

Р.Г. Черкез^{1,2}, О.М., Порубаний², С.О. Томко²

Актуальні тенденції у термоелектричних технологіях, перспективи терморегулювання

¹Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Чернівці, Україна;

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, porubanyi.oleksandr@chnu.edu.ua

В цій статті представлено огляд сучасних тенденцій у термоелектричних технологіях, що охоплює різноманітні аспекти застосування та розвитку матеріалів. Зокрема, розглянуто можливості інтеграції термоелектричних елементів у сонячні панелі для підвищення ефективності перетворення енергії. Особливу увагу приділено термоелектричним тепловим насосам, які демонструють значний потенціал для використання в умовах низьких температур. Проаналізовано системи теплового менеджменту для батарей електричних транспортних засобів, що забезпечують стабільну роботу за різних умов експлуатації. Крім того, розглянуто сучасні матеріали для термоелектричних охолоджувальних систем, включаючи наноструктуровані та композитні матеріали. Нарешті, досліджено перспективи розвитку носимих термоелементів, які можуть забезпечити ефективне охолодження та терморегуляцію при мінімальному використанні матеріалів. Узагальнені дані підкреслюють важливість інновацій у термоелектриці для підвищення енергоефективності та комфорту в сучасних технологіях.

Ключові слова: Термоелектричні матеріали, енергоефективність, сонячні панелі, теплові насоси, терморегуляція, тепловий менеджмент, електричні транспортні засоби, охолоджувальні системи.

Подано до редакції 16.01.2025; прийнято до друку 16.09. 2025.

Зміст

Вступ

- I. Сучасний стан та перспективи гібридизації сонячних панелей та термоелектрики
- II. Сучасний стан та перспективи розвитку термоелектричних теплових насосів
- III. Системи теплового менеджменту акумуляторних батарей електричних транспортних засобів

Conclusion

Вступ

Термоелектричні технології відіграють дедалі важливішу роль у розвитку сучасних енергетичних систем завдяки своїй здатності перетворювати теплову енергію на електричну та навпаки. Це робить їх незамінними в контексті зростаючого попиту на енергоефективні рішення, особливо в галузях, що прагнуть знизити викиди вуглецю та оптимізувати використання енергії. Термоелектричні матеріали

знаходять застосування в широкому спектрі технологій, від сонячних панелей до систем теплового менеджменту в електричних транспортних засобах. Сонячні панелі, інтегровані з термоелектричними елементами, можуть значно підвищити загальну ефективність збору енергії, перетворюючи частину відхідного тепла на електрику. Це відкриває нові можливості для підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії, особливо в умовах глобального потепління.

Термоелектричні теплові насоси представляють собою інноваційні системи, що дозволяють забезпечувати ефективне теплове регулювання в різних сферах, від побутових систем опалення до охолодження в промислових умовах. Сучасні дослідження зосереджені на вдосконаленні матеріалів та оптимізації конструкції таких насосів для досягнення максимального коефіцієнта корисної дії (ККД). Особливу увагу слід приділити системам теплового менеджменту батарей електричних транспортних засобів, оскільки ці системи є критичними для забезпечення безпеки та продовження терміну служби батарей. Термоелектричні модулі в таких системах дозволяють ефективно керувати температурними коливаннями, що забезпечує стабільність роботи батарей.

I. Сучасний стан та перспективи гібридизації сонячних панелей та термоелектрики

Сучасні термоелектричні матеріали та технології продовжують еволюціонувати, надаючи нові можливості для поліпшення енергоефективності та

створення більш стійких енергетичних систем. Сонячні фотоелектричні (ФЕ) системи є важливою складовою переходу до відновлюваних джерел енергії. Однак ефективність ФЕ систем може значно постраждати від підвищення робочої температури. Розроблено різні методи охолодження для пом'якшення цієї проблеми, щоб підтримувати оптимальні робочі умови та покращувати загальну продуктивність системи. Цей огляд досліджує досягнення у цих методах, приділяючи увагу гібридним системам фотоелектричних термоелектричних (ФЕ-ТЕ) систем, використанню нанорідин та технологіям теплових трубок. Гібридні системи ФЕ-ТЕ поєднують фотоелектричні як на (рис. 1), елементи з термоелектричними модулями для використання як сонячної, так і відпрацьованої теплової енергії [1], [2]. Цей подвійний підхід підвищує загальну ефективність перетворення енергії, використовуючи ефект Зеебека у термоелектричних матеріалах для перетворення температурних різниць у електричну напругу [3], [4]. Науковці в [2] оцінили продуктивність гібридної системи фотоелектричних термоелектричної когенерації, продемонструвавши її потенціал для покращення ефективності. Інтеграція ТЕ модулів з ФЕ системами дозволяє ефективно використовувати відпрацьоване тепло, що призводить

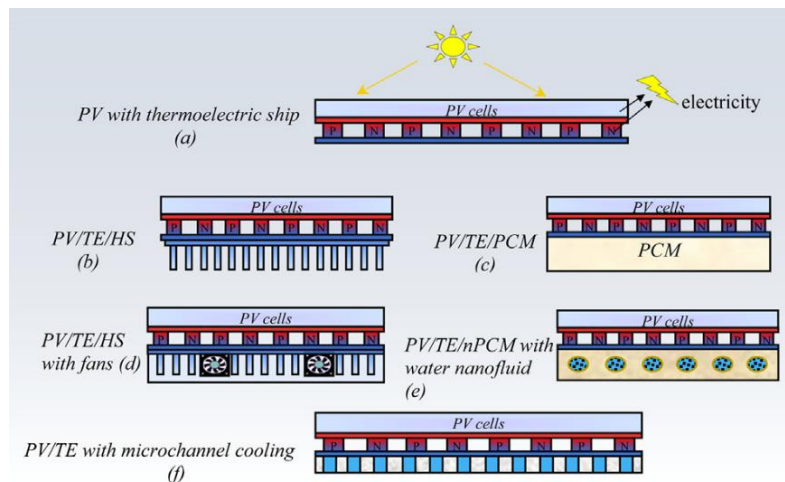


Рис.1. Фотоелектричні елементи з термоелектричним корпусом (а) та з різними методами охолодження: (b) з вмонтованим радіатором, (c) з матеріалами фазових перетворень, (d) з вмонтованим радіатором і вентиляторами постійного струму, (e) з водою-нанорідиною і наноматеріалами фазових перетворень, і (f) з мікроканалним водяним охолодженням [1].

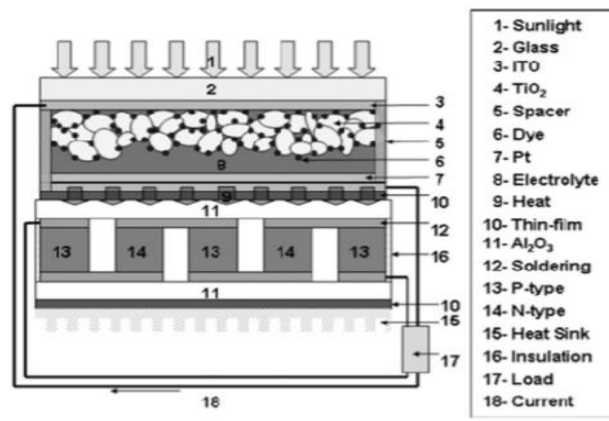


Рис.2. Принципова схема сонячно-термоелектричної системи [5].

до більшого загального виходу енергії. Останні дослідження, такі як ті, що проводили [3] зосереджуються на інноваційних конструкціях, таких як гібридні системи радіаційного охолодження-термоелектричного-фотоелектричного (RC-TE-PV). Ці конструкції включають спектральне розщеплення для оптимізації поглинання різних довжин хвиль, підвищуючи продуктивність як ФЕ, так і ТЕ модулів.

Нанорідини, які є інженерними колоїдними суспензіями наночастинок у базовій рідині, показали себе перспективними для покращення теплопровідності охолоджувальних рідин, що використовуються у ФЕ системах. [5], [6] У цьому розділі розглядається їх застосування та вплив на

ефективність системи. На (рис. 2) науковці [5] розглянули застосування нанорідин у сонячних енергетичних системах, підкреслюючи їхні властивості теплопередачі.

