розміщується безпосередньо над термоелектричним генератором. У такій архітектурі PV-елемент поглинає видиму та ультрафіолетову частини спектра для генерації електрики, а невикористана сонячна енергія, що перетворилася на тепло, передається на гарячу сторону ТЕГ для додаткової генерації електроенергії.

3.1. Класична конструкція з тепловим концентратором

Типова гібридна система, показана на Рис. 3(а), є багатошаровою структурою [32]. Конструкція складається: з PV-панелі, що поглинає сонячне випромінювання, керамічної пластини, що є електричним ізолятором, гарячої сторони, холодної сторони ТЕГ та радіатора (тепловідвід) для розсіювання тепла у навколишнє середовище.

Класичний термоелектричний (ТЕ) модуль складається з керамічної пластини, електродів і термоелектричних «ніжок». Площа термоелемента є меншою за площу фотоелемента, що пояснюється застосуванням методу теплової концентрації. Поглинена фотоелектричним елементом сонячна енергія частково перетворюється на електроенергію, а частково – на теплову енергію, яка надалі використовується ТЕ-модулем. Для рівномірного розподілу температури по фотоелементу використовують мідну пластинку. Застосування такого методу дозволяє знизити вартість системи, зменшуючи термоелектричний модуль.

Основна мета запропонованого в цій статті інтегрованої конструкції – спростити структуру PV-TE для покращення теплопередачі. Як показано на рис. 3(а), класична система PV-TE потребує мідної

пластини з високою теплопровідністю для забезпечення теплової концентрації. Однак, оскільки металеві електроди термоелектричних ніжок також мають високу теплопровідність, вони можуть виконувати функцію термоконцентратора.

Оскільки, металеві електроди термоелектричних ніжок мають також високу теплопровідність, то була запропонована нова конструкція, в якій збільшили площу ТЕ і забрали мідну та керамічну пластини (рис. 3(б)). Електричне з'єднання в ТЕ між ланками p- та r-типів здійснювали за допомогою електричного дроту.

Важливим чинником у системі PV-TE є використання відбитого сонячного випромінювання. Проте у разі використання вище представлені конструкції (рис. 3(б)), фотони, які відбиватимуться від фотоелемента будуть розсіюватися в навколишнє середовище, що значно знизить ефективність системи. Але якщо між двома сусідніми фотоелементами є певний кут, фотони, відбиті одним елементом, можуть бути поглинені іншим [32].

На основі цього принципу в системі PV-TE використовується V-подібна канавка, що покращує поглинання сонячного випромінювання, як показано на рис. 3(с). Для подальшого пояснення ефективності V-подібної структури в роботі наводиться рівняння, яке описує процес багаторазового поглинання відбитого світла.

$$a_m = a_f + a_f(1 - a_f) \quad (8)$$

де a_m – ефективність поглинання V-подібної канавки, а a_f – ефективність поглинання плоскої поверхні. З цього рівняння можна побачити, що канавка V-типу може покращити поглинання сонячного світла.

3.2. Системи зі спектральним розділенням

Загалом існує два основних типи гібридних систем PV-TEG із спектральним розділенням. Перший не має відбивача, а фотоелектричні модулі та ТЕГ розташовані паралельно один одному, як показано на рис. 4 [38]. Фотоелектричні модулі в основному поглинають ультрафіолетове та видиме світло, а інфрачервоне випромінювання передається для нагрівання верхньої сторони ТЕГ, таким чином створюючи різницю температур між холодними сторонами. Другий тип має відбиваючий компонент, як показано на рис. 5 [38]. Цей тип гібридного пристрою розміщує фотоелектричні модулі та ТЕГ перпендикулярно, а сонячне випромінювання

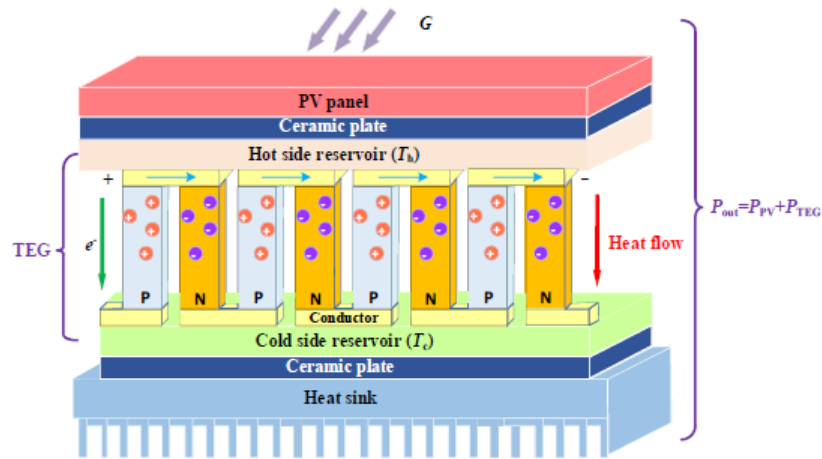


Рис. 4. Структура типового гібридного модуля [38].

