

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Константинович І.А., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Кузь Р.В., канд. фіз.-мат. наук¹
Дервянко Т.В.^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет, ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна

МОЖЛИВОСТІ ЗНИЖЕННЯ ПИТОМОЇ ВАРТОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

У роботі наведено результати комп'ютерного моделювання термоелектричного генераторного модуля для рекуперації відходів тепла. Проаналізовано вплив висоти гілки модуля на його енергетичні й економічні показники. Бібл. 11, рис. 15.

Ключові слова: термоелектричний генераторний модуль, комп'ютерне моделювання, потужність, коефіцієнт корисної дії, питома вартість

Вступ

Термоелектрична продукція має великий потенціал. Зокрема, одним з варіантів його реалізації є генерація електричної енергії за допомогою рекуперації відходів тепла. Адже однією з актуальних проблем сучасності є велика кількість низькопотенційних теплових відходів, яка складає більше 70 % енергії, що використовується у світі. Це відходи від енергетичних станцій, важкої промисловості, автомобілів, літаків, кораблів (які використовують двигуни внутрішнього згорання), охолоджувальних систем (в промисловості, потужній комп'ютерній техніці), побутових приладів та ін. [1–3]. Температури таких відходів знаходяться у діапазоні, зручному для термоелектричного перетворення їх тепла у електричну енергію.

Основною складовою термоелектричного генератора (ТЕГ) є термоелектричні перетворювачі (модулі). Водночас, термоелектричний матеріал складає значну частину вартості термоелектричного модуля – біля 50 %. У наш час вартість серійно вироблених термоелектричних генераторних модулів, наприклад, таких як Ni-Z або Komatsu [4–5], досить висока – близько 10–20 \$/Вт, що є основною перешкодою на шляху до масового використання таких генераторних модулів. Тому актуальним є оптимізація використання матеріалів у термоелектричних модулях з метою здешевлення модуля за максимального збереження його ефективності [6]. Це призведе до зростання конкурентоспроможності виготовленої термоелектричної продукції.

Мета цієї роботи – комп'ютерне моделювання термоелектричного генераторного модуля та аналіз можливості зниження питомої вартості модулів завдяки оптимізації його конструкції.

1. Фізична модель

Для аналізу енергетичних характеристик термоелектричного генераторного модуля розглянемо фізичну модель, зображену на рис. 1.

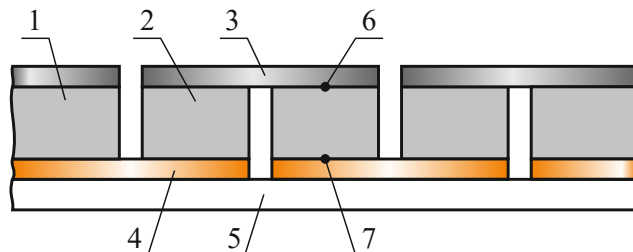


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного генераторного модуля:

1 – вітка n-типу; 2 – вітка p-типу; 3, 4 – електричні комутації; 5 – керамічна пластина;
 6, 7 – електричні контакти між вітками й комутаційними пластинами

Термоелектричний модуль складається з віток n-типу (1) і p-типу (2) провідності, які з'єднані в послідовне електричне коло за допомогою комутаційних пластин: гарячої (3) та холодної (4) сторін модуля. Електричні контакти (6) і (7) мають контактні опори, значення яких відрізняються для гарячої та холодної сторін. Основу модуля утворює керамічна пластина (5) на холодній стороні модуля, яка забезпечує механічну стабільність конструкції модуля.

Основні рівняння для знаходження розподілів температури, потенціалу й струму в тепло- і електропровідному середовищі з урахуванням термоелектричних ефектів отримуємо, виходячи із загальних законів збереження енергії й електричного заряду.

$$\operatorname{div} \vec{w} = 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

де \vec{w} – густина потоку енергії, \vec{j} – густина електричного струму.

$$\vec{w} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (3)$$

де \vec{q} – густина потоку тепла, U – електрохімічний потенціал.

Гуστину потоку тепла знаходимо з узагальненого закону теплопровідності

$$\vec{q} = -\kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (4)$$

де κ – питома теплопровідність, T – температура, α – коефіцієнт термоЕРС.

