

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-36>
УДК 536.24

ЗАКОРДОНЕЦЬ ВОЛОДИМИР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0001-8190-448X>
e-mail: vladim21@gmail.com

КУЗЕМКО НАТАЛІЯ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0001-5112-8256>
e-mail: kuna@ukr.net

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ КОНВЕРТЕР НИЗЬКОПОТЕНЦІАЛЬНОЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Ключовим аспектом роботи є розрахунок електромагнітної потужності, електромагнітного моменту, частоти обертання ротора та ККД термоелектричного конвертера низькопотенціальної теплової енергії (ТЕК). Проведено оптимізацію цих параметрів у режимах максимальної електромагнітної потужності та максимального коефіцієнта корисної дії. Показано, що електромагнітна потужність квадратично збільшується зі зростанням різниці температури між джерелами тепла і холоду. Коефіцієнт корисної дії ТЕК знаходиться в інтервалі 1-3%, проте такий коефіцієнт корисної дії характерний для всіх теплових машин, що працюють при малому перепаді температур та використанні вторинного тепла.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, тепла машина, термоелектричний конвертер.

ZAKORDONETS VOLODYMYR

KUZEMKO NATALIYA

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

THERMOELECTRIC CONVERTER OF LOW-POTENTIAL HEAT ENERGY

Nature holds vast reserves of low-grade thermal energy, which are currently either underutilized or not used at all. Tapping into even a small fraction of this energy, even with a minor temperature difference between the heat source and cooler, could significantly reduce the fuel and energy deficit and lessen the economy's reliance on fossil fuels.

Low-grade energy sources are broadly categorized into two types: natural and anthropogenic. The former includes surface and groundwater, air, solar radiation, and similar sources. The latter encompasses wastewater from various industrial processes, hot air, and hot production waste. Overall, approximately 70% of the world's energy used in production and energy conversion is wasted. Therefore, the utilization and conversion of diffused low-grade thermal energy for reuse are highly relevant. This primarily involves developing new technologies and exploring novel thermodynamic cycles based on renewable energy sources (RES).

One promising avenue in energy-saving technologies is a heat engine with a thermoelectric cycle that converts low-grade thermal energy into rotational mechanical energy for a rotor. Its operation is based on the principle of interaction between the current generated by a short-circuited thermoelectric generator and a magnetic field. This magnetic field is created within the machine's rotor by a system of permanent magnets.

The paper analyzes the electromagnetic power, electromagnetic torque, rotor speed, and efficiency factor of the thermoelectric converter for low-potential heat energy (TEC). We optimized these parameters for both maximum electromagnetic power and maximum efficiency modes. The results show that the electromagnetic power increases quadratically with an increase in the temperature difference between the heat and cold sources. The TEC's efficiency ranges from 1-3%. However, this efficiency is typical for all heat engines operating with small temperature differentials and secondary heat is utilized.

Keywords: renewable energy sources, heat engine, thermoelectric converter.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 10.11.2025

Постановка проблеми

Дуже швидко, всього за ХХ століття, людство нераціонально витратило значні обсяги найціннішої сировини, що формувалася мільйони років, — нафти, газу та вугілля. Приблизно половина цих вуглеводнів була використана для виробництва тепла та пального для транспорту, що призвело до серйозних екологічних проблем. Зокрема, це спричинило забруднення води та повітря, а також завдало шкоди родючому шару ґрунту — гумусу. Видобуток і транспортування органічного палива також створюють значні труднощі. Однак, найбільшої шкоди довкіллю завдає саме його спалювання. Навіть спалювання відносно "чистого" газу виділяє в атмосферу безліч шкідливих речовин. Водночас у природі є величезні запаси низькопотенційної теплової енергії, яку можна повторно використовувати. Ці джерела поділяються на природні (природні води, повітря, ґрунт, сонячна радіація) та техногенні (повітря з систем вентиляції, охолоджувальні системи, стічні води та інші промислові води).