Підвищуючи ефективність охолодження, нанорідини допомагають підтримувати нижчу температуру ФЕ елементів, тим самим покращуючи електричний вихід. Експериментальні дослідження, проведені різними дослідниками, такими як Ельгенді [7], продемонстрували (рис. 3) та (рис.4) значне покращення продуктивності сонячних опріснювачів з використанням термоелектричних матеріалів, посилених нанорідинами. Числові моделювання, такі як ті, що проводили Маграбі [14], надають уявлення

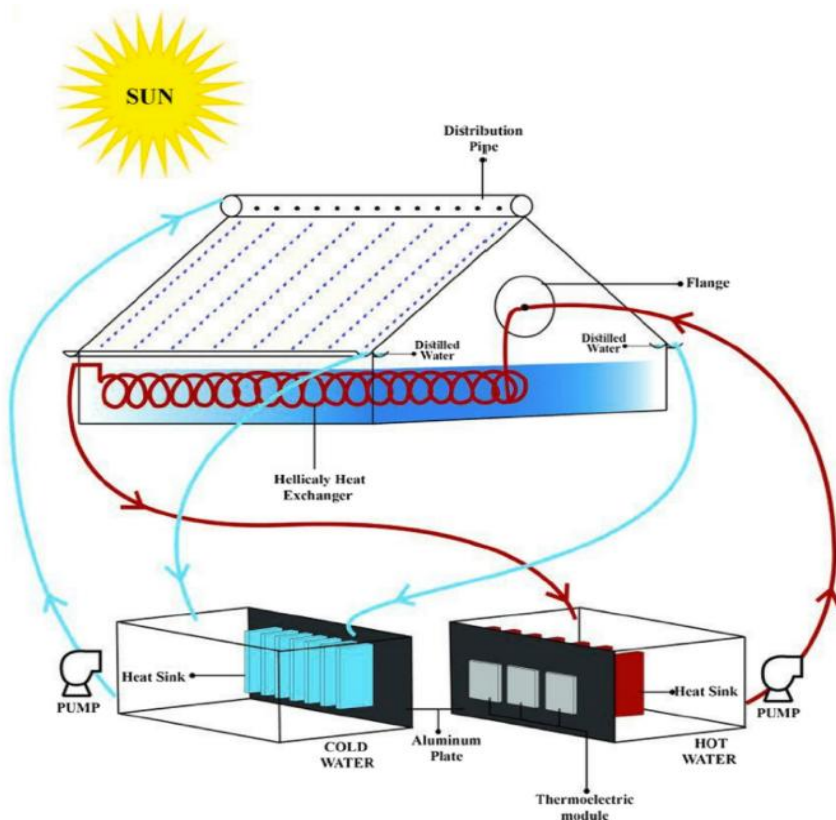


Рис. 3. Схема модифікованого сонячного колектора на термоелектричних модулях [7].

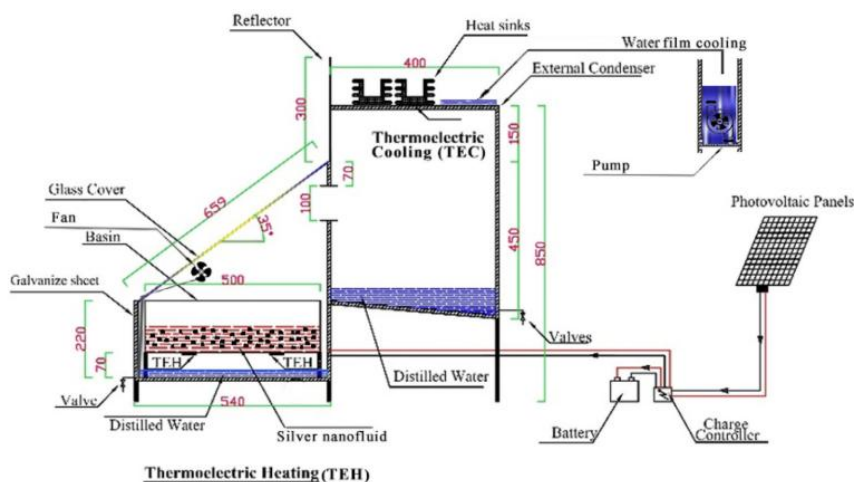


Рис.4. Схема експериментальної установки [7].

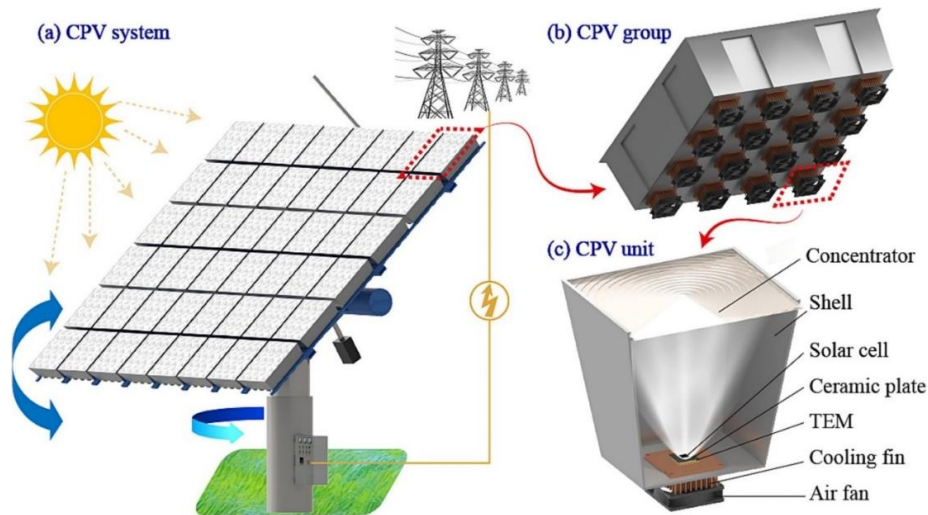


Рис. 5. Ідейна схема самоохолоджувальної фотоелектричної системи [11].

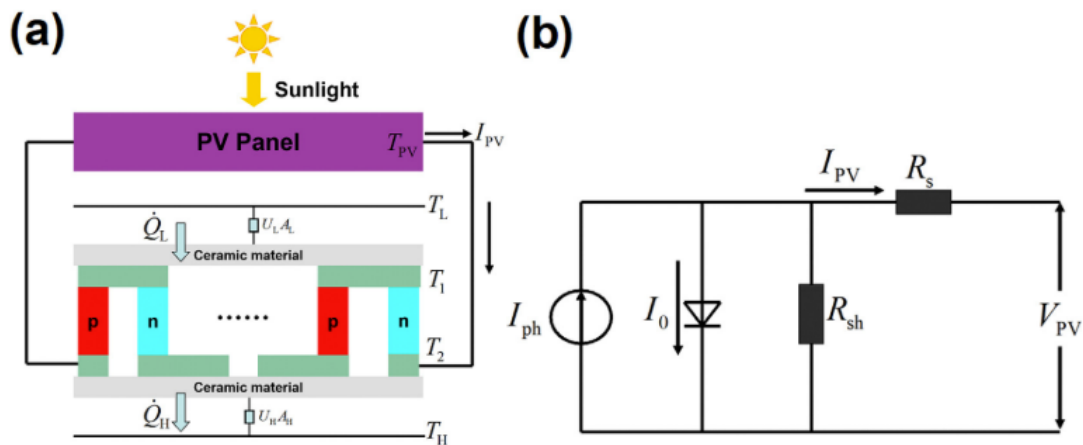


Рис. 6. (а) Загальна схема системи фото-термоелектричних холодильних модулів (б) еквівалентна схема фотоелектричної панелі [12].

про оптимізацію складу нанорідин для максимальної теплової продуктивності.