Густина електричного струму знаходиться з узагальненого закону електропровідності

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T, \quad (5)$$

де σ – питома електропровідність.

Підставивши (3)–(5) в (1), отримуємо рівняння для знаходження розподілу температури

$$-\nabla(\kappa \nabla T) = \sigma \nabla(\alpha T + U)(\nabla U + \alpha \nabla T). \quad (6)$$

З закону збереження електричного заряду (2) з використанням (5) отримуємо рівняння для визначення розподілу електричного потенціалу

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (7)$$

Рівняння (6), (7) утворюють систему диференціальних рівнянь в частинних похідних другого порядку зі змінними коефіцієнтами, яка описує розподіли взаємопов'язаних полів температури T й електричного потенціалу U в неоднорідному термоелектричному середовищі.

Особливість системи рівнянь (6), (7) полягає в тому, що кінетичні коефіцієнти α , σ та κ є функціями просторових координат x , y , z . Окрім того всі вони є залежними від температури T , яка в свою чергу також залежить від просторових координат. Така постановка задачі веде до застосування чисельних методів для знаходження її розв'язку.

У цій роботі комп'ютерне моделювання проведено на платформі COMSOL Multiphysics [7].

2. Результати комп'ютерного моделювання

У роботі розглядається конструкція термоелектричного модуля Altec-1061 виробництва Інституту термоелектрики (Україна) [8]. На її основі проведено аналіз електричних та енергетичних характеристик модуля в залежності від висоти гілки модуля для різних перепадів температур.

Конструкція термоелектричного модуля і його комп'ютерна модель представлені на рис. 2.

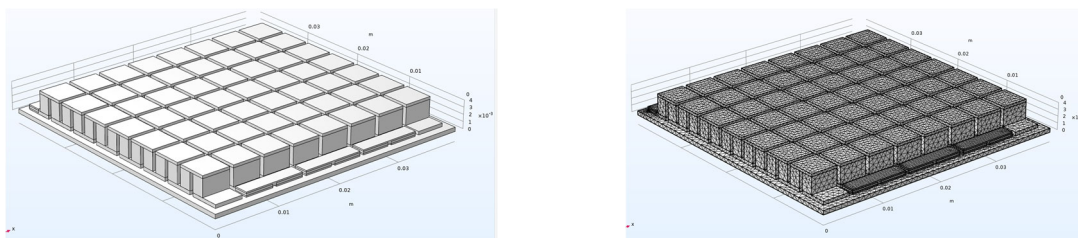


Рис. 2. Конструкція та сітка скінченних елементів термоелектричного модуля

Параметри термоелектричних матеріалів модуля – $\alpha_n(T)$, $\alpha_p(T)$, $\sigma_n(T)$, $\sigma_p(T)$, $\kappa_n(T)$, $\kappa_p(T)$ – коефіцієнти Зеебека, електропровідності й теплопровідності термоелектричного матеріалу n -типу й p -типу відповідно, отримано на розробленому в Інституті термоелектрики обладнанні [9].

Параметри інших конструктивних елементів отримано з паспортів виробників.

Використані граничні умови комп'ютерної моделі відповідають фізичній моделі, наведеній на рис. 1 та конструктивним рішенням, як показано на рис. 2.