Енергетичний і температурний рівень цих джерел представлений у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця джерел низькопотенціальної теплової енергії

Природні джерела	Енергетичн. рівень (МВт)	Температ. рівень (°C)	Техногенні джерела	Енергетичн. рівень (МВт)	Температ. рівень (°C)
Поверхнева вода	0,9-51,6	4 - 18	Стічна вода	0,3 - 90	10 - 17
Ґрунтова вода	1-2	6 - 15	Технічна вода	2,4 - 10,6	15 - 30
Геотермальна вода	0,29-3	35 - 80	Технолог. вода	39,5 - 54,9	40 - 70
Повітря	0,3-18,4	-5 - 25	Повітря	10 - 38,4	25 - 50
Ґрунт	0,1-5,9	4 - 12			
Сонячна радіація	0,1-150	25 - 75			

Аналіз відомих результатів досліджень

Нітіноловий двигун складається з горизонтального колеса, закріпленого на вертикальній осі [1]. На кожній спиці колеса знаходиться підковоподібна петля з нітінолу. Принцип дії ґрунтується на термопружних мартенситних структурних перетвореннях. Коли петлі по черзі занурюються в гарячу воду, вони розгинаються, виділяючи механічну енергію, яка і приводить двигун у рух. Цей процес відбувається циклічно. В якості нагрівача та охолоджувача використовують резервуари з гарячою і холодною водою, або ж гарячу воду і навколишнє повітря. Однак, через свої конструктивні особливості нітінолові двигуни є стаціонарними. Це робить їх непридатними для використання на транспортних засобах.

П'єзоелектричний тепловий двигун також належить до теплових машин, що працюють з невеликим перепадом температур [2]. Цей тип двигуна перетворює теплову енергію на механічну роботу, використовуючи одночасно ефект пам'яті форми та п'єзоелектричний ефект. Двигун має ротор, що складається з радіально розташованих нітінолових важелів. Ці важелі з'єднані з п'єзоелементами через систему електродів. Ротор починає рухатися, коли п'єзоелементи періодично деформують нітінолові важелі. Незважаючи на інноваційний принцип, ці двигуни не набули широкого застосування через складність своєї конструкції.

Термоелектричний насос (ТЕН) — це теплова машина, яка перетворює теплову енергію електропровідної рідини на кінетичну енергію її потоку [3]. У ТЕН в одному пристрої поєднані електромагнітний насос і короткозамкнений термоелектричний генератор. Насос працює, використовуючи внутрішню теплову енергію гарячої електропровідної рідини, яку він перекачує. Таким чином, ТЕН по суті перетворює внутрішню теплову енергію рідини в механічну роботу. Ефективність ТЕН має ті самі термодинамічні обмеження, що й інші теплові машини.

Метою роботи є розробка напівпровідникового термоелектричного конвертера низькопотенційної теплової енергії, призначеного для перетворення теплової енергії з малим перепадом температур між нагрівачем і охолоджувачем у корисну роботу.

Постановка задачі та її розв'язання

Відомо, що для функціонування довільної теплової машини необхідні три основні компоненти: нагрівач, охолоджувач і робоче тіло. У пристроях, що використовують низькопотенційну теплову енергію, роль нагрівача можуть виконувати природні та техногенні джерела, а як охолоджувач зазвичай використовують глибинні шари води з водойм, річок, морів та океанів.

У стандартних теплових машинах корисну роботу отримують за рахунок розширення робочого тіла.

$$\delta A = p \cdot dV. \quad (1)$$

Роботу в термодинамічному циклі визначають шляхом інтегрування по контуру циклу:

$$A_c = \oint_C p(V) \cdot dV, \quad (2)$$

аналітичну залежність $p(V)$ визначають видом термодинамічного процесу.

Не все підведене тепло можна перетворити на корисну роботу; для цього придатна лише його певна частина. Ефективність низькопотенційної теплової енергії можна оцінити, розрахувавши її ексергію [4].

$$EX \leq Q_h \left(1 - \frac{T_h}{T_c}\right), \quad (3)$$

де Q_h - теплова потужність, яка підводиться до теплової машини від нагрівача, Q_c - теплова потужність, яку теплова машина передає охолоджувачу, T_h - температура нагрівача, T_c - температура охолоджувача. Знак рівності справедливий лише для рівноважного термодинамічного процесу.