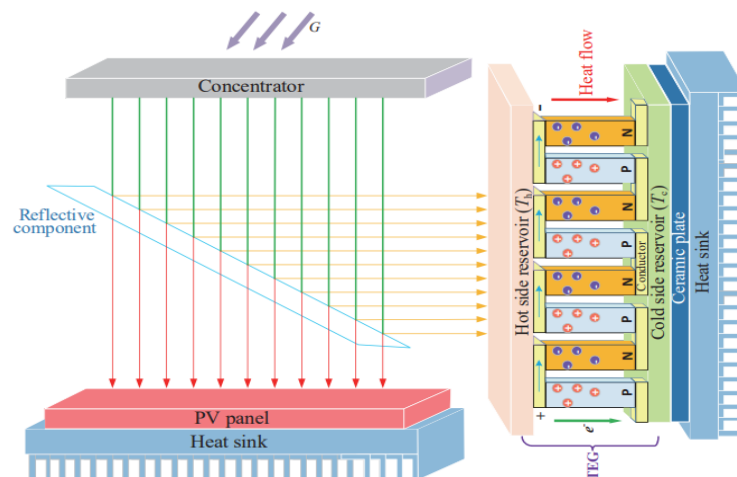


Рис. 5. Фото-термоелектричний прилад з відбиваючим компонентом [38].

відводиться відбивачем відповідно до граничної довжини хвилі [34], яка відбивається в ТЕГ, коли випромінювання перевищує довжину хвилі відсічення; інакше він надходить до фотоелектричного модуля.

На рисунку 4 зображено типову конструкцію комбінованого гібридного PV-ТЕГ модуля, де фотоелектричні панелі та ТЕГ з'єднані між собою паралельно або послідовно [39]. Якщо з'єднати, фотоелектричні та термоелектричні елементи між собою послідовно, то отримаємо найменші втрати потужності, тому що при такому з'єднанні мала кількість силових електронних перемикачів. Для того щоб забезпечити різницю температур, то фотоелектричну панель розміщуємо на одній поверхні ТЕГ, а тепловідвід розміщуємо на іншій стороні. ТЕГ не тільки збирає відпрацьоване тепло та знижує температуру фотоелектричних модулів, але й ефективно покращує ефективність використання сонячного спектру.

Схема, що представлена на рис. 4 є досить простенькою і не потребує складної оптичної конструкції. Вищу ефективність в такій системі можна досягнути в умовах розсіяного світла та сонячного світла з низькою інтенсивністю. Друга схема має відбиваючий компонент і тому для ефективного фокусування світла потрібна достатня

кількість прямого сонячного світла (рис. 5). Таким чином, перший тип широко використовується при проектуванні та дослідженні МРРТ для гібридних систем [40], і більшість методів МРРТ, згаданих у цій статті, використовують саме цей тип.

У реальних умовах сонячні фотоелектричні (ФЕ) системи зазнають втрат від часткового затінення (PSC), яке виникає через дерева, хмари або будівлі. При такому затінненні затемнені ФЕ панелі починають поводитися як споживачі енергії, а не як її виробники. Вони функціонують як діоди під зворотною напругою, що призводить до значного падіння напруги, споживання великої кількості енергії та виділення надмірного тепла. Це явище називається «ефектом гарячої точки». Сильні гарячі точки можуть незворотно пошкодити цілі сонячні модулі [33].

3.3. Методи охолодження холодної сторони ТЕГ

Як показано на рис. 6, для системи PV-ТЕГ використано фотоелектричний елемент на основі аморфного кремнію [38]. У цьому дослідженні застосовано фотоелемент, вироблений компанією Qiangsheng Solar Ltd., з площею $30 \times 30 \text{ мм}^2$. Нижня сторона фотоелемента має добрі ізоляційні властивості, що дозволяє безпосередньо прикріпити його до термоелектричного (ТЕ) електрода за допомогою термопровідного клею.