Теплові трубки - це пристрої для керування теплом, які переносять тепло через фазовий перехід робочої рідини [8], [9], [10]. Вони особливо ефективні в підтримці рівномірного розподілу температур у ФЕ модулях. Науковці [8] проаналізували теплову продуктивність теплових трубок для охолодження концентрованих фотоелектричних (КФЕ) систем, демонструючи їх ефективність у розсіюванні тепла та підтримці оптимальних робочих температур. Інновації в конструкціях теплових трубок, такі як ті, що досліджували в [11], включають інтеграцію механізмів самостійного охолодження (рис. 5) з КФЕ-ТЕ системами. Ці конструкції пропонують покращені можливості розсіювання тепла, що є критичним для висококонцентрованих сонячних енергетичних застосувань.

Термоелектричне охолодження використовує ефект Пельтьє, коли електричний струм, що проходить через з'єднання двох різних матеріалів, створює температурний градієнт [12], [13], [14]. Цей принцип застосовується для ефективного охолодження ФЕ модулів. В [12] досліджували властивості з'єднання та параметричну оптимізацію систем охолодження холодильників (рис. 6) на базі

ФЕ, що показує потенціал для ефективного теплового керування у ФЕ застосуваннях. Дослідження, такі як ті, що проводили Парк та інші [13], зосереджуються на розробці безвартних методів гібридизації між ФЕ та ТЕ пристроями, в прагненні мінімізувати втрати енергії та максимізувати ефективність охолодження.

Інтеграція ФЕ та ТЕ систем призвела до розробки гібридних моделей, які використовують переваги обох технологій. Дослідження [15] та інших досліджували можливість та продуктивність цих гібридних модулів. Науковці в [16] обговорили підвищення ефективності роботи ФЕ систем через оптимальний контроль термоелектричного охолодження. Ці техніки включають складні алгоритми та системи керування (рис. 1) для динамічного налаштування параметрів охолодження для оптимальної продуктивності. Майбутні дослідження, такі як ті, що проводив Реджеб [17], зосереджуються на інноваційних конструкціях та інтегрованих підходах до оптимізації гібридних КФЕ-ТЕ систем, враховуючи як технічні, так і економічні аспекти.

Різні методи охолодження для ФЕ систем демонструють значний потенціал для покращення ефективності та довговічності цих систем (Таблиця 1). Гібридні ФЕ-ТЕ системи, нанорідини та теплові

трубки представляють перспективні напрями розвитку. Незважаючи на значні досягнення, існують технічні виклики, такі як складність інтеграції та вартість виробництва. Подальші дослідження необхідні для вирішення цих питань та покращення економічної ефективності технологій. Майбутні дослідження повинні зосередитися на інноваційних конструкціях, інтегрованих підходах та оптимізації існуючих систем. Покращення в матеріалах, алгоритмах керування та міждисциплінарні дослідження є ключовими для подальшого прогресу. Цей огляд представляє аналіз сучасних досягнень у методах охолодження для сонячних фотоелектричних систем, надаючи цінні висновки для дослідників та інженерів, зацікавлених у підвищенні ефективності відновлюваних джерел енергії.

II. Сучасний стан та перспективи розвитку термоелектричних теплових насосів

Термоелектричні теплові насоси (TETH) представляють собою технології, що використовують термоелектричні ефекти для управління тепловими потоками. Основним елементом таких систем є термоелектричний генератор (ТЕГ) або термоелектричний охолоджувач (ТЕО), які функціонують на основі ефекту Пельтьє, що дозволяє перетворювати електричний струм у температурні градієнти. Хоча ТЕГ безпосередньо працює завдяки ефекту Зеебека, ефект Пельтьє використовується при роботі TETH у зворотному режимі — коли до пристрою прикладається напруга і він починає перекачувати тепло. Таким чином, ті самі матеріали можуть працювати як генератор (ТЕГ), так і охолоджувач (ТЕО) — залежно від напрямку

енергетичної взаємодії (тепло → електрика або електрика → тепло). Ці технології демонструють високу потенційну ефективність у забезпеченні як обігріву, так і охолодження [26], [27]. Важливими аспектами є вдосконалення термоелектричних матеріалів, які можуть забезпечити високий коефіцієнт ефективності перетворення енергії. Нещодавні дослідження, такі як робота [26], показують, що оптимальний вибір технологій теплових насосів для мікро-теплових насосних систем може суттєво поліпшити енергетичну ефективність. Оновлення матеріалів та технологій термоелектричних елементів продовжує залишатися важливим напрямком для підвищення їх продуктивності. Термоелектричні теплові насоси використовують принцип Пельтьє для створення температурних градієнтів, що дозволяє здійснювати обігрів або охолодження. Цей ефект виникає під час пропусканню електричного струму через термоелектричний матеріал. В роботі [28] розглянуто проектування термоелектричних охолоджувачів з високою потужністю для залізничного транспорту (рис. 7). Автори використовували різні методи оптимізації для розробки системи ТЕС, здатної ефективно працювати на рівні кіловатів, забезпечуючи при цьому стабільність температури в обмежених умовах простору залізничного вагону. Особливу увагу було приділено вибору матеріалів, теплового менеджменту та конфігурації термоелементів для забезпечення максимального коефіцієнта продуктивності. Високошвидкісні залізничні вагони потребують надійних і ефективних систем охолодження через інтенсивні умови експлуатації та великі обсяги пасажирів. Запропоновані рішення в статті можуть значно покращити ефективність охолодження та знизити енергоспоживання таких систем, що є важливим з

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз ефективності та експлуатаційних характеристик звичайних і гібридних сонячних панелей

Характеристика	Сонячні панелі	Сонячні панелі з термоелектричним модулем	Джерела
Ефективність перетворення	15-20%	20-25%	[1], [5], [6], [9], [18]
Вартість встановлення (USD/кВт)	1,000-1,500	1,200-1,800	[2], [10], [19], [20]
Термін служби (років)	20-25	20-30	[3], [21], [22], [23]
Температурна стабільність	Знижується з підвищенням температури	Покращується завдяки термоелектричному охолодженню	[4], [7], [8], [16]
Вплив на навколишнє середовище	Низький	Низький	[12], [13], [14], [24]
Необхідність в охолодженні	Висока	Низька	[8], [15], [17], [24], [25]
Енергоефективність в умовах високих температур	Знижується	Підвищується	[2], [6], [9], [12]
Додаткові функції	Відсутні	Генерація додаткової електроенергії з тепла	[1], [3], [7], [16]
Підтримка стабільності напруги	Обмежена	Вища завдяки додатковому охолодженню	[4], [15], [18], [20]
Використання у віддалених місцях	Обмежене	Розширене завдяки зниженню потреби в обслуговуванні	[5], [13], [19], [21]

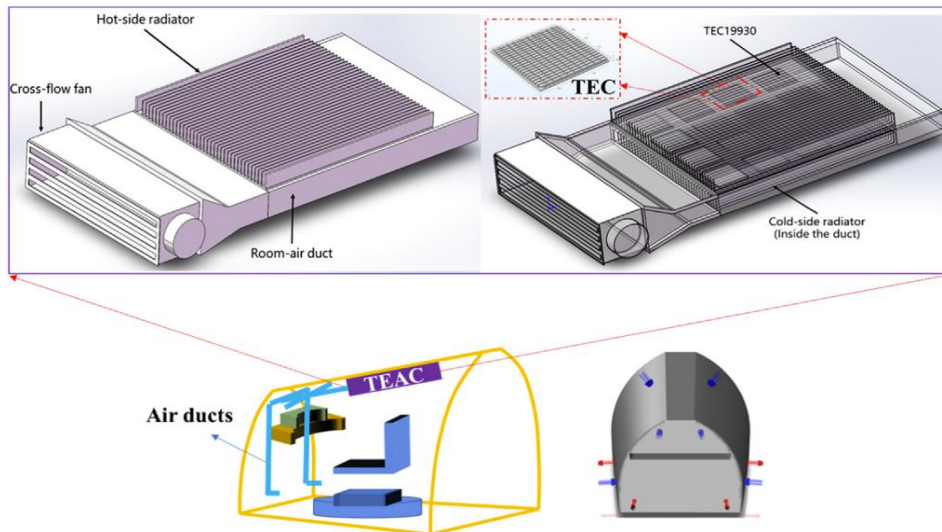


Рис. 7. Схема системи ТЕАС для високошвидкісного вагона машиніста швидкісного вагона машиніста [28].