Розподіл температури і електричного потенціалу

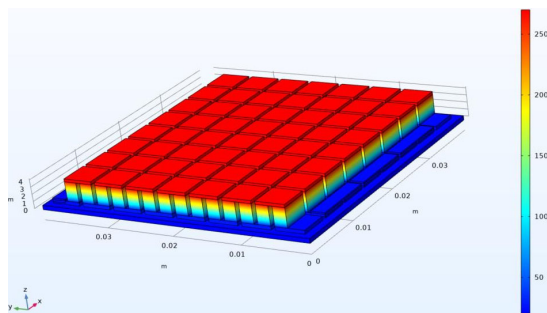


Рис. 3. Розподіл температури у термоелектричному модулі

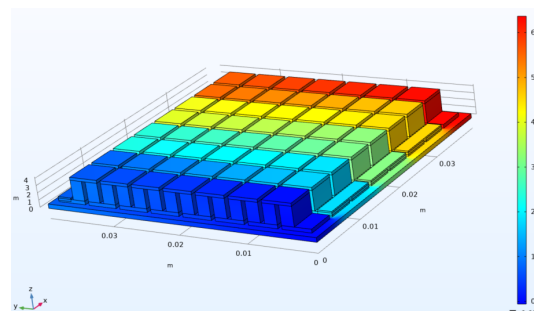


Рис. 4. Розподіл електричного потенціалу у термоелектричному модулі

На рис. 3–4 наведено приклади отриманих комп'ютерним моделюванням поля температури та електричного потенціалу в термоелектричному модулі. Ці дані дозволяють

розрахувати тепловий потік через модуль Q_h , ЕРС модуля у ненавантаженому стані ε , а також електричний струм через модуль I у навантаженому стані. Отримаємо електричну потужність модуля W та його коефіцієнт корисної дії η :

$$W = I \frac{\varepsilon}{2}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{W}{Q_h}. \quad (9)$$

Вплив висоти гілок термоелектричного модуля

Одним з важливих геометричних параметрів термоелектричного модуля є висота гілок. Зі зменшенням висоти гілок зменшується тепловий опір модуля, відповідно зростає тепловий потік через модуль і його електрична потужність. До того ж, пропорційно до висоти гілок зменшується витрата термоелектричного матеріалу – найдорожчого компонента термоелектричного модуля.

На рис. 5–12 наведено розраховані за допомогою комп'ютерного моделювання залежності потужності та ККД від висоти гілки h . Розрахунки зроблено для температур гарячої сторони в інтервалі 200–300 °С для різних температур холодної сторони.

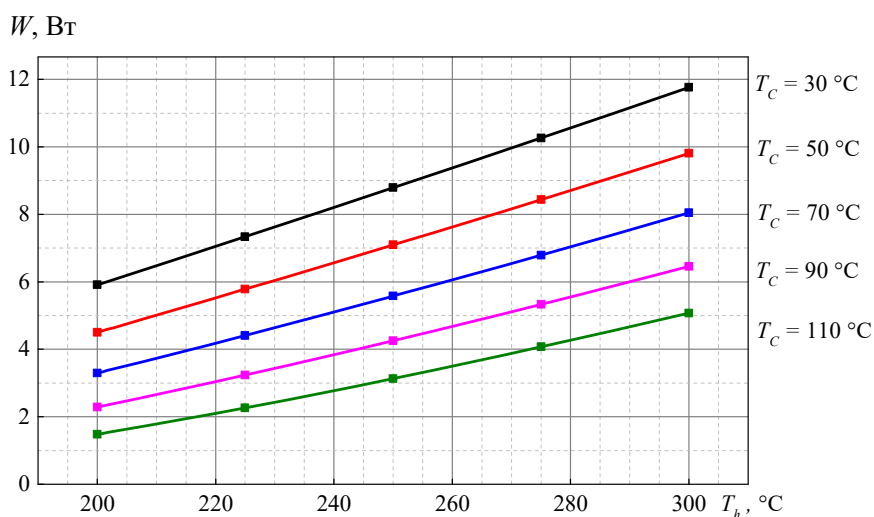


Рис. 5. Залежність потужності модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 3.2$ мм.