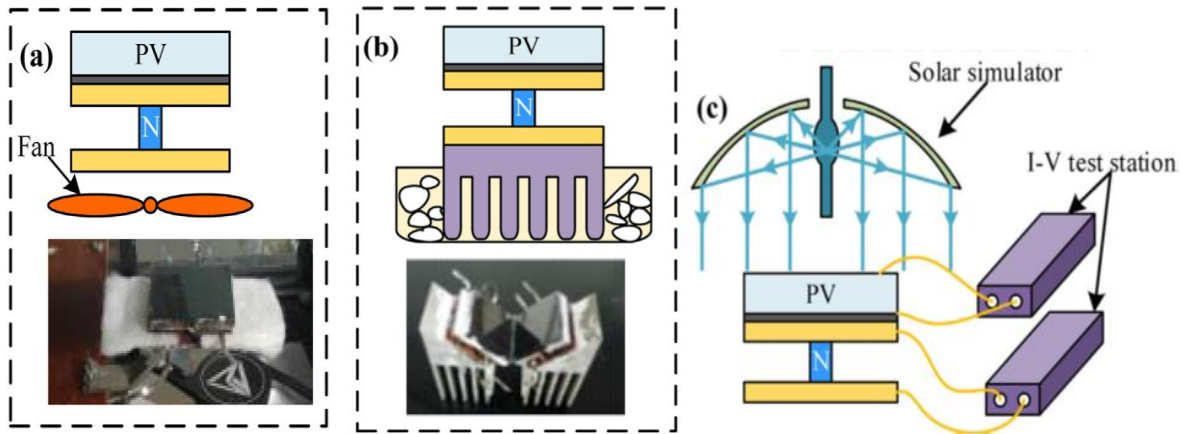


Рис. 6. Схематична діаграма (а) системи PV-TE з системою повітряного охолодження, (б) системи PV-TE з канавкою V-типу та (с) усієї тестової системи [38].

Для виготовлення TE-модуля використано термоелектричний злиток n-типу (Bi_2Te_3) від компанії Wangu Electronic Technology Ltd. Зі злитка формували термоелектричні ніжки за допомогою методу дрової електроерозійної обробки. Електроди TE виконані з міді, а їх з'єднання з ніжками TE здійснено за допомогою електропровідного клею Cu-211, компанії Erbond.

Додатково на електроди TE наклеєно чотири нікелеві листи з використанням того ж електропровідного клею Cu-211. Вони виконують роль з'єднання електродів TE з електричною тестовою системою. Для покращення теплопередачі фотоелектричний елемент закріплено на верхньому електроді TE за допомогою термопровідного клею.

У дослідженні аналізується вплив двох методів охолодження: водяного та повітряного. Як показано на рис. 6(а), у системі повітряного охолодження використовується вентилятор для забезпечення потоку повітря через нижню частину TE-модуля. У системі водяного охолодження для охолодження TE застосовується суміш льоду та води, а між PV-TE системою та охолоджувальною рідиною розміщується алюмінієвий радіатор (рис. 6 (b)).

Для вимірювання ефективності системи PV-TE використовується сонячний симулятор (94023A) та випробувальна станція I-V (PVIV-1A), розроблені корпорацією Newport (рис. 6(с)). У ході експерименту точність вимірювання напруги становить $\pm 0,02\%$, а точність вимірювання струму – $0,23\%$ [41].

Для спрощення експерименту для розрахунку вихідної потужності використовується напруга холостого ходу модуля TE, слід зазначити, що цей метод також може усунути помилку, спричинену електричним контактним опором провідного клею. Використовуючи технологію зварювання, щоб з'єднати ніжки TE з електродами, потрібно виготовити прес-форму. Хоча вартість прес-форми можна не враховувати при масовому виробництві, вона надто дорога для виготовлення тестових зразків у лабораторії. Тому струмопровідний клей використовується для з'єднання TE ніжок і TE електродів. Провідний клей буде мати великий електричний контактний опір. Щоб уникнути помилки, спричиненої цим електричним опором,

вихідна потужність обчислюється лише за напругою холостого ходу модуля TE [41]:

$$P_{TE} = \frac{A_{TE} V_{TE}^2}{4\rho H_{TE}} \quad (9)$$

де ρ питомий електричний опір матеріалу TE, V_{TE} – напруга холостого ходу модуля TE, A_{TE} та H_{TE} – площа та висота гілки TE.