огляду на зростаючу потребу в енергозбереженні та зниженні викидів.

Це демонструє, як термоелектричні системи можуть бути оптимізовані для конкретних умов використання. Експериментальні дослідження [27] акцентують увагу на використанні термоелектричних технологій в «нульових» енергетичних будівлях, де поєднання різних джерел тепла і холоду є критично важливим. Ці технології можуть ефективно інтегруватися з іншими системами, такими як сонячні панелі, для досягнення високої загальної енергетичної ефективності. Інновації в термоелектричних системах зосереджені на розробці нових матеріалів і вдосконаленні технологічних процесів [65-67]. В статтях [10], [29] представили новий тип термоелектричних теплових насосів, що поєднують функції вентиляції і відновлення тепла для побутових застосувань.

Ця система підвищує ефективність використання термоелектричних технологій для покращення комфорту в житлових приміщеннях. Робота [12] розглядає оптимізацію параметрів системи термоелектричного охолодження, що приводить до значного підвищення її продуктивності. Такі інновації дозволяють підвищити енергоефективність і зменшити витрати на впровадження та експлуатацію термоелектричних систем. Інтеграція термоелектричних теплових насосів із сонячними панелями забезпечує ефективне використання відновлювальних джерел енергії. Робота [30] показує, як комбінація термоелектричних і сонячних технологій може забезпечити енергетичну незалежність будівель. Це дослідження підкреслює важливість гібридних систем у зниженні споживання традиційних енергетичних ресурсів. Сучасні розробки, такі як дослідження [23], фокусуються на розвитку гібридних систем, що поєднують фотоелектричні і термоелектричні елементи. Це дозволяє досягти більш ефективного використання сонячної енергії і знижує витрати на енергетичні ресурси.

Останні дослідження, такі як робота [31], демонструють ефективність термоелектричних

теплових насосів для обігріву приміщень і надання тепла в умовах низьких температур (рис. 8). Це підкреслює гнучкість та універсальність термоелектричних систем у різних кліматичних умовах.

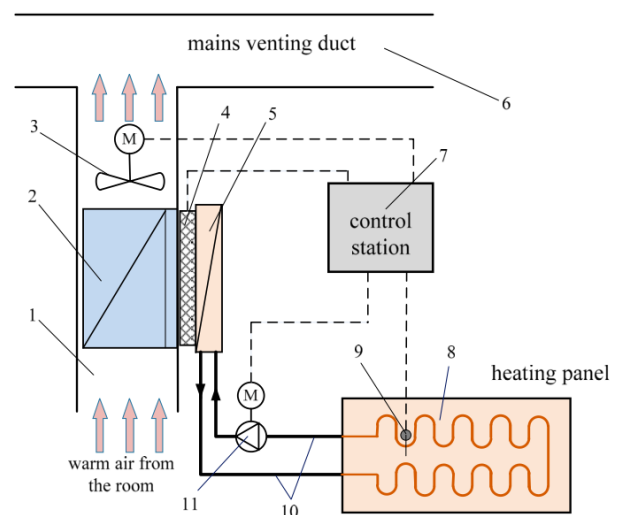


Рис. 8. Структурна схема локальної підлогової опалювальної установки для поросят із використанням термоелектричного ефекту: 1-канал контуру холодного повітря; 2-повітряний теплообмінник на холодній стороні елементів Пельтьє; 3-електричний вентилятор; 4-елементи Пельтьє; 5-водяний теплообмінник на гарячій стороні елементів Пельтьє; 6-магістральний вентиляційний канал; 7-модуль керування; 8-настінна нагрівальна панель; 9- датчик температури; 10- повітропровід контуру гарячого повітря; 11- циркуляційний тепловий насос [31].

Майбутні тенденції у розвитку термоелектричних теплових насосів включають подальше вдосконалення термоелектричних матеріалів, зокрема підвищення їх термоелектричної ефективності. Сучасні дослідження, такі як робота [6], показують значний потенціал у чисельному моделюванні нових інтегрованих систем, що можуть покращити загальну

Таблиця 2.

Порівняльна характеристика традиційних теплових насосів з ТЕТН

Характеристика	Теплові насоси	Термоелектричні теплові насоси	Джерела
ККД	300-400%	150-250%	[28], [30], [33], [34]
Робочі температури (°C)	-20 до +40	-10 до +30	[10], [18], [26], [31]
Робочі рідини	Холодоагенти (наприклад, R134a)	Напівпровідникові матеріали	[27], [35], [36], [37]
Вартість встановлення (USD/кВт)	800-1,200	1,000-1,500	[12], [29], [38], [39], [40]
Термін служби (років)	15-20	10-15	[17], [18], [30], [41]
Енергоефективність	Висока	Середня	[29], [32], [33], [34], [42]
Вплив на навколишнє середовище	Низький (за правильного обслуговування)	Дуже низький	[26], [28], [36]
Габарити та вага	Середні	Невеликі	[27], [31], [35], [40], [41]
Шумність	Середня	Низька	[10], [30], [38]
Необхідність обслуговування	Регулярне	Мінімальне	[12], [18], [31], [40]
Переваги	Висока ефективність, можливість використання в різних умовах	Компактність, низька шумність, мінімальні вимоги до обслуговування	[28], [29], [32], [34], [43]
Недоліки	Необхідність регулярного обслуговування, вартість	Нижча ефективність, висока вартість матеріалів	[27], [33], [36], [37], [39]

продуктивність термоелектричних технологій. Важливими аспектами для майбутніх досліджень є зменшення витрат на впровадження термоелектричних систем і підвищення їх надійності та довговічності. Високі витрати на матеріали та технології є перешкодою для широкого впровадження цих систем у комерційних і побутових застосуваннях (Таблиця 2). Останні дослідження, такі як робота [32], показують, що вдосконалення термоелектричних насосів і їх інтеграція з іншими технологіями, такими як системи зберігання тепла, може суттєво підвищити їх ефективність і зменшити витрати на експлуатацію.

Термоелектричні пристрої знаходять все ширше застосування в різних галузях завдяки своїй здатності ефективно перетворювати тепло в електричну енергію і навпаки. У цьому огляді розглядаються сучасні дослідження, присвячені термоелектричним охолоджувачам, термоелектричним тепловим насосам та їхнім практичним застосуванням.

Науковці в [44] проводять практичне дослідження ефективності термоелектричних охолоджувачів, розглядаючи їхні сильні та слабкі сторони. Автори [45] моделюють продуктивність термоелектричної системи кондиціонування повітря, використовуючи високо потужні радіатори, що сприяють утилізації відпрацьованого тепла. Маїніл та інші [46] досліджують продуктивність портативного термоелектричного охолоджувача в залежності від вхідної потужності та навантаження. Тан [47] досліджують гібридну систему мембранної дистиляції з термоелектричним тепловим насосом для енергоефективної очистки води та охолодження приміщень. Чу [48] пропонують стратегії підвищення ефективності термоелектричних теплових насосів, що

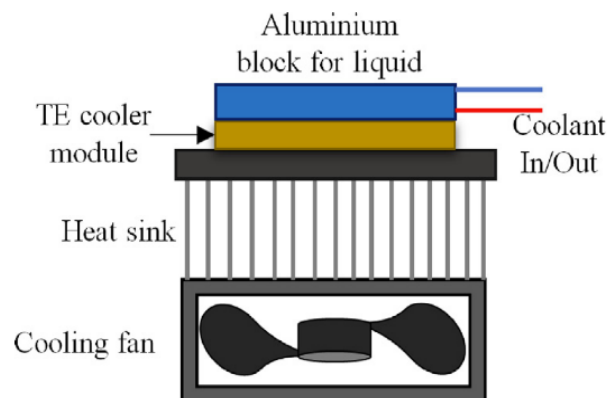


Рис. 9. Схематична ілюстрація використовуваного єдиного блоку системи ТЕС для системи терморегуляції акумулятора [54].