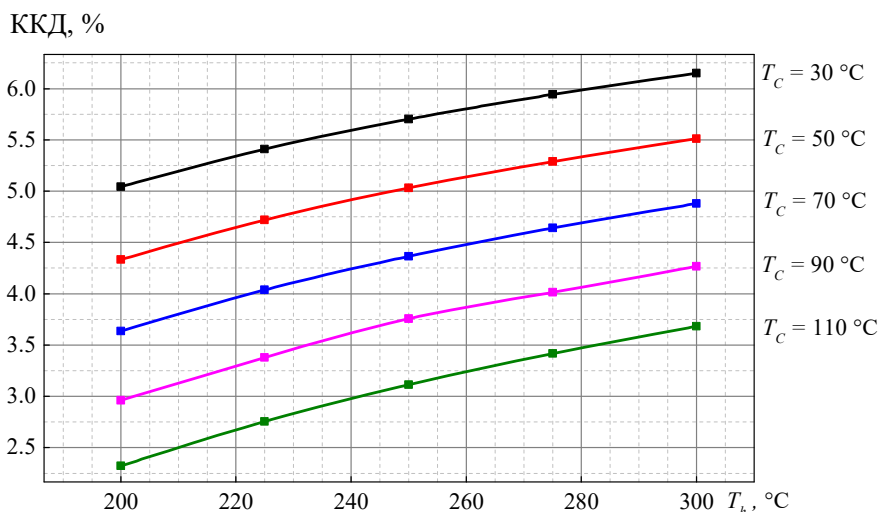


Рис. 6. Залежність ККД модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 3.2$ мм

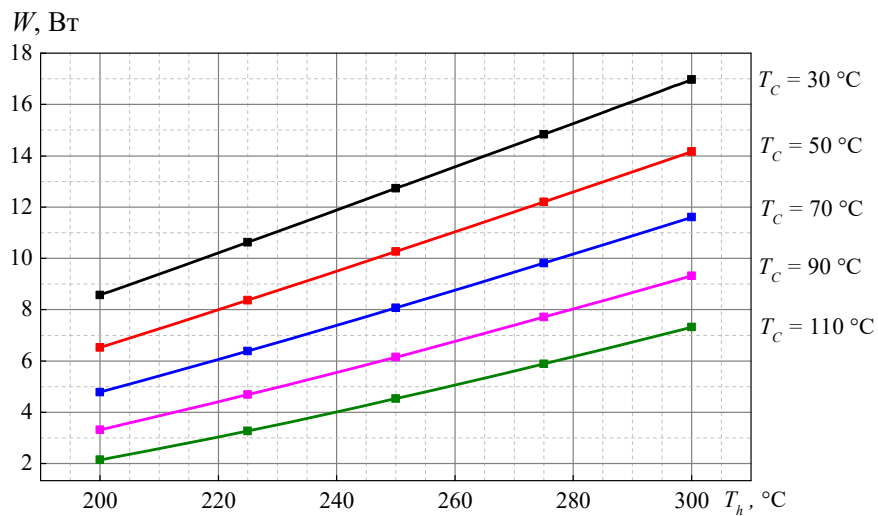


Рис. 7. Залежність потужності модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 2.1$ мм

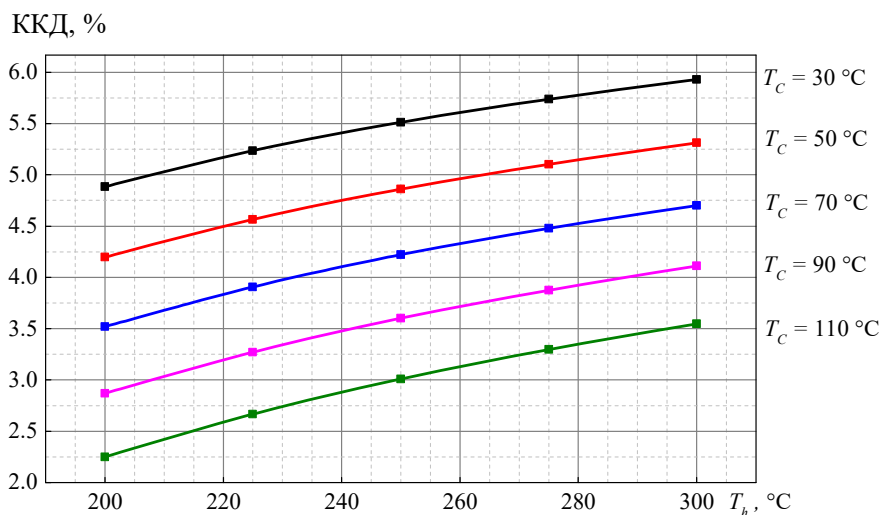


Рис. 8. Залежність ККД модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 2.1$ мм

