

УДК 621.362

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Константинович І.А., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Гаврилюк М.В.,^{1,2}
Руснак О.С.¹

¹Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatysh@gmail.com

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ З РІЗНОЮ ВИСОТОЮ ВІТОК

У роботі наведено опис обладнання для дослідження параметрів термоелектричних генераторних модулів «Алтек-10002», розробленого в Інституті термоелектрики (Україна). Представлено результати експериментальних досліджень генераторних модулів зі зменшеною висотою віток термоелементів, з яких складається модуль. Показано, що висота віток може бути зменшена у 1.5–2 рази без істотного зниження ККД модуля. При цьому зменшенню висоти віток перешкоджає, в першу чергу, зростаючий вплив теплового опору теплопереходів між модулем і поверхнями джерела тепла та тепловідводу. Бібл. 24, рис. 7, табл. 1.

Ключові слова: термоелектричний модуль, генерація електричної енергії, вимірювання, ККД, електрична потужність, мініатюризація.

Вступ

Практично вся електронна апаратура, обладнання для технологічних процесів у промисловості, теплові машини (турбіни, двигуни внутрішнього згорання та інші), під час їх роботи, супроводжуються виділенням тепла, яке розсіюється в оточуюче середовище. Більше половини цього тепла не тільки ніяк не використовується, а й призводить до негативних наслідків для навколишнього середовища – до його термального забруднення [1–4]. При цьому більшість теплових відходів, понад 66 %, припадає на температуру до 230 °С, а ще 23 % – до 300 °С [5, 6]. Такий діапазон температур є сприятливим для рекуперації тепла за допомогою термоелектричного перетворення теплової енергії в електричну.

Перспективними є і автономні термоелектричні джерела електрики, які працюють з використанням тепла, що отримується при спалюванні різного пального. Такі джерела можуть мати високий ресурс роботи, володіють підвищеною надійністю та стійкістю до кліматичних і ударних навантажень, є універсальними, безшумними в роботі та зручними в експлуатації. Термоелектричні генератори електричною потужністю 2 – 20 Вт, які призначені для зарядки мобільних телефонів, MP3-плеєрів, навігаторів під час мандрівок та туристичних походів розроблено рядом компаній (TES, Biolite та ін.) [7–9].

Головною перепоною для широкого практичного використання термоелектричних перетворювачів енергії є їх відносно висока вартість, в першу чергу зумовлена високою ціною на термоелектричні матеріали, з якого вони виготовлені.

Одним зі шляхів зниження вартості термоелектричних модулів є їх мініатюризація, тому метою цієї роботи було проведення експериментальних досліджень впливу висоти віток на параметри генераторних термоелектричних модулів.

1. Опис вимірювального обладнання

Для дослідження параметрів термоелектричних генераторних модулів використано обладнання «Алтек-10002», яке розроблено в Інституті термоелектрики (Україна).

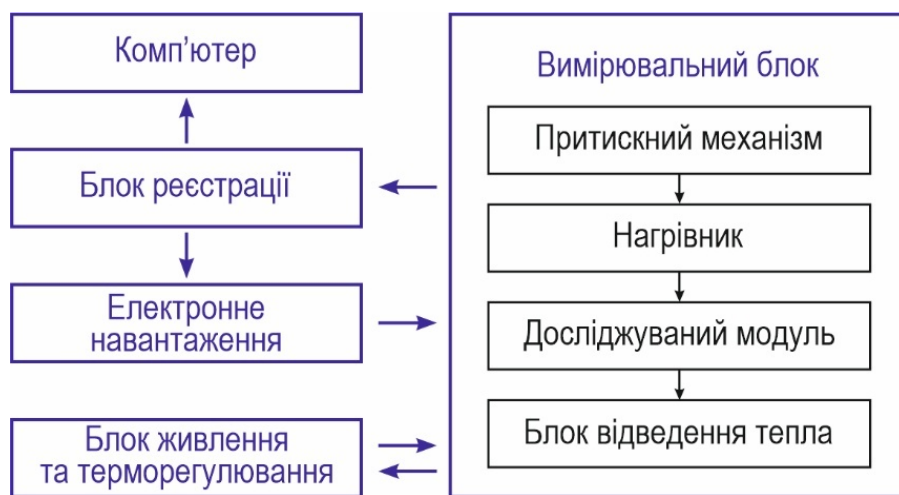


Рис. 1. Блок-схема обладнання для вимірювання параметрів генераторних термоелектричних модулів

Обладнання складається з вимірювального блоку, блоку реєстрації, блоку терморегулювання, поєднаного з блоком живлення, електронного навантаження та комп'ютера. Блок-схема обладнання наведена на рис. 1.