IV. Проблеми термічного регулювання

Ефективність роботи термоелектричного генератора (ТЕГ) безпосередньо визначається величиною градієнта температур (ΔT) між його гарячою та холодною сторонами, тому контроль теплових потоків є одним із ключових завдань у гібридних PV/TEG-системах. У тандемній структурі, що складається з фотоелектричного елемента, проміжного клею або ізоляційного шару, термоелектричного модуля та радіатора, кожен додатковий шар вносить певний термічний опір. Це призводить до того, що частина тепла затримується у фотоелементі, спричиняючи його перегрів, тоді як на гарячу сторону ТЕГ надходить знижений тепловий потік. У результаті знижується ефективність обох компонентів системи [42].

Проблеми ускладнює і недосконалість систем охолодження. Пасивні радіатори є технологічно простими та дешевими, проте їхня ефективність часто виявляється недостатньою для розсіювання великих теплових потоків в умовах високої сонячної іррадіації та підвищених температур навколишнього середовища. Натомість активні охолоджувальні системи (з використанням вентиляторів або рідинних насосів) забезпечують значно кращий відвід тепла, проте мають істотний недолік – споживання додаткової електроенергії. Це знижує загальний енергетичний приріст системи та водночас ускладнює конструкцію, збільшуючи вартість і ризик відмови.

4.1. Обмеження матеріалів та інтерфейсів

Довговічність і продуктивність гібридної системи значною мірою залежать від вибору матеріалів та

якості міжшарових контактів. Серед основних проблем виділяється обмежена ефективність сучасних термоелектричних матеріалів. Незважаючи на багаторічні дослідження, коефіцієнт добротності (ZT) комерційних сполук, зокрема Bi_2Te_3 , утримується на рівні близько 1, що обмежує максимальний коефіцієнт корисної дії термоелектричного перетворення кількома відсотками. Це ставить під сумнів економічну доцільність використання ТЕГ у поєднанні з фотоелектричними модулями у масштабних сонячних установках [43].

Додатковою проблемою є термомеханічна деградація. Оскільки PV-елементи, термоелектричні модулі та тепловідвідні елементи (наприклад, радіатори) виготовляються з матеріалів із різними коефіцієнтами теплового розширення (кремій, кераміка, мідь, алюміній), регулярні цикли нагрівання вдень і охолодження вночі формують значні механічні напруження на межах шарів. Це з часом призводить до мікротріщин, розшарування та деградації з'єднань.

Окремо варто відзначити й проблеми термоінтерфейсних матеріалів (ТИМ), які використовуються для зниження теплового опору між шарами. Традиційні термопасти та клеї мають тенденцію до висихання і деградації під дією підвищених температур та циклічного теплового навантаження, що значно погіршує теплопередачу. Таким чином, стабільність і довговічність термоінтерфейсів є критичним чинником для забезпечення надійності роботи гібридних систем.

4.2. Проблеми електричної оптимізації та вартості

Суттєвим викликом для PV/TEG-комплексів є електрична інтеграція двох компонентів із принципово різними вольт-амперними характеристиками та точками максимальної потужності (MPP). Фотоелектричні елементи демонструють залежність продуктивності від інтенсивності освітлення, тоді як ефективність ТЕГ визначається передусім тепловим градієнтом. Унаслідок цього при простому послідовному або паралельному з'єднанні системи один з компонентів завжди працює поза своїм оптимальним режимом. Для забезпечення ефективної роботи потрібні спеціалізовані контролери з двома незалежними алгоритмами MPPT, що значно ускладнює структуру та збільшує вартість.

Додатковим фактором є висока вартість термоелектричних модулів, яка на сьогоdnішньому етапі розвитку технологій робить їх застосування у фотоелектричних установках економічно обмеженим. Додатковий приріст виробленої енергії часто не компенсує зростання початкових витрат на обладнання, що знижує інвестиційну привабливість гібридних рішень.