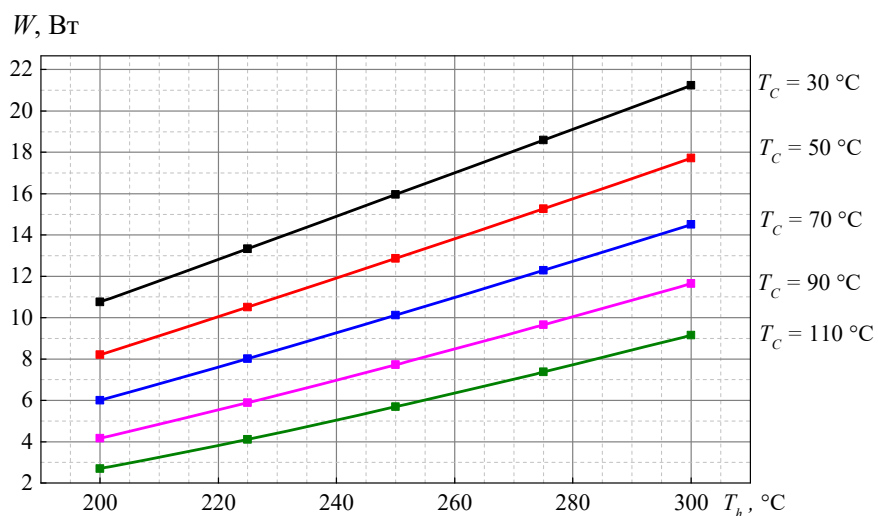


Рис. 9. Залежність потужності модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 1.6$ мм

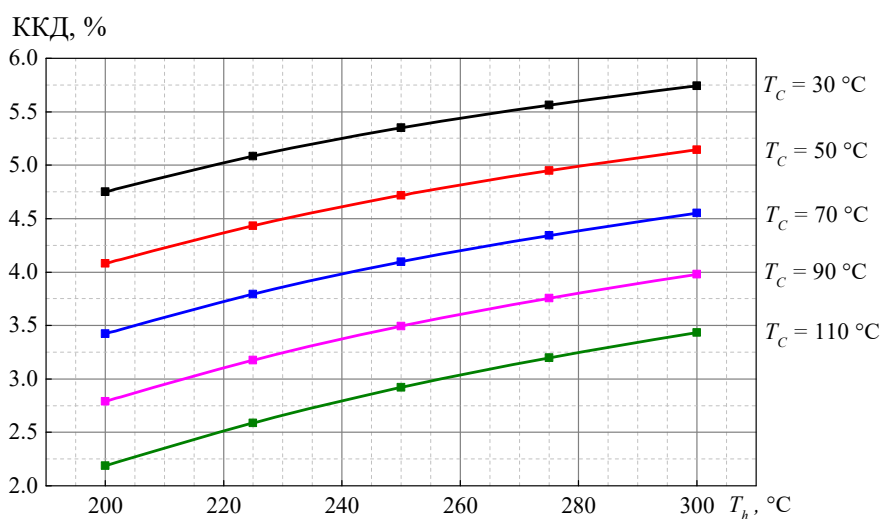


Рис. 10. Залежність ККД модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 1.6$ мм

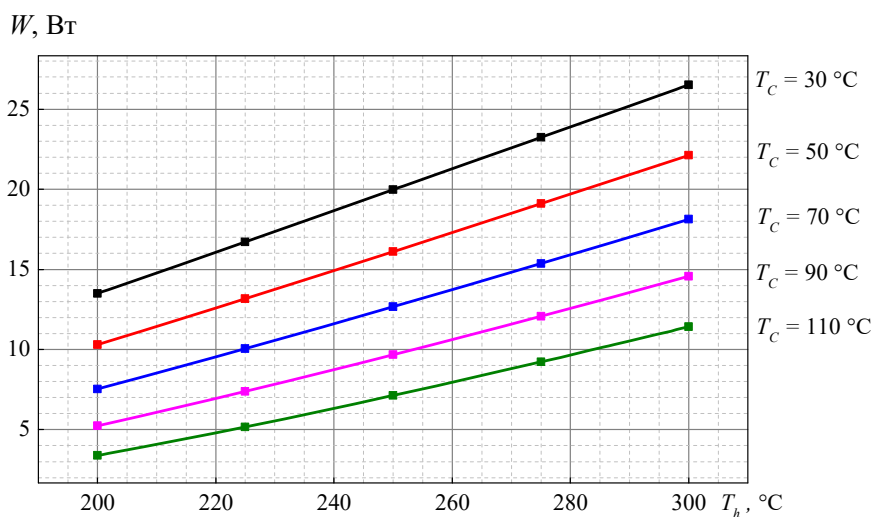


Рис. 11. Залежність потужності модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 1.2$ мм