використовують воду як джерело тепла. Еріксон та Унгар [49] розглядають використання термоелектричних теплових насосів у системах каскадної дистиляції, підкреслюючи їхні переваги та недоліки. Автори [50] розглядають сучасні дослідження і виклики, пов'язані з наноструктурованими термоелектричними матеріалами, такими як Bi_2Te_3 . Науковці в [51] досліджують поверхневі фоони у топологічних ізоляторах на основі Bi_2Te_3 за допомогою розсіяння світла Бріллюена. Джанг та Пеї [52] вивчають маніпуляції електричним транспортом у термоелектриках, акцентуючи на досягненнях і можливих напрямках розвитку. Хасан та інші [53] використовують числові симуляції в COMSOL multiphysics для оптимізації продуктивності

термоелектричних охолоджувачів на основі Bi_2Te_3 . Вчені в [54] пропонують систему термоелектричного охолодження (рис. 9) для теплового менеджменту батарей електричних транспортних засобів.

III. Системи теплового менеджменту акумуляторних батарей електричних транспортних засобів

Забезпечення належного теплового менеджменту акумуляторних батарей є ключовим завданням для підвищення ефективності та безпеки електричних транспортних засобів. Останні дослідження спрямовані на розробку та оптимізацію систем термоелектричного охолодження для батарей, а також на вивчення різних методів і матеріалів, що сприяють ефективному розсіюванню тепла.

Вчені в [54] досліджують систему термоелектричного охолодження для теплового менеджменту батарей електричних транспортних засобів, підкреслюючи її ефективність у забезпеченні стабільної температури батарей. В іншій роботі, [55] проводять експериментальне дослідження

термоелектричного охолодження для нового дизайну батарейного блоку, в якому використовуються мідні тримачі для покращення теплопередачі.

Науковці [56] аналізують різні методи підігріву батарей при низьких температурах (рис.10), що підтримує нормальну роботу батарей подовжує термін їх роботи і відповідно є актуальним для автомобільних застосувань. В [57] вивчає систему теплового менеджменту батарей, що базується на термоелектричному ефекті, підкреслюючи переваги цього підходу для ефективного охолодження. У [58] пропонує стратегію передбачуваного теплового менеджменту для гібридних електричних транспортних засобів, що враховує невизначеність параметрів термоелектричних пристроїв. Джанг та інші [59] розробляють систему теплового менеджменту, що поєднує теплову трубку з термоелектричним охолоджувачем, підвищуючи ефективність тепловідведення.

Ма та інші в [60] досліджують високоефективне електрокалоричне охолодження з електростатичним гнучким приводом, що може бути застосоване в системах теплового менеджменту батарей так і в ряді інших корисних застосувань. Автори розробили і

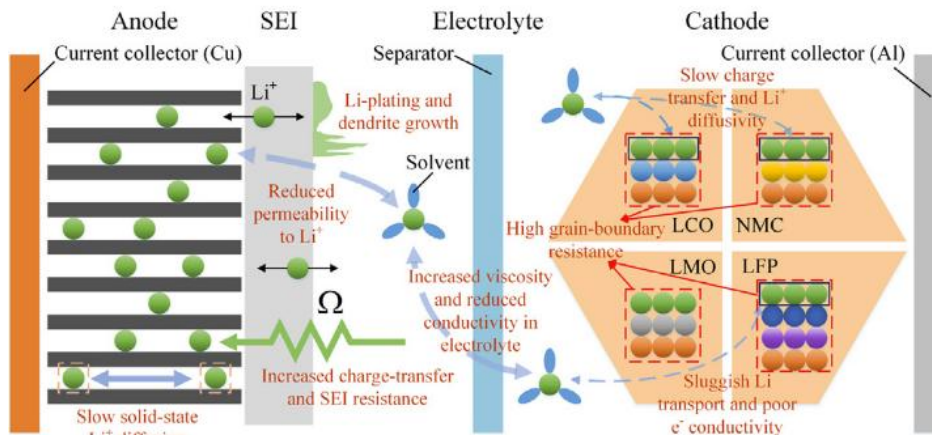


Рис. 10. Механізми погіршення продуктивності акумулятора при низьких температурах з точки зору з матеріальної точки зору [56].

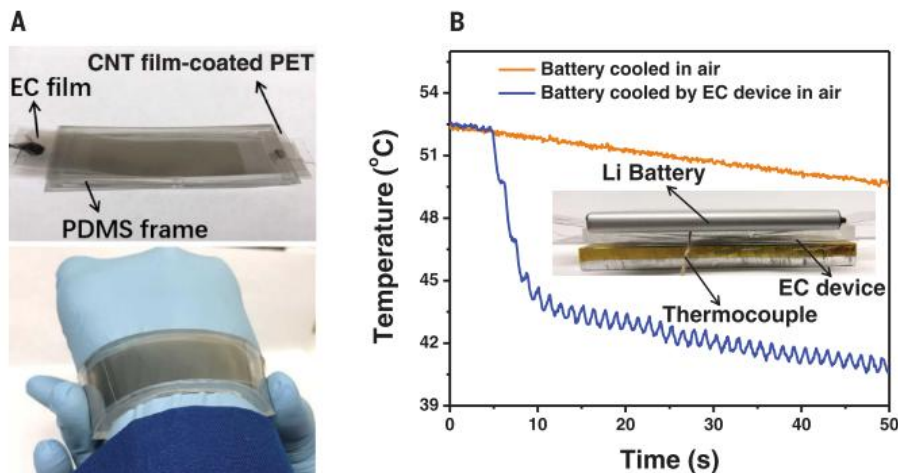


Рис. 11. Ефективність гнучкого електрокалоричного охолоджувального пристрою. (А) Фотографія гнучкого електрокалоричного пристрою.. (В) Зміна температури перегрітого акумулятора смартфона з пристроєм охолодження ЕС і без нього. На вставці показано перегрітий акумулятор у верхній частині пристрою ЕС [60].

Таблиця 3.

Оцінка переваг і недоліків систем теплового керування для енергетичних застосувань

Система теплового менеджменту	Переваги	Недоліки	Джерело
Термоелектричне охолодження	Висока ефективність охолодження, стабільна температура, компактність	Висока вартість, потребує ефективного тепловідведення	[1], [4]
Методи підігріву при низьких температурах	Підвищення продуктивності батарей в холодних умовах, запобігання зниженню ємності	Додаткова енергія для підігріву, складність інтеграції	[2]
Системи на основі термоелектричного ефекту	Підвищена ефективність теплового менеджменту, низька вага	Необхідність високоякісних матеріалів, вища вартість виробництва	[3], [5]
Комбінована система з тепловою трубкою	Підвищена ефективність тепловідведення, можливість використання в різних умовах	Складність конструкції, потреба в додаткових компонентах	[6]
Електрокалоричне охолодження	Висока ефективність охолодження, низьке енергоспоживання	Складність управління, висока вартість	[7]
Зовнішні системи охолодження для літій-іонних батарей	Висока ефективність охолодження, простота конструкції	Великі габарити, додаткове енергоспоживання	[8]
Інтегровані системи теплового менеджменту	Комплексне рішення для теплового менеджменту, ефективність	Висока вартість, складність інтеграції	[9], [10], [11]
Теплові трубки	Ефективне тепловідведення, простота конструкції	Обмежена ефективність в екстремальних умовах, потреба в якісних матеріалах	[12]

продемонстрували пристрій (рис.11), заснований на ефекті електрокалоричного охолодження, який досягає значного зменшення температури шляхом застосування електричного поля. Замість того, щоб використовувати механічне стиснення, система управляється електричними сигналами, що зменшує потребу в складних рухомих частинах і знижує енергоспоживання. Електрокалоричний ефект виникає в матеріалах, які зазнають зміни температури при зміні прикладеного електричного поля. У цій роботі автори використовували нові матеріали та конструкції, що дозволяють значно збільшити ефективність охолодження. Зокрема, дослідження показало, що за допомогою електростатичного управління можна досягти значного охолодження з мінімальними витратами енергії.

Розроблена технологія може знайти застосування в мікроелектроніці, де є потреба в компактних та ефективних системах охолодження. Крім того, вона може бути корисною в побутових приладах, де екологічні та енергозберігаючі рішення мають все більше значення.