У науковій літературі обговорюються різні стратегії подолання зазначених обмежень. До них належать пошук і створення нових термоелектричних матеріалів з підвищеним коефіцієнтом ZT (наприклад, на основі наноструктурованих сполук або топологічних ізоляторів), застосування

високоєфективних систем тепловідведення, зокрема теплових трубок та мікроканалних охолоджувальних структур, а також розробка наностабільних термоінтерфейсів із високою теплопровідністю. Окрему увагу приділяють і створенню інтелектуальних алгоритмів енергетичного керування, здатних одночасно оптимізувати роботу PV та ТЕГ, що дозволяє мінімізувати втрати та покращити інтегральний ККД гібридної системи.

Висновки

Проведений аналіз показує, що гібридні фотоелектрично-термоелектричні системи здатні частково вирішити одну з ключових проблем сонячної енергетики – неефективне використання теплової складової сонячного випромінювання. Значна частина енергії, яка не перетворюється у фотоелектричному елементі на електричну, неминуче переходить у тепло та погіршує робочі характеристики модуля. Інтеграція термоелектричного генератора дозволяє перетворити цей негативний чинник на додаткове джерело електроенергії та одночасно стабілізувати температурний режим фотоелемента. Аналіз матеріалів свідчить, що найбільш раціональними для таких систем є тонкоплівкові фотоелектричні технології, які демонструють меншу чутливість до температури, а застосування перевірених термоелектричних матеріалів на основі Bi_2Te_3 забезпечує передбачуваний і відтворюваний приріст ефективності.

Разом із тим встановлено, що ефективність PV-ТЕ системи визначається не стільки окремими параметрами PV- або ТЕ-модуля, скільки якістю їх теплової та електричної інтеграції. Навіть помірне зниження термічних опорів між шарами та покращення відведення тепла з холодної сторони термоелектричного генератора можуть суттєво вплинути на сумарну вихідну потужність системи. Більш складні конфігурації, зокрема зі спектральним розділенням або концентрацією випромінювання, відкривають шлях до вищих значень ККД, однак потребують значніших ресурсів для реалізації. У цьому контексті гібридні PV-ТЕ системи доцільно розглядати як перспективне рішення для автономних та спеціалізованих застосувань, тоді як подальший прогрес у цій галузі напряму пов'язаний із розвитком ефективніших термоелектричних матеріалів, стабільних термоінтерфейсів і адаптивних схем керування енергією.

Яворська Л.О. – аспірантка кафедри фізики та астрономії;

Яворський Я.С. – к.ф.-м.н., завідувач науковими лабораторіями кафедри фізики та астрономії

Никируй Л.І. – к.ф.-м.н., проф., завідувач кафедри фізики та астрономії;

Яворський Р.С. – д-р.ф., доцент кафедри фізики та астрономії.