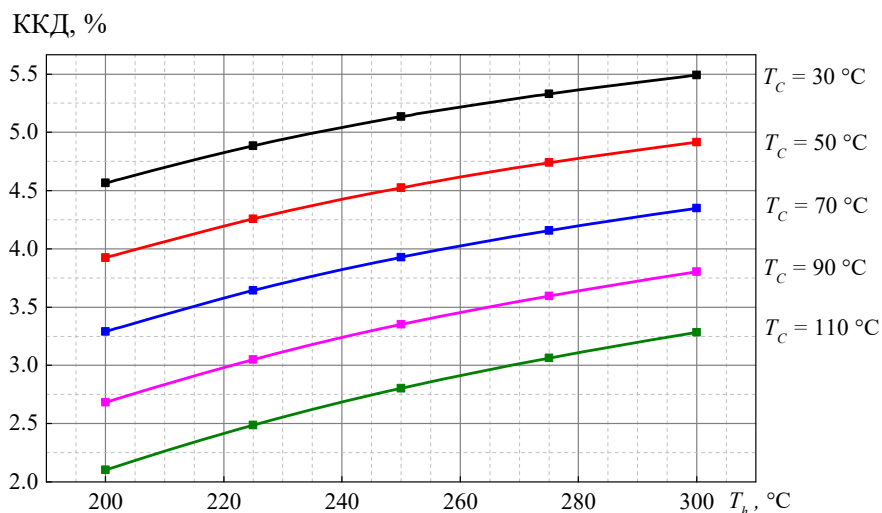


Рис. 12. Залежність ККД модуля від температури гарячої сторони для висоти гілки $h = 1.2$ мм

На рис. 12, 13 наведено залежності коефіцієнта корисної дії та електричної потужності від висоти гілки модуля для температури гарячої сторони 300 °С.