У свою чергу, вимірювальний блок містить притискний механізм, нагрівник та систему відведення тепла. Принципова схема вимірювального блоку наведена на рис. 2. Досліджуваний термоелектричний модуль 7 розташовується між двома тепловирівнюючими пластинами 5 і 8. До пластин з верхньої сторони примикає нагрівник 13, а з нижньої сторони – тепломір 4. У свою чергу, тепломір розташований на пластині 20, в яку вмонтований електричний нагрівник. Пластина розташована на рідинному холодному теплообміннику 1 з електрокерованим краном 22 в контурі охолоджуючої рідини. Нагрівник модуля 13 теплоізований від навколишнього середовища високотемпературною теплоізоляцією 12. Контроль і регулювання температур елементів блоку проводиться термопарами: термопарою 9 визначається температура нагрівника модуля; термопарою 16 визначається температура тепловирівнюючої пластини 8, що контактує з гарячою стороною модуля, а термопарою 18 – температура тепловирівнюючої пластини 5, що контактує з його гарячою стороною.

У конструкції вимірювального блоку передбачено центральний притиск модуля, яким забезпечується рівномірний розподіл зусилля по всій поверхні модуля.

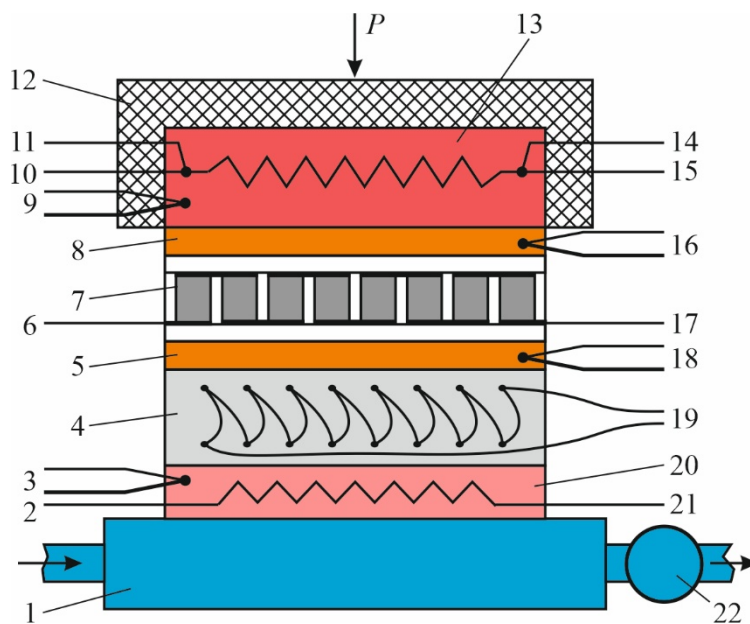


Рис. 2. Схема вимірювального блоку обладнання для вимірювання параметрів генераторних термоелектричних модулів:

- 1 – холодний теплообмінник; 2, 21 – виводи нагрівника холодного теплообмінника;
- 3 – термопара холодного теплообмінника; 4 – тепломір;
- 5, 8 – теплоірівнювальні пластини; 6, 17 – виводи генераторного модуля;
- 7 – досліджуваний генераторний модуль; 9 – термопара гарячого теплообмінника;
- 10, 15 – струмові виводи нагрівника гарячого теплообмінника;
- 11, 14 – потенціальні виводи нагрівника гарячого теплообмінника;
- 12 – теплова ізоляція; 13 – нагрівник; 16 – термопара гарячої сторони модуля;
- 18 – термопара холодної сторони модуля; 19 – виводи тепломіра;
- 20 – нагрівник холодного теплообмінника,
- 22 – електрокерований кран охолоджуючої рідини