- [1] G. Wisz, L. Nykyruy, V. Yakubiv, I. Hryhoruk, & R. Yavorskyi, *Impact of advanced research on development of renewable energy policy: case of Ukraine*. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 8(4), 2367-2384 (2018); <https://doi.org/10.20508/ijrer.v8i4.8688.g7538>.
- [2] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, *Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects*, Solar energy, 85(8), 1580 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>.
- [3] G. Wisz, P. Sawicka-Chudy, M. Sibiński, D. Płoch, M. Bester, M. Cholewa, J. Woźny, R. Yavorskyi, L. Nykyruy, & M. Ruszala, *TiO₂/CuO/Cu₂O Photovoltaic Nanostructures Prepared by DC Reactive Magnetron Sputtering*. Nanomaterials, 12(8), 1328 (2022); <https://doi.org/10.3390/nano12081328>.
- [4] B. Parida, S. Iniyar, R. Goic, *A review of solar photovoltaic technologies*, Renewable Sustainable Energy Rev. 15, 1625 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>.
- [5] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, (Imperial College Press, London, 2003).
- [6] M. A. Green, *Third Generation Photovoltaics*, (Advanced Solar Energy Conversion. Springer, 2006).
- [7] A. De Vos, H. Pauwels, *On the thermodynamic limit of photovoltaic energy conversion*, Appl. Phys. 25, 119 (1981).
- [8] G. Wisz, P. Sawicka-Chudy, A. Wal, M. Sibiński, P. Potera, R. Yavorskyi, L. Nykyruy, D. Płoch, M. Bester, M. Cholewa, & O.M. Chernikova, *Structure Defects and Photovoltaic Properties of TiO₂:ZnO/CuO Solar Cells Prepared by Reactive DC Magnetron Sputtering*. Applied Sciences, 13(6), 3613 (2023); <https://doi.org/10.3390/app13063613>.
- [9] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance*, Solar Energy, 83 (5), 614 (2009); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
- [10] V.Y. Fedenko, R.S. Yavorskyi, A.I. Kashuba, B.S. Dzundza, *Spectral and Temperature Properties of Solar Cells Based on Cadmium Telluride Thin-Films*. Physics and Chemistry of Solid State, 26(3), 658(2025); <https://doi.org/10.15330/pcss.26.3.658-665>.
- [11] L. Bell, *Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems*, Science, 321(5895), 1457(2008); <https://doi.org/10.1126/science.1158899>.
- [12] M. Maksymuk, B. Dzundza, O. Matkivsky, I. Horichok, R. Shneck, Z. Dashevsky, *Development of the high performance thermoelectric uncouple based on Bi₂Te₃ compounds*, J. Power Sources, 530, 231301 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231301>.
- [13] G. Chen. *Nanoscale Energy Transport and Conversion: A Parallel Treatment of Electrons, Molecules, Phonons, and Photons* (Oxford: Oxford University Press, 2005).
- [14] V. Prokopiv, L. Nykyruy, O. Voznyak, B. Dzundza, I. Horichok, Y. Yavorskyi, T. Mazur, *The thermoelectric solar generator*, Physics and Chemistry of Solid State, 18(3), 372 (2017).
- [15] K.S. Garud, M.Y. Lee, *Thermodynamic, environmental and economic analyses of photovoltaic/thermal-thermoelectric generator system using single and hybrid particle nanofluids*, Energy, 255, 124515 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124515>.
- [16] S. Mamykin, B. Dzundza, R. Shneck, L.M. Vikhor, & Z. Dashevsky, *Development of Solar Energy Systems Based on High Performance Bulk and Film Thermoelectric Modules*. Journal of Thermoelectricity, (1), 60-80 (2025); <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-1-60-80>.
- [17] F. Meng, Q. Li, H. Zhang, *Optimization and analysis of a hybrid photovoltaic-thermoelectric system*, Energy Convers. Manage, 88, 321 (2014).
- [18] T. Seetawan, S. Pothisatt, P. Nithipattana, J. Laoungboun, B. Limsuwan, K. Jaroenjittichai, V. Siripul, *Thermoelectric power generation and applications*, J. Phys.: Conf. Ser., 747, 012015 (2016).
- [19] S.A. Omer, D.G. Infield, *Design and thermal analysis of a combined PV-TE system*, Appl. Therm. Eng., 20, 1159 (2000).
- [20] COMSOL Inc. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. Stockholm: COMSOL Inc., 2021.
- [21] H. Lee. *Thermoelectrics: Design and Materials*. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- [22] D. Kraemer, B. Poudel, H.-P. Feng, J. C. Caylor, B. Yu, X. Yan, Y. Ma, X. Wang, D. F. B. L. C., *Solar thermoelectric power generation using nanostructured materials*, Nat. Mater., 10, 532 (2011).
- [23] C.B. Vining, *An inconvenient truth about thermoelectrics*, Nat. Mater., 8, 83 (2009).
- [24] G.J. Snyder, E.S. Toberer, *Complex thermoelectric materials*, Nat. Mater., 7, 105 (2008).
- [25] M.S. Dresselhaus, G. Chen, Z.F. Ren, G.P. Zhang, G.P. Chen, S.D. W.K., *New directions for low-dimensional thermoelectric materials*, Adv. Mater., 19, 399 (2007). <https://doi.org/10.1002/adma.200600527>.
- [26] M. Zebbarjadi, K. Esfarjani, A. Shakouri, Z.F. Ren, E. P. T. D. J., *Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications*, Energy Environ. Sci., 5, 5147 (2012). <https://doi.org/10.1039/C1EE02497C>.
- [27] NREL, *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>.
- [28] H.J. Goldsmid. *Introduction to thermoelectricity* (Springer, Berlin, 2010).
- [29] F.J. DiSalvo, *Thermoelectric cooling and power generation*, Science, 285(5428), 703 (1999); <https://doi.org/10.1126/science.285.5428.703>.
- [30] L. Nykyruy, O. Zamurujeva, R. Yavorskyi, B. Naidych, Y. Yavorskyi, O. Novosad, S. Fedosov. *Perspective thermoelectric materials and technologies*, Naukovi notatki, 71, 202-209 (2021); <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.29>.