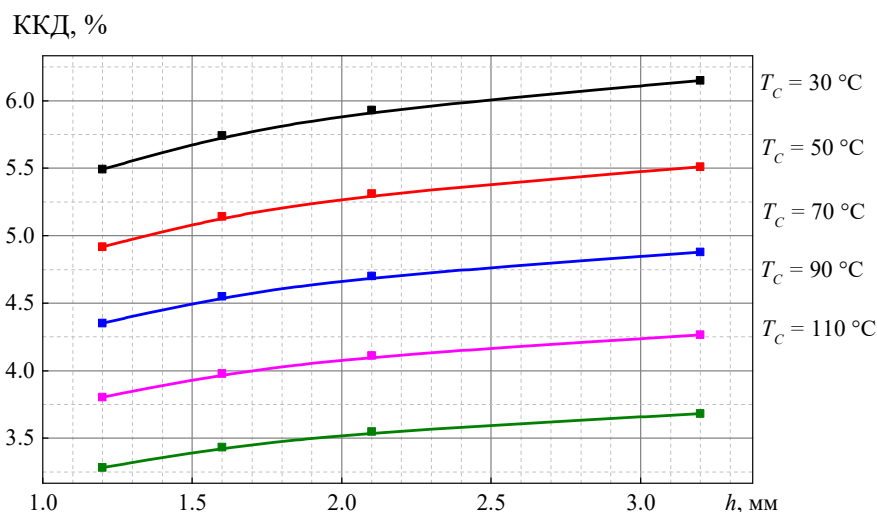


Рис. 13. Залежність ККД модуля від висоти гілки при $T_h = 300$ °C

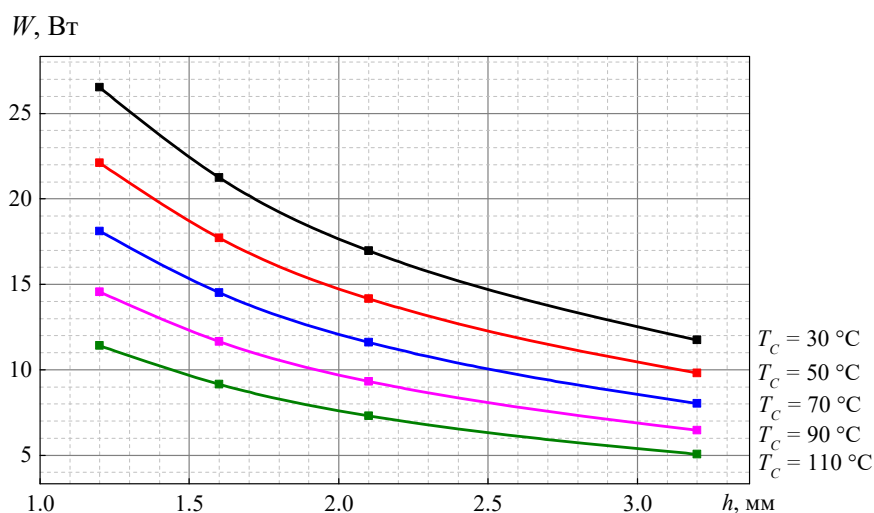


Рис. 14. Залежність потужності модуля від висоти гілки при $T_h = 300$ °C

Як видно з рис. 13 при зменшенні висоти гілки ККД модуля незначно спадає, проте, електрична потужність модуля зростає (рис. 14). Наприклад, при зменшенні висоти гілки у два рази електрична потужність модуля зростає в ~1.8 разів. Це загалом повинно вплинути на питому вартість термоелектричного модуля (USD /Вт).

Нехай P_0 – вартість модуля при стандартній висоті гілки $h_0 = 3.2$ мм, P – вартість модуля для довільної висоти гілки. P_R – відносна питома вартість модуля. Тоді

$$P_R = \frac{P/W}{P_0/W_0} = \left[1 - k_0 \left(1 + \frac{h}{h_0} \right) \right] \frac{W_0}{W}, \quad (10)$$

де $k_0 = \frac{P_0^m}{P_0}$, P_0^m – вартість термоелектричного матеріалу при висоті гілки h_0 . Тобто коефіцієнт k_0

вказує на вклад вартості термоелектричного матеріалу у загальну вартість модуля.

На рис. 15 наведено залежність питомої вартості модуля від висоти гілки по відношенню до початкової питомої вартості.

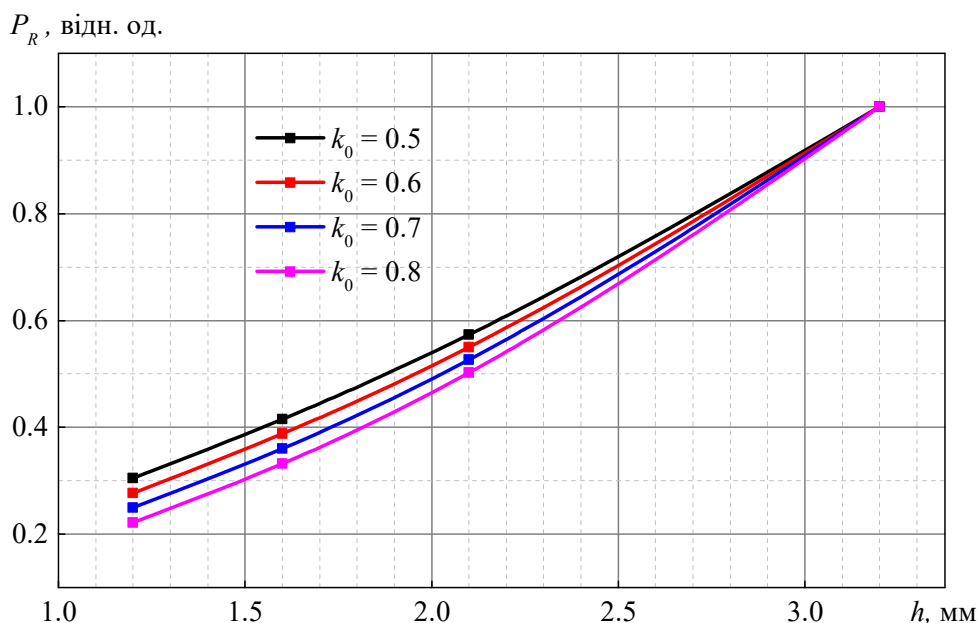


Рис. 15. Залежність відносної питомої вартості термоелектричного модуля від висоти його гілки ($T_h = 300$ °С, $T_c = 30$ °С, k_0 – вартість термоелектричного матеріалу відносно вартості модуля)

З рис. 15 видно, що зменшення висоти гілки термоелектричного модуля у 2 рази дозволяє значно знизити його питому вартість приблизно у 2.4–3 рази у залежності від того, яку частину вартості модуля складає вартість термоелектричного матеріалу.