Процес вимірювання зводиться до наступного. Спочатку, за допомогою холодного теплообмінника і нагрівника задається температура холодної частини модуля. Після цього проводиться розігрівання гарячого теплообмінника до необхідної температури. Після встановлення стаціонарного режиму (через ~ 15–20 хвилин) на контактах 6 та 17 проводиться вимірювання ЕРС модуля. Після підключення модуля до зовнішнього електричного навантаження через дію ефекту Пельтьє формується новий температурний режим, тому необхідно збільшення потужності нагрівника 13, для відновлення заданої гарячої температури, та збільшення відбору тепла холодним теплообмінником для відновлення заданої холодної температури. При цьому, температури гарячої і холодної поверхонь модуля підтримуються автоматично за допомогою терморегулятора у всіх режимах вимірювань. Температура холодної сторони модуля задається у діапазоні від 30 до 400 °С. Для температур вище 90 °С використовуються теплоізолюючі прокладки між тепломіром і теплоірівнюючою пластиною. Температура гарячої сторони може задаватись і підтримуватись у діапазоні від 50 до 600 °С.

Як електричне навантаження модулів в установці використовуються електронне навантаження, виготовлене на основі польових транзисторів, якими точно встановлюється необхідна величина струму. Для визначення ККД модуля визначається електрична потужність на цьому навантаженні. Також визначається тепловий потік, що пройшов через холодну частину модуля за допомогою тепломіра 4 та вхідний тепловий потік, як тепла потужність нагрівача

гарячого теплообмінника. Для визначення величини цієї потужності використовуються потенціальні контакти 11 і 14.

У блоці живлення та терморегулювання використано пропорційний інтегрально-диференціальний режим для регулювання температури з точністю ± 0.1 °С. Всі електричні вимірювання, а саме сигнали від термопар, електричні напруга і струм від модуля, потужність нагрівників та сигнал від тепломіра вимірюються блоком реєстрації і виводяться на екран з абсолютною похибкою $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ В.

Необхідно використовувати спеціальні методи для точного визначення теплових потоків. Тепловий потік, що виходить з модуля визначається досить точно за допомогою тепломіра. Його градування проводиться безпосередньо на установці шляхом використання еталонного електричного нагрівача. Застосовані спеціальні заходи для усунення втрат тепла з такого нагрівача. Для цього неробоча поверхня еталонного нагрівача була екранована додатковим електричним нагрівачем, на якому створюється температура – така як і на еталонному нагрівачі. Похибка у визначенні потужності еталонного нагрівача не перевищує 0.1 Вт. Для забезпечення зручності і точності вимірювань використовуються змінні тепломіри, площа яких близька до площі модуля, і змінні гарячі теплообмінники відповідних розмірів.

З урахуванням сукупності наведених вище підходів, похибка при визначенні теплового опору досліджуваного модуля та його ККД не перевищує 3 %.

Для знаходження параметрів і температурних залежностей модуля та подальшої обробки отриманих результатів блок реєстрації записує дані вимірів на карту пам'яті. Результати вимірювань передають до комп'ютера, для оформлення документації та паспортизації модулів.