Науковці [61] надають огляд ключових технологій зовнішнього охолодження літій-іонних батарей, підкреслюючи їхні переваги та недоліки. В статті. [62] зосереджується увага на важливості ефективного управління теплом у батареях для підвищення їх продуктивності, безпеки та довговічності, особливо у застосуваннях для електричних транспортних засобів. У статті розглядаються різні типи систем теплового менеджменту, включаючи повітряне, рідинне та фазозмінні матеріали. Автори аналізують переваги та недоліки кожного підходу, зокрема ефективність тепловідведення, простоту конструкції, енерго-

ефективність та вплив на загальну масу та вартість системи. Окрему увагу приділено використанню сучасних технологій, таких як активне охолодження та інтеграція з іншими компонентами системи енергозабезпечення транспортних засобів. Крім того, автори досліджують питання моделювання та оптимізації систем BTMS, що дозволяє підвищити їх ефективність і надійність у реальних умовах експлуатації. Автори також акцентують на майбутніх викликах у розвитку BTMS, таких як необхідність створення більш легких, ефективних і економічно вигідних систем, здатних забезпечити стабільну роботу батарей у різних температурних режимах. Вони підкреслюють важливість подальших досліджень у цій галузі для підвищення ефективності електричних транспортних засобів та інших застосувань, де використовуються високопродуктивні батареї. Маіорініо [63] та Хванг [64] проводять огляди сучасних методів теплового менеджменту батарейних блоків для електричних транспортних засобів, висвітлюючи основні тенденції та технологічні інновації.

В статті [9] основна увага статті зосереджена на використанні чисельних моделей для аналізу та оптимізації теплових трубок у різних сферах застосування, таких як охолодження електронних пристроїв, теплові управління в космічній техніці, і навіть у відновлюваній енергетиці. Моделювання дозволяє точно передбачати поведінку теплових трубок, включаючи їхню здатність до перенесення тепла, теплову ефективність і стабільність в різних умовах експлуатації. Автори статті розглядають кілька типів теплових трубок, таких як капілярно-пропорційні трубки та трубки зі змінним перерізом, аналізуючи їхню ефективність у різних сценаріях.

Особлива увага приділяється порівнянню результатів чисельного моделювання з експериментальними даними, що дозволяє підтверджувати моделі та зробити висновки про їхню точність. Результати роботи демонструють, що чисельні моделі можуть ефективно використовуватися для оптимізації конструкцій теплових трубок, зокрема для досягнення максимальної теплової ефективності та надійності в різних умовах.

Термоелектричне охолодження є ефективним методом для забезпечення стабільної температури батарей в електричних транспортних засобах. Основні переваги цієї системи включають високу ефективність охолодження та компактність, що дозволяє її легко інтегрувати в конструкцію транспортного засобу. Однак висока вартість і необхідність ефективного тепловідведення можуть бути серйозними обмеженнями [54], [55]

Методи підігріву при низьких температурах дозволяють підвищити продуктивність батарей в холодних умовах, запобігаючи зниженню їх ємності. Основні недоліки включають додаткове енергоспоживання для підігріву та складність інтеграції в існуючі системи [56]. Системи на основі термоелектричного ефекту характеризуються підвищеною ефективністю теплового менеджменту та низькою вагою. Основні недоліки включають необхідність використання високоякісних матеріалів та вищу вартість виробництва [59].

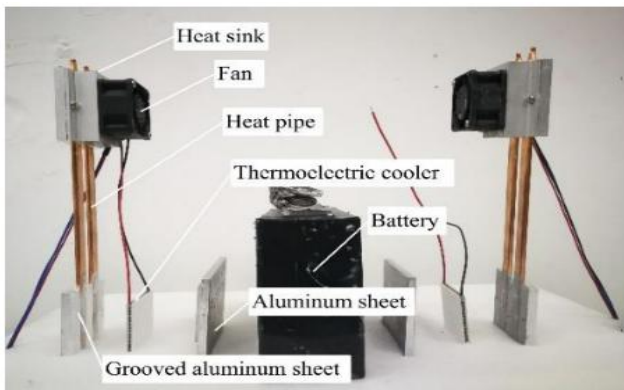


Рис. 12. Система терморегуляції акумулятора на основі теплового насоса та ТЕС [59].

Комбіновані системи з тепловою трубкою забезпечують підвищену ефективність тепловідведення і можуть використовуватися в різних умовах. Основні недоліки включають складність конструкції (Рис.12) та потребу в додаткових компонентах [59]. Електрокалоричне охолодження відрізняється високою ефективністю і низьким енергоспоживанням, але складність управління і висока вартість обмежують його широке застосування [60]. Зовнішні системи охолодження є ефективними і мають просту конструкцію, але їх великі габарити та

додаткове енергоспоживання можуть бути значними недоліками [61]. Інтегровані системи пропонують комплексне рішення для теплового менеджменту, але висока вартість і складність інтеграції можуть бути суттєвими обмеженнями [62], [63], [64]. Теплові трубки забезпечують ефективне тепловідведення і мають просту конструкцію, але обмежена ефективність в екстремальних умовах і потреба в якісних матеріалах можуть обмежувати їх використання [9].

Огляд літератури показує, що системи термоелектричного охолодження та альтернативні методи теплового менеджменту мають значний потенціал для покращення ефективності та безпеки електричних транспортних засобів. Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації матеріалів і технологій, що сприяють ефективному розсіюванню тепла, та на інтеграції новітніх технологій для забезпечення стабільної роботи батарей у різних умовах.

Висновки

Ефективність сучасних теплових насосів може бути підвищена при використанні гібридних систем. Зокрема, їх ККД може перевищувати значення традиційних систем на 15-20%, що робить їх більш привабливими для застосування у компактних та мобільних пристроях. Використання сонячних панелей з термоелектричними модулями дозволяє покращити ефективність на 10-15% порівняно з традиційними сонячними панелями. Це забезпечує більш ефективне використання сонячної енергії та дозволяє скоротити витрати на енергію. У сфері охолодження акумуляторних батарей електричних транспортних засобів було виявлено, що використання термоелектричних систем дозволяє знизити температуру батарей на 10-15°C, що збільшує їх термін служби на 20-30% і знижує ризик перегріву. Відсутність охолодження, навпаки, призводить до значного зниження ефективності батарей та збільшує їх зношування. Таким чином, використання термоелектричних технологій вказує на суттєве підвищення ефективності та надійності в енергетичних системах майбутнього, що робить їх перспективними для подальших досліджень і впровадження в різних галузях промисловості.

Черкез Р.Г. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри термоелектрики та медичної фізики Чернівецького національного університету;
Порубаний О.М. – аспірант кафедри термоелектрики та медичної фізики Чернівецького національного університету;
Томко С.О. – студент термоелектрики та медичної фізики Чернівецького національного університету.

- [1] M. A. Akrouh, K. Chahine, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, and M. Khaled, *Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: A detailed comprehensive review and innovative classification*, Energy and Built Environment, Nov. (2023); <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2023.11.002>.
- [2] B.S. Dallan, J. Schumann, and F.J. Lesage, *Performance evaluation of a photoelectric–thermoelectric cogeneration hybrid system*, Solar Energy, 118, 276 (2015); <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.05.034>.