- [31] X. Zhu, Y. Yu, F. Li, *A review on thermoelectric energy harvesting from asphalt pavement: Configuration, performance and future*, Constr. Build. Mater., 228, 116818 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116818>.
- [32] J. Zhang, Y. Xuan, *An integrated design of the photovoltaic-thermoelectric hybrid system*, Solar Energy, 177, 293 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.012>.
- [33] B. Yang, J. Wang, X. Zhang, G. C. J. C. W. Z., *Comprehensive overview of meta-heuristic algorithm applications on PV cell parameter identification*, Energy Convers. Manage., 208, 112595 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112595>.
- [34] X. Ju, Z. Wang, G. Flamant, L. H. X. J. W. Z., *Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic thermoelectric hybrid system*, Solar Energy, 86(6), 1941 (2012); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.024>.
- [35] A. Faddouli, M. Hajji, S. Fadili, B. Hartiti, H. Labrim, A. Habchi, *A comprehensive review of solar, thermal, photovoltaic, and thermoelectric hybrid systems for heating and power generation*, Int. J. Green Energy, 21(2), 413 (2024); <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2196340>.
- [36] M.A.B. Siddique, D. Zhao, A.U. Rehman, *Emerging maximum power point control algorithms for PV system: review, challenges and future trends*, Electr. Eng., 1 (2025); <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03002-0>.
- [37] P. D. Raut, V. V. Shukla, S. S. Joshi, *Recent developments in photovoltaic-thermoelectric combined system*, Int. J. Eng. Technol., 7(4), 2619 (2018); <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.18.12709>.
- [38] B. Yang, R. Xie, J. Duan, J. Wang, *State-of-the-art review of MPPT techniques for hybrid PV-TEG systems: Modeling, methodologies, and perspectives*, Global Energy Interconn., 6(5), 567 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.10.005>.
- [39] A. Ruzaimi, S. Shafie, W. Z. W. Hassan, N. Azis, M. Effendy Ya'acob, E. Elianddy, W. Aimrun, *Performance analysis of thermoelectric generator implemented on non-uniform heat distribution of photovoltaic module*, Energy Rep., 7, 2379 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.029>.
- [40] D.T. Cotfas, P.A. Cotfas, S. Mahmoudinezhad, B. F. P. A. S., *Critical factors and parameters for hybrid photovoltaic-thermoelectric systems; review*, Appl. Therm. Eng., 215, 118977 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118977>.
- [41] L. Liu, X. S. Lu, M. L. Shi, Y. K. Ma, J. Y. Shi, *Modeling of flat-plate solar thermoelectric generators for space applications*, Solar Energy, 132, 386 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.028>.
- [42] R.K. Rajamony, *Cutting-edge cooling techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review*, Interactions, 246(1), 41 (2025); <https://doi.org/10.1007/s10751-025-02267-y>.
- [43] R. Knura, *Achieving high thermoelectric conversion efficiency in Bi₂Te₃-based stepwise legs through bandgap tuning and chemical potential engineering*, Dalton Trans., 53(1), 123 (2024); <https://doi.org/10.1039/D3DT03061J>.

L.O. Yavorska, Y.S. Yavorskyi, L.I. Nykyruy, R.S. Yavorskyi

Design and Optimization of Hybrid Thin-Film PV-TE Energy Conversion Systems

Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, lilia.katanova@pnu.edu.ua

The modern development of renewable energy sources requires the improvement of energy conversion technologies for sustainable power supply. One of the most promising methods of generating electricity is the use of photovoltaic (PV) converters, which directly transform solar radiation into electricity. However, a major drawback of PV modules is their tendency to heat up, which leads to a decrease in output power. This paper presents a review of hybrid PV-TE systems consisting of photovoltaic modules, thermoelectric generators, and an intermediate heat-conducting layer. Such systems not only allow cooling of the photovoltaic cells but also provide additional electricity generation through the Seebeck effect, which converts a temperature gradient into a potential difference. The main design approaches were analyzed, in particular tandem configurations with thermal concentration and systems with spectral splitting. The main challenges for further system optimization were identified and reviewed. Specifically, these include issues of thermal management, the limited efficiency of commercial thermoelectric materials, and the electrical integration of two components with fundamentally different current-voltage characteristics (CVCs).

Keywords: renewable energy, photovoltaic module (PV), thermoelectric generator (TEG), hybrid systems, photovoltaic–thermoelectric systems (PV–TE).