Висновки

1. За допомогою комп'ютерного моделювання отримано енергетичні характеристики термоелектричного модуля Altec-1061 для його модифікацій з різною висотою гілки.
2. При збереженні площі модуля постійною найбільш вагомим параметром модуля є висота його гілки, яка значно впливає на енергетичні та економічні характеристики. При зменшенні висоти гілки модуля у два рази можливо підвищити його електричну потужність у ~ 1.8 рази. При цьому його питома вартість (USD / Вт) може впасти у 2.4–3 рази.

Література

1. International Energy Agency. (2023). *Energy technology perspectives*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
2. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., & Rozver Y.Y. (2012). Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 516–519.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
4. Konstantynovych I.A., Ivanochko M.M., Kadelnyk K.O., (2024) Design of a portable universal thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 78–89.
5. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024) Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 1). *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 90–96.
6. Hi-Z Technology, Inc. (n.d.). Hi-Z thermoelectric modules. Retrieved from <http://www.hi-z.com/hz2.php>

7. Komatsu Ltd. (2009). *Press release: Komatsu's thermoelectric generator technology*. Retrieved from <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/press/2009012714011528411.html>
8. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., & Hwang J.D. (2012). The energy and economic parameters of *Bi-Te* based thermoelectric generator modules for waste heat recovery. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 73–79.
9. COMSOL Multiphysics. (n.d.). *COMSOL Multiphysics reference manual*. Retrieved from <https://www.comsol.com>
10. Altec. (n.d.). *Altec 1060-1084-2 technical document*. Retrieved from <http://ite.cv.ua/wp-content/uploads/2021/12/Altec-1060-1084-2.pdf>
11. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 90–100.

Надійшла до редакції: 12.08.2024.

V.V. Lysko, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*^{1,2}
I.A. Konstantynovych, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*^{1,2}
R.V. Kuz, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*¹
T.V. Derevianko^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;
²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

POSSIBILITIES OF REDUCING THE SPECIFIC COST OF THERMOELECTRIC GENERATOR ENERGY CONVERTERS

The paper presents the results of computer simulation of a thermoelectric generator module for waste heat recovery. The influence of the module leg height on its energy and economic indicators is analyzed. Bibl. 11, Fig. 15.

Key words: thermoelectric generator module, computer simulation, power, efficiency, specific cost

References

1. International Energy Agency. (2023). *Energy technology perspectives*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
2. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., & Rozver Y.Y. (2012). Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 516–519.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
4. Konstantynovych I.A., Ivanochko M.M., Kadelnyk K.O., (2024) Design of a portable universal thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 78–89.
5. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024) Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 1). *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 90–96.

6. Hi-Z Technology, Inc. (n.d.). Hi-Z thermoelectric modules. Retrieved from <http://www.hi-z.com/hz2.php>
7. Komatsu Ltd. (2009). *Press release: Komatsu's thermoelectric generator technology*. Retrieved from <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/press/2009012714011528411.html>
8. Anatychuk L.I., Kuz R.V., & Hwang J.D. (2012). The energy and economic parameters of *Bi-Te* based thermoelectric generator modules for waste heat recovery. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 73–79.
9. COMSOL Multiphysics. (n.d.). *COMSOL Multiphysics reference manual*. Retrieved from <https://www.comsol.com>
10. Altec. (n.d.). *Altec 1060-1084-2 technical document*. Retrieved from <http://ite.cv.ua/wp-content/uploads/2021/12/Altec-1060-1084-2.pdf>
11. Anatychuk L.I., Lysko V.V., & Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 90–100.

Submitted: 12.08.2024.