Термоелектричний конвертер (ТЕК) — це твердотільна теплова машина, в якій функцію робочого тіла виконує електронний газ. У ТЕК електричний струм генерується за рахунок термоелектричного ефекту, що дозволяє перетворювати теплову енергію безпосередньо в електричну. Згідно з другим началом термодинаміки, електрична потужність, що генерується в ТЕК

$$W = (Q_h - Q_c) - \Delta U, \quad (4)$$

є різницею між підведеною тепловою енергією і зміною внутрішньої енергії електронного газу. Ця електрична потужність має дві складові, одна з яких пов'язана з рухом електронів проти дії термоелектричної електрорушійної сили Зебека [5], а інша — це потужність, що перетворюється на тепло Джоуля, тобто втрати на нагрівання самого пристрою.

У ТЕК зазвичай використовують короткозамкнений термоелектричний генератор з великою площею термоелементів і малим внутрішнім опором. Це дозволяє генерувати струм у кілька десятків ампер, незважаючи на низьку напругу (соті частки вольт) та малий опір навантаження (тисячні частки ома). Створений струм одразу ж споживається, перетворюючись на корисну роботу.

Короткозамкнений генератор має дві головні переваги. По-перше, він забезпечує вищий термодинамічний коефіцієнт корисної дії, оскільки втрати енергії в комутаційних та ізоляційних шарах значно менші. По-друге, він істотно знижує витрати на з'єднання сотень або тисяч термоелементів, що зазвичай потрібно для досягнення напруги десятки вольт для живлення споживачів [6].

Принцип роботи термоелектричного конвертера (ТЕК) проілюстровано на [рис.1](#). У ТЕК провідний феромагнітний ротор обертається всередині статора навколо осі. Магнітна система ротора створює постійне магнітне поле, яке перпендикулярне його площині. Струм, що генерується короткозамкнутим термоелементом, передається до осі обертання по провідній шині, а потім через низькоомні контакти з рідкого металу подається на ротор. Завдяки циліндричній формі ротора струм розтікається по ньому радіально. Взаємодія цього струму

з магнітним полем створює силу Ампера, яка приводить ротор в обертання. Напрямок обертання визначають за правилом правого гвинта, він залежить від напрямку струму в роторі та напрямку магнітної індукції B .

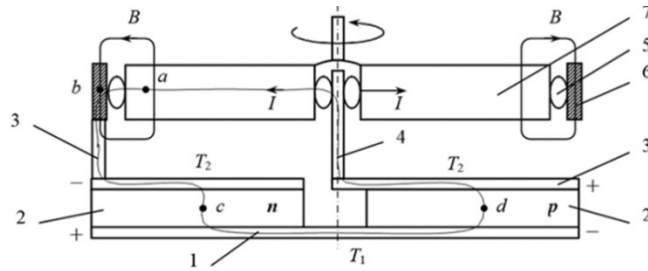


Рис. 1. Схема роботи термоелектричного конвертера низькопотенціальної теплової енергії: 1 – нагрівач; 2 – термоелементи; 3 – охолоджувач; 4 – вісь обертання; 5 – низькоомні рідкометалеві контакти; 6 – статор; 7 – ротор.

Індукована термо-ЕРС генератора частково зміншується із-за наявності внутрішнього опору ТЕК, а частково зрівноважується електрорушійною силою індукції Фарадея, яка виникає під час обертання ротора в магнітному полі. Ця сила спрямована проти термоелектричного струму, та частково його компенсує. Для розрахунку технічних параметрів конвертера використаємо еквівалентну електричну схему заміщення (рис.2).

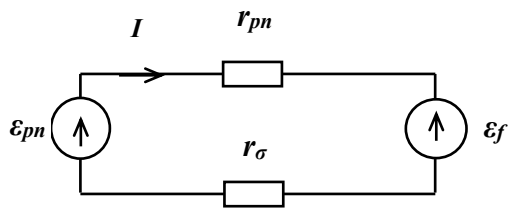


Рис. 2. Схема електричного кола ТЕК

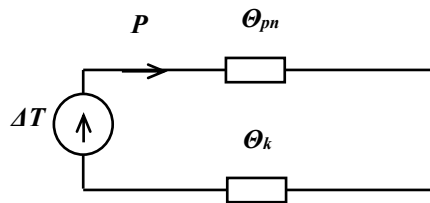


Рис. 3. Схема теплового кола ТЕК

Використовуючи другий закон Кірхгофа для електричної схеми ТЕК, запишемо рівняння електричної рівноваги (рис.2):