- [3] S. Lv et al., *Design and comprehensive study of a novel radiative cooling-thermoelectric-photovoltaic (RC-TE-PV) hybrid system based on spectral splitting*, (2024); <https://ssrn.com/abstract=4661656>.
- [4] K. Teffah and Y. Zhang, *Modeling and experimental research of hybrid PV-thermoelectric system for high concentrated solar energy conversion*, *Solar Energy*, 157, 10 (2017); <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.08.017>.
- [5] A. H. Elsheikh, S. W. Sharshir, M. E. Mostafa, F. A. Essa, and M. K. Ahmed Ali, *Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3483 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.108>.
- [6] G. Fabbri and M. Greppi, *Numerical modeling of a new integrated PV-TE cooling system and support*, *Results in Engineering*, 11, 100240 (2021); <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2021.100240>.
- [7] M. Elgendi, A. E. Kabeel, and F. A. Essa, *Improving the solar still productivity using thermoelectric materials: A review*, *Alexandria Engineering Journal*, 65, 963 (2023); <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2022.10.011>.
- [8] A. Lashin, *Analysis of thermal performance a heat pipe for concentrated photovoltaic cooling*, *J Radiat Res Appl Sci*, 16, (3), 100606 (2023); <https://doi.org/10.1016/J.JRRAS.2023.100606>.
- [9] H. M. Maghrabie et al., *Numerical simulation of heat pipes in different applications*, *International Journal of Thermofluids*, 16, 100199 (2022); <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2022.100199>.
- [10] J.R. Segnon and H. Njoku, *A Thermoelectric Heat Pumping Solar Air Heater*, (2021); <https://www.researchgate.net/publication/359214530>.
- [11] Z. Wu, G. Xie, F. Gao, W. Chen, Q. Zheng, and Y. Liu, *Experimental study of a self-cooling concentrated photovoltaic (CPV) system using thermoelectric modules*, *Energy Convers Manag*, 299, 117858 (2024); <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117858>.
- [12] T. Liao, Q. He, Q. Xu, Y. Dai, C. Cheng, and M. Ni, *Coupling properties and parametric optimization of a photovoltaic panel driven thermoelectric refrigerators system*, *Energy*, 220, 119798 (2021); <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.119798>.
- [13] K. T. Park et al., *Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices*, *Sci Rep*, 3, (2013); <https://doi.org/10.1038/srep02123>.
- [14] S.Y. Wu, T. Wang, L. Xiao, and Z. G. Shen, *Effect of cooling channel position on heat transfer characteristics and thermoelectric performance of air-cooled PV/T system*, *Solar Energy*, 180, 489 (2019); <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2019.01.043>.
- [15] W.G.J. H. M. van Sark, *Feasibility of photovoltaic – Thermoelectric hybrid modules*, *Appl Energy*, 88(8), 2785 (2011); <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.02.008>.
- [16] G.T.V. Mooko, P.A. Hohne, and K. Kusakana, *Enhancing photovoltaic operation system efficiency and cost-effectiveness through optimal control of thermoelectric cooling*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 273, 112937 (2024); <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2024.112937>.
- [17] O. Rejeb, S. Shittu, C. Ghenai, G. Li, X. Zhao, and M. Bettayeb, *Optimization and performance analysis of a solar concentrated photovoltaic-thermoelectric (CPV-TE) hybrid system*, *Renew Energy*, 152, 1342 (2020); <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.02.007>.
- [18] Z. Liu, L. Zhang, G. Gong, H. Li, and G. Tang, *Review of solar thermoelectric cooling technologies for use in zero energy buildings*, *Energy Build*, 102, 207 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.029>.
- [19] C. Lorenzo and L. Narvarte, *Performance indicators of photovoltaic heat-pumps*, *Heliyon*, 5(10), e02691 (2019); <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2019.E02691>.
- [20] M. Jradi, N. Ghaddar, and K. Ghali, *Optimized Operation of a Solar-Driven Thermoelectric Dehumidification System for Fresh Water Production*, (2012).
- [21] A. Kane and V. Verma, *Performance Enhancement of Building Integrated Photovoltaic Module using Thermoelectric Cooling*, 3(2) (2013).
- [22] I.A. Okanimba Tedah, F. Maculewicz, D. E. Wolf, and R. Schmechel, *Thermoelectrics versus thermophotovoltaics: Two approaches to convert heat fluxes into electricity*, *J Phys D Appl Phys*, 52(27), (2019); <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab1833>.
- [23] N. Wang, L. L. Ni, A. Wang, H. Z. Jia, and L. Zuo, *Design and Implementation of Hybrid Photovoltaic-thermoelectric System with Intelligent Power Supply Management*, *IFAC-PapersOnLine*, 55(37), 164 (2022); <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2022.11.178>.
- [24] F. Alkilani, O. Nemraoui, and F. Ismail, *Performance evaluation of solar still integrated with thermoelectric heat pump system*, *AIMS Energy*, 11(1), 47 (2023); <https://doi.org/10.3934/energy.2023003>.
- [25] I. Erro, P. Aranguren, I. Alzuguren, D. Chavarren, and D. Astrain, *Experimental analysis of one and two-stage thermoelectric heat pumps to enhance the performance of a thermal energy storage*, *Energy*, 285, 129447 (2023), <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.129447>.
- [26] S. Jugsujinda, A. Vora-Ud, and T. Seetawan, *Analyzing of Thermoelectric Refrigerator Performance*, *Procedia Eng*, 8, 154 (2011); <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.03.028>.
- [27] A. Allouhi, A. Boharb, A. Jamil, A. A. Msaad, A. Benbassou, and T. Kouksou, *Simulation of a thermoelectric heating system for small-size office buildings in cold climates*, *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2015*, (2016); <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455025>.
- [28] Y. Tang, D. Jin, Z. Wang, and F. Han, *The extreme high cooling capacity thermoelectric cooler optimal design for kilowatts scale thermoelectric air-conditioner of high-speed railway carriage*, *Energy and Built Environment*, (2023); <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2023.11.011>.

