УДК 536.7:621.36

М. А. Чмиря
В. В. Мартинюк

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА ЯК ІНСТРУМЕНТ "ЗЕЛЕНОЇ" ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді досліджено термодинамічні аспекти термоелектричних явищ, зокрема ефектів Зеєбека, Пельтьє та Томсона. Проаналізовано принципи функціонування сучасних термоелектричних генераторів (ТЕГ) як засобів прямого перетворення теплової енергії в електричну. Розглянуто проблему підвищення термоелектричної добротності матеріалів та перспективи інтеграції ТЕГ у системи утилізації низькопотенційного тепла в промисловості та на транспорті.

Ключові слова: термодинаміка, ефект Зеєбека, ефект Пельтьє, термоелектрична добротність, альтернативна енергетика, напівпровідники.

Abstract

The report investigates the thermodynamic aspects of thermoelectric phenomena, including the Seebeck, Peltier, and Thomson effects. The principles of modern thermoelectric generators (TEGs) operation as means of direct conversion of thermal energy into electrical energy are analyzed. The problem of increasing the thermoelectric merit (ZT) of materials and the prospects for integrating TEGs into systems for recovering low-grade heat in industry and transport are considered.

Keywords: thermodynamics, Seebeck effect, Peltier effect, thermoelectric figure of merit, alternative energy, semiconductors.

Вступ

Сучасна енергетична парадигма вимагає не лише пошуку нових джерел енергії, а й радикального підвищення ККД існуючих систем. Згідно з другим законом термодинаміки, будь-який тепловий двигун неминуче віддає частину енергії довкіллю у формі тепла. Статистика свідчить, що понад 60% енергії, виробленої первинними джерелами, розсіюється у вигляді низькопотенційного тепла. У цьому контексті термоелектрика стає ключовим інструментом «зеленої» трансформації, дозволяючи замикати енергетичні цикли без використання складних механічних перетворювачів [1].

Фізична природа та термодинаміка явищ

Явище термоелектрики базується на трьох взаємопов'язаних ефектах. Основним є ефект Зеєбека: як показано на рисунку 1, при створенні градієнта температур dT/dx у провіднику виникає дифузія носіїв заряду (електронів або дірок) від гарячого кінця до холодного. Це призводить до виникнення об'ємного заряду та відповідної термо-ЕРС, величина якої визначається як:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$$

де α — коефіцієнт Зеєбека.

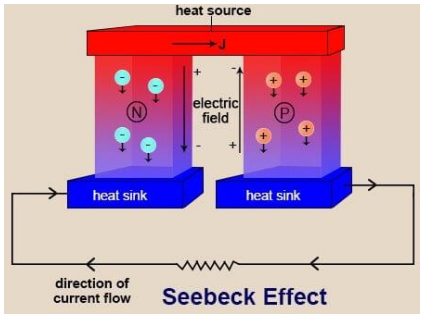


Рис. 1. - Ілюстрація ефекту Зеєбека - дифузія носіїв заряду в напівпровідниках p- та n-типу під дією градієнта температур.

Важливим доповненням є ефект Томсона, який описує виділення або поглинання додаткової теплоти при проходженні струму через провідник, уздовж якого вже існує градієнт температур. З точки зору термодинаміки, термоелектричний генератор можна розглядати як теплову машину, де робочим тілом виступає електронний газ. Ефективність такої машини обмежена не лише циклом Карно, а й внутрішніми незворотними процесами: теплопровідністю гратки та джоулевим нагрівом.

Проблема ефективності та новітні матеріали

Ефективність перетворення енергії в ТЕГ безпосередньо залежить від безрозмірної величини — термоелектричної добротності ZT, яка обчислюється за формулою:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{k}$$

де α — коефіцієнт Зеєбека, σ — питома електропровідність, T — абсолютна температура, k — загальна теплопровідність (сума електронної та граткової складових).

Основна складність полягає у фізичному зв'язку цих параметрів: зазвичай матеріали з високою електропровідністю мають також високу теплопровідність (закон Відемана — Франца), що заважає утримувати різницю температур на контактах.

Сьогодні розвиток нанотехнологій дозволив частково обійти це обмеження. Використання суперграток та наноструктурованих сплавів (наприклад, Bi_2Te_3, PbTe, сплавів Гейслера) дозволяє значно знизити граткову теплопровідність за рахунок розсіювання фононів на границях розділу фаз, не зменшуючи при цьому рухливість електронів. Це відкриває шлях до створення ТЕГ з ККД понад 15%, що зробить їх конкурентоспроможними порівняно з традиційними циклами Ренкіна у певних нішах [2].

Висновки

Проведений аналіз підтверджує, що термоелектрика займає унікальну нішу в сучасній парадигмі альтернативної енергетики. На відміну від традиційних відновлюваних джерел (сонце, вітер), які залежать від погодних умов, термоелектричні генератори пропонують стабільну генерацію на основі будь-якого доступного градієнта температур.

Ключова цінність технології полягає у її здатності замикати енергетичні цикли, перетворюючи розсіяне низькопотенційне тепло, яке становить понад 60% енергетичних втрат у промисловості та на транспорті, безпосередньо в корисну електричну енергію. Це радикально підвищує загальний ККД енергосистем і є прямим інструментом утилізації теплових відходів. Розвиток нанотехнологій та створення новітніх матеріалів з високою добротністю ZT вже дозволяють підвищити ефективність ТЕГ до конкурентоспроможного рівня (понад 15%). Це відкриває шлях до масштабування технології: від мікрогенераторів для автономного живлення IoT-датчиків за рахунок тепла людського тіла до потужних промислових систем утилізації тепла на заводах та в автомобілях.

Таким чином, термоелектрика перетворюється з нішевого фізичного ефекту на один із стовпів «зеленої» трансформації, дозволяючи монетизувати теплові втрати та створювати автономні енергоефективні системи майбутнього. Подальші дослідження мають концентруватися на пошуку ще ефективніших та екологічно безпечних термоелектричних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерук І. М. Загальний курс фізики : у 3 т. Т. 2. Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик. — Київ : Техніка, 2006. — 452 с.
2. Анатичук Л. І. Термоелектрика. Основні поняття та застосування / Л. І. Анатичук. — Чернівці : Інститут термоелектрики, 2003. — 256 с.
3. Snyder G. J. Complex thermoelectric materials / G. J. Snyder, E. S. Toberer // Nature Materials. — 2008. — Vol. 7, No. 2. — P. 105–114.
4. Rowe D. M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano / D. M. Rowe. — Boca Raton : CRC Press, 2018. — 1008 p.

Чмиря Микита Андрійович - студент групи 2ПІ-25б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, nikitacboy@gmail.com.

Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович - доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Chmyria Mykyta Andriiovych - student of the 2SE-25b group, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, nikitacboy@gmail.com.

Scientific supervisor: Martyniuk Volodymyr Valeriiovych - Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.