$$\varepsilon_{pn} - \varepsilon_f = I \cdot (r_{pn} + r_{\sigma}), \quad (5)$$

де $\varepsilon_{pn} = \alpha_{pn} \cdot \Delta T^*$ - термо-ЕРС, $\Delta T^* = T_1^* - T_2^*$ - перепад температури між спаями, α_{pn} - коефіцієнт термо-ЕРС термопари, $\varepsilon_f = \Phi \cdot n$ - ЕРС індукції Фарадея, $\Phi = B \cdot S$ - магнітний потік ротора, n - частота обертання ротора, I - струм, r_{pn} - опір термопари, r_{σ} - сумарний опір комутаційних шин, ротора та рідкометалевих контактів, $r_{pn} = r_p + r_n$ - електричний опір p - n пари, r_p і r_n - електричний опір віток n і p - типу провідності, r_{σ} - повний опір електричного кола.

Максимальна частота обертання ротора досягається, коли термо-ЕРС генератора повністю компенсується протидіючою ЕРС індукції. За таких умов струм I дорівнює нулю.

$$n_{max} = \frac{\alpha_{pn} \cdot \Delta T^*}{\Phi} \cdot \frac{\alpha_{pn} \cdot \Delta T}{\Phi \cdot (1 + m_{\kappa})}, \quad (6)$$

де $m_{\kappa} = \frac{\theta_{\kappa}}{\theta_{pn}}$, θ_{pn} - тепловий опір p - n пари, θ_p і θ_n - тепловий опір віток n і p - типу провідності, θ_{κ} - повний опір теплового кола, $\Delta T = T_1 - T_2$, T_1 - температура нагрівача, T_2 - температура охолоджувача.

Схема теплового кола ТЕК зображена на рис.3.

З рівняння (5), враховуючи (6), знайдемо струм в колі:

$$I = \frac{\alpha_{pn} \cdot \Delta T}{r_{pn} \cdot (1 + m_{\sigma}) \cdot (1 + m_{\kappa})} \cdot s, \quad (7)$$

$$s = \frac{n_{max} - n}{n_{max}}, \quad (8)$$

s - коефіцієнт навантаження, n_{max} - максимальна частота обертання ротора, $m_{\sigma} = \frac{r_{\sigma}}{r_{pn}}$.

З рівняння (7) випливає, що в режимі неробочого ходу, коли $n = n_{max}$, коефіцієнт навантаження $s = 0$ і буде збільшуватися при збільшенні навантаження на ротор. При гранично великому навантаженні, ротор зупиниться. При цьому коефіцієнт навантаження $s = 1$.

Електромагнітну потужність визначимо як добуток електрорушійної сили індукції на струм [5]:

$$P_{em} = \varepsilon_f \cdot I = \frac{(\alpha_{pn} \cdot \Delta T)^2}{r_{pn} \cdot (1 + m_{\sigma}) \cdot (1 + m_{\kappa})^2} \cdot s \cdot (1 - s), \quad (9)$$

Враховуючи (8) отримаємо вираз частоти обертання ротора:

$$n = \frac{\alpha_{pn} \cdot \Delta T}{\Phi \cdot (1 + m_{\kappa})} \cdot (1 - s). \quad (10)$$

Вираз електромагнітного моменту ТЕК:

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{\alpha_{pn} \cdot \Delta T \cdot \Phi}{2 \pi \cdot r_{pn} \cdot (1 + m_{\sigma}) \cdot (1 + m_{\kappa})} \cdot s. \quad (11)$$

Очевидно, що максимальний момент досягається при повній зупинці ротора ($s = 1$), а частота обертання буде максимальною в режимі неробочого ходу ($s = 0$).

ККД ТЕК знайдемо скориставшись виразом для ККД короткозамкнутого термоелектричного генератора [4]:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_1} \cdot \frac{s \cdot (1-s)}{(Z^* \cdot T_1)^{-1} + s}, \quad (12)$$

де Z^* - термоелектрична добротність напівпровідникового матеріалу.