- [29] Q. Xu, S. Zhang, and S. Riffat, *Ecopump: A novel thermoelectric heat pump/heat recovery ventilator system for domestic building applications*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 17, 611 (2022); <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac040>.
- [30] M. Trancossi, G. Cannistraro, and J. Pascoa, *Thermoelectric and solar heat pump use toward self sufficient buildings: The case of a container house*, Thermal Science and Engineering Progress, 18, (2020); <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100509>.
- [31] D. Tikhomirov, A. Khimenko, A. Kuzmichev, V. Bolshev, G. Samarin, and I. Ignatkin, *Local Heating through the Application of a Thermoelectric Heat Pump for Prenursery Pigs*, Agriculture (Switzerland), 13(5), (2023); <https://doi.org/10.3390/agriculture13050948>.
- [32] E. Ibáñez-Puy, C. Martín-Gómez, J. Bermejo-Busto, and A. Zuazua-Ros, *Thermal and energy performance assessment of a thermoelectric heat pump integrated in an adiabatic box*, Appl Energy, 228, 681 (2018); <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.06.097>.
- [33] X. Fan, H. Sun, Z. Yuan, Z. Li, R. Shi, and N. Razmjoo, *Multi-objective optimization for the proper selection of the best heat pump technology in a fuel cell-heat pump micro-CHP system*, Energy Reports, 6, 325 (2020); <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2020.01.009>.
- [34] I. Erro, P. Aranguren, F. J. Sorbet, I. Bonilla-Campos, and D. Astrain, *Enhancement of the Power-to-Heat Energy Conversion Process of a Thermal Energy Storage Cycle through the use of a Thermoelectric Heat Pump*, Appl Therm Eng, 246, 122923 (2024); <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.122923>.
- [35] Y. Wu, H. Sun, M. Duan, B. Lin, H. Zhao, and C. Liu, *Novel Radiation-Adjustable Heating Terminal Based on Flat Heat Pipe Combined with Air Source Heat Pump*, Engineering, 20, 192 (2023); <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2021.09.019>.
- [36] I. Neya, J. Ramousse, I. Neya, J. Ramousse, and M. Perier-Muzet, *Thermodynamic analysis of water/water thermoelectric heat pumps: design considerations* Maxime Perier-Muzet Université de Perpignan Entropy analysis of water/water thermoelectric heat pumps: design considerations,” (2015); <https://www.researchgate.net/publication/281857014>.
- [37] R. Buchalik and G. Nowak, *Technical and economic analysis of a thermoelectric air conditioning system*, Energy Build, 268, 112168 (2022); <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112168>.
- [38] M. Cattin, S. Jonnalagedda, S. Makohliso, and K. Schönenberger, *The status of refrigeration solutions for last mile vaccine delivery in low-income settings*, Vaccine X, 11, 100184 (2022); <https://doi.org/10.1016/J.JVACX.2022.100184>.
- [39] D. A. Heavner, *Optimization of the heat pumping capacity of a thermoelectric heat pump heat pump*, Rochester Institute of Technology, (1994); <https://scholarworks.rit.edu/theses>.
- [40] J. Zhao, X. Zhou, Z. Gao, Y. Ma, and Z. Qin, *A novel global maximum power point tracking strategy (GMPPT) based on optimal current control for photovoltaic systems adaptive to variable environmental and partial shading conditions*, Solar Energy, 144, 767 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.017>.
- [41] T. Ibrahim, M. Abou Akrouh, F. Hachem, M. Ramadan, H. S. Ramadan, and M. Khaled, *Cooling Techniques for Enhanced Efficiency of Photovoltaic Panels—Comparative Analysis with Environmental and Economic Insights*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 01, (2024); <https://doi.org/10.3390/en17030713>.
- [42] S. Usón, J. Royo, and P. Canalís, *Integration of thermoelectric generators in a biomass boiler: Experimental tests and study of ash deposition effect*, Renew Energy, 214, 395, (2023); <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.05.100>.
- [43] R. Buchalik and G. Nowak, *Technical and economic analysis of a thermoelectric air conditioning system*, Energy Build, 268, 112168 (2022); <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112168>.
- [44] N. P. Bayendang, V. Balyan, and M. T. Kahn, *The question of thermoelectric devices (TEDs) in/efficiency—a practical examination considering thermoelectric coolers (TECs)*, Results in Engineering, 21, 101827 (2024); <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.101827>.
- [45] X. Ma, Y. Zhang, Z. Han, N. Zang, and Z. Liu, *Performance modelling on a thermoelectric air conditioning system using high power heat sinks and promoting waste heat utilization*, Energy, 268, 126612 (2023); <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.126612>.
- [46] A. K. Mainil, A. Aziz, and M. Akmal, *Portable Thermoelectric Cooler Box Performance with Variation of Input Power and Cooling Load*, Aceh International Journal of Science and Technology, 7 (2), 85 (2018); <https://doi.org/10.13170/aijst.7.2.8722>.
- [47] Y. Z. Tan, L. Han, N. G. P. Chew, W. H. Chow, R. Wang, and J. W. Chew, *Membrane distillation hybridized with a thermoelectric heat pump for energy-efficient water treatment and space cooling*, Appl Energy, 231, 1079 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.196>.
- [48] W. Zhu, D. Chen, J. Shi, J. Zhang, Z. Xu, and C. Li, *Efficiency Enhancement Strategies for Water-Source Thermoelectric Heat Pump Modules*, (2023); <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3362530/v1>.
- [49] L. R. Erickson and E. K. Ungar, *Vapor compression and thermoelectric heat pumps for the Cascade Distillation Subsystem: Design and experiment*, AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, (2013); <https://doi.org/10.2514/6.2013-5397>.
- [50] Z. G. Chen, G. Hana, L. Yanga, L. Cheng, and J. Zou, *Nanostructured thermoelectric materials: Current research and future challenge*, Progress in Natural Science: Materials International, 22 (6); 535(2012); <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.11.011>.
- [51] A. Trzaskowska and B. Mroz, *Surface phonons in topological insulator Bi₂Te₃ investigated by Brillouin light scattering*, Sci Rep, 10(1), (2020), <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68690-z>.

- [52] X. Zhang and Y. Pei, *Manipulation of charge transport in thermoelectrics*, NPJ Quantum Mater, 2(1), (2017); <https://doi.org/10.1038/s41535-017-0071-2>.
- [53] M. K. Hasan, M. M. Haque, M. A. Üstüner, H. Mamur, and M. R. A. Bhuiyan, *Optimizing the performance of Bi₂Te₃ TECs through numerical simulations using COMSOL multiphysics*, Journal of Alloys and Metallurgical Systems, 5, (2024); <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2024.100056>.
- [54] Y. Lyu, A. R. M. Siddique, S. H. Majid, M. Biglarbegian, S. A. Gadsden, and S. Mahmud, *Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling*, Energy Reports, 5, 822 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.016>.
- [55] Y. Lyu, A. R. M. Siddique, S. A. Gadsden, and S. Mahmud, *Experimental investigation of thermoelectric cooling for a new battery pack design in a copper holder*, Results in Engineering, 10, 100214 (2021); <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2021.100214>.
- [56] X. Hu, Y. Zheng, D. A. Howey, H. Perez, A. Foley, and M. Pecht, *Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives*, Prog Energy Combust Sci, 77, (2020); <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806>.
- [57] C. W. Zhang, K. J. Xu, L. Y. Li, M. Z. Yang, H. Bin Gao, and S. R. Chen, *Study on a battery thermal management system based on a thermoelectric effect*, Energies (Basel), 11(2); (2018); <https://doi.org/10.3390/en11020279>.
- [58] C. Zhu, F. Lu, H. Zhang, and C. C. Mi, *Robust predictive battery thermal management strategy for connected and automated hybrid electric vehicles based on thermoelectric parameter uncertainty*, IEEE J Emerg Sel Top Power Electron, 6(4); 1796(2018); <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2852218>.
- [59] C. Zhang et al., *A Li-ion battery thermal management system combining a heat pipe and thermoelectric cooler*, Energies (Basel), 13(4); (2020); <https://doi.org/10.3390/en13040841>.
- [60] R. Ma et al., *Highly efficient electrocaloric cooling with electrostatic actuation*, Science (1979), 357, 15 (2017); <https://www.science.org>.
- [61] M. M. Hamed, A. El-Tayeb, I. Moukhtar, A. Z. El Dein, and E. H. Abdelhameed, *A review on recent key technologies of lithium-ion battery thermal management: External cooling systems*, Results in Engineering, 16, 100703 (2022); <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100703>.
- [62] A. G. Olabi et al., *Battery thermal management systems: Recent progress and challenges*, International Journal of Thermofluids, 15, 100171 (2022); <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2022.100171>.
- [63] A. Maiorino, C. Cilenti, F. Petruzzello, and C. Aprea, *A review on thermal management of battery packs for electric vehicles*, Appl Therm Eng, 238, 122035 (2024); <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.122035>.
- [64] F. S. Hwang et al., *Review of battery thermal management systems in electric vehicles*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 192, 114171 (2024); <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.114171>.
- [65] L.I. Anatychuk, R.G. Cherkez *On the Properties of Permeable Thermoelements*. Proc. XXII International conference on thermoelectrics (Montpellier, France) 480- 483 (2003).
- [66] R.G. Cherkez *Energy characteristics of thermoelement with a developed lateral heat exchange*. Journal of Thermoelectricity, 3, 59-68 (2012).
- [67] R. Politsanskyi, I. Kogut, M. Vistak, Z. Mykytyuk, O. Shymchyshyn, & I. Diskovskiyi, *Modelling of a multilayer high-tech film for an infrared photodetector (3.5-5.0 μm)*. Physics and Chemistry of Solid State, 25(4), 757–763 (2024); <https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.757-763/>.

R.H. Cherkez^{1,2}, O.M. Porubanyi², S.O. Tomko²

Current trends in thermoelectric technologies, prospects for thermal regulation

¹*Institute of Thermoelectricity of National Academy of Sciences and Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, Ukraine;*

²*Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych, Chernivtsi, Ukraine, porubanyi.oleksandr@chnu.edu.ua*

This article provides an overview of current trends in thermoelectric technologies, covering various aspects of application and material development. In particular, it examines the potential integration of thermoelectric elements into solar panels to enhance energy conversion efficiency. Special attention is given to thermoelectric heat pumps, which show significant potential for use in low-temperature conditions. The study also analyzes thermal management systems for electric vehicle batteries, ensuring stable operation under various operating conditions. Additionally, modern materials for thermoelectric cooling systems are discussed, including nanostructured and composite materials. The prospects for the development of wearable thermoelectric elements are explored, offering efficient cooling and thermal regulation with minimal material use. The summarized findings highlight the importance of innovations in thermoelectrics for improving energy efficiency and comfort in modern technologies.

Keywords: Thermoelectric materials, energy efficiency, solar panels, heat pumps, thermal regulation, thermal management, electric vehicles, cooling systems.