Отже, ККД залежить від добротності напівпровідникового матеріалу та перепаду температур між нагрівачем та охолоджувачем і його значення складає 1-3 %.

Висновки

Перспективним напрямком енергозберігаючих технологій може стати нова теплова машина - термоелектричний конвертер теплової енергії (ТЕК), в якій низькопотенціальна теплова енергія перетворюється в механічну енергію обертання ротора. В роботі розраховано потужність, електромагнітний момент, частоту обертів ротора ТЕК та його ККД. Зроблена оптимізація цих технічних параметрів в режимах максимальної потужності і максимального ККД. Показано, що потужність ТЕК квадратично збільшується при збільшенні різниці температур між джерелами тепла і холоду. При збільшенні поперечного перерізу термоелементів потужність збільшується лінійно. Коефіцієнт корисної дії ТЕК знаходиться в інтервалі 1-3%, такий ККД характерний для всіх теплових машин, які працюють при малому перепаді температур.

Література

1. Study and Design of Nitinol Engine / Sanket M. Lahamge [та ін.]. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2018. Vol. 5, Iss. 09. P. 1500–1503.
2. Cengel, Y. A. Thermodynamics: An Engineering Approach / Y. A. Cengel, M. A. Boles, M. Kanoglu. 10th ed. New York : McGraw-Hill Higher Education, 2024.
3. Patel, V. K. Thermoelectric heat pump performance characterization : доповідь / Viral K. Patel, Kyle R. Gluesenkamp, Philip Boudreaux. 13th IEA Heat Pump Conference. Jeju, Korea, 2020. May 11–14. P. 2–8.
4. Borgnakke, C. Fundamentals of Thermodynamics / C. Borgnakke, R. E. Sonntag. 11th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2024.
5. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка : підручник для студентів енергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-ге вид., випр. Київ : Техніка, 2006. 320 с.
6. Анатичук Л. І. Термоелементи і термоелектричні пристрої. Київ : Наукова думка, 1979. 768 с.
7. Zakordonets V. S. Short-circuited semiconductor thermoelectric engine / V. S. Zakordonets, V. A. Stefansky. Journal of Thermoelectricity. 2003. № 4. P. 13–19.
8. Напівпровідниковий низькопотенціальний термоелектромеханічний перетворювач енергії / В. А. Андрійчук [та ін.]. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. Київ : ІЕД НАНУ, 2010. Вип. 27. С. 105–111.

References

1. Study and Design of Nitinol Engine / Sanket M. Lahamge [та ін.]. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2018. Vol. 5, Iss. 09. P. 1500–1503.
2. Cengel, Y. A. Thermodynamics: An Engineering Approach / Y. A. Cengel, M. A. Boles, M. Kanoglu. 10th ed. New York : McGraw-Hill Higher Education, 2024.
3. Patel, V. K. Thermoelectric heat pump performance characterization : доповідь / Viral K. Patel, Kyle R. Gluesenkamp, Philip Boudreaux. 13th IEA Heat Pump Conference. Jeju, Korea, 2020. May 11–14. P. 2–8.
4. Borgnakke, C. Fundamentals of Thermodynamics / C. Borgnakke, R. E. Sonntag. 11th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2024.
5. Buliandra, O. F. Tekhnichna termodynamika: pidruchnyk dlia studentiv enerhetychnykh spetsialnostei vyshchykh navchalnykh zakladiv (2nd ed., rev.). Kyiv: Tekhnika, 2006. 320 p.
6. Anatychuk, L. I. Termoelementy i termoelektrychni prystroi. Kyiv: Naukova dumka, 1979. 768 p.
7. Zakordonets V. S. Short-circuited semiconductor thermoelectric engine / V. S. Zakordonets, V. A. Stefansky. Journal of Thermoelectricity. 2003. № 4. P. 13–19.
8. Napivprovidnykovyi nyz'kopotentsialnyi termoelektromekhanichnyi peretvoriuvach enerhii / V. A. Andriichuk [et al.]. Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy: zbirnyk naukovykh prats. Kyiv: IED NANU, 2010. Iss. 27. P. 105–111.