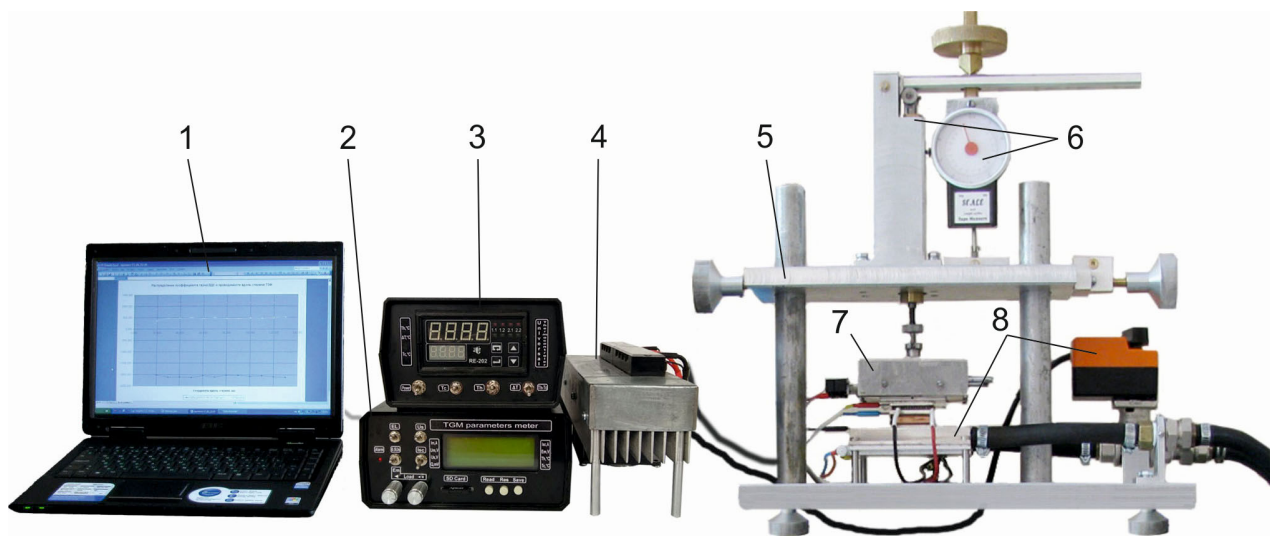


Рис. 3. Зовнішній вигляд обладнання «Алтек-10002» для дослідження параметрів термоелектричних генераторних модулів:

- 1 – комп'ютер; 2 – блок реєстрації; 3 – блок живлення та терморегулювання;
4 – електронне навантаження; 5 – вимірювальний блок; 6 – притискний механізм;
7 – нагрівник; 8 – блок відведення тепла

Зовнішній вигляд обладнання «Алтек-10002» для дослідження параметрів термоелектричних генераторних модулів наведено на рис. 3, а його технічні характеристики – у таблиці 1.

Технічні характеристики обладнання «Алтек-10002»
для дослідження параметрів термоелектричних генераторних модулів

| № з/п | Найменування характеристики | Значення |
|-------|--|---------------------------|
| 1 | Геометричні розміри досліджуваних модулів: - площа, мм ² - товщина, не більше, мм | 10 × 10 – 100 × 100 50 |
| 2 | Теплова потужність, що проходить крізь модуль, Вт | 0–500 |
| 3 | Температура гарячої сторони модуля, °С | 50–600 |
| 4 | Температура холодної сторони модуля, °С | 30–400 |
| 5 | Максимальна електрична напруга модуля, не більше, В | 30 |
| 6 | Інтервал вимірюваних струмів через модуль, А | 0–30 |
| 7 | Зусилля притиску модуля до теплообмінників, кг | 0–180 |
| 8 | Габарити (без комп'ютера), см | 70 × 40 × 40 |
| 9 | Маса, кг | 25 |
| 10 | Споживана електрична потужність від мережі змінного струму 220 В, 50–60 Гц, не більше, Вт | 700 |

2. Результати вимірювань

Для проведення досліджень залежностей ККД та потужності термоелектричних модулів від висоти віток термоелементів, з яких вони складаються, в Інституті термоелектрики (Україна) було виготовлено модулі типу «Алтек-1061» зі зменшеною висотою віток (рис. 4). Кожен з таких модулів містить 56 пар віток з термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te n*- та *p*-типу.

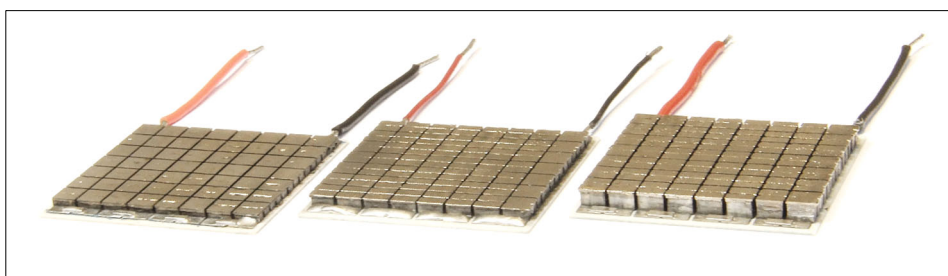


Рис. 4. Зовнішній вигляд досліджуваних термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з різною висотою віток

На рис. 5 – рис. 12 наведено результати вимірювань ККД та вихідної електричної потужності досліджуваних модулів для значень температур гарячої сторони від 200 °С до 300 °С і холодної – від 30 °С до 110 °С. Перевагою вимірювального обладнання «Алтек-10002» є те, що модуль досліджується у реальних умовах його експлуатації, у тому числі з наявністю теплового контактного опору між його поверхнями і поверхнями джерела тепла та тепловідводу. Температури T_z та T_x , наведені на рис. 5 – рис. 10, є температурами тепловирівнюючих пластин, розміщених між гарячою стороною модуля і нагрівником, а також холодною стороною модуля і тепломіром, відповідно, без введення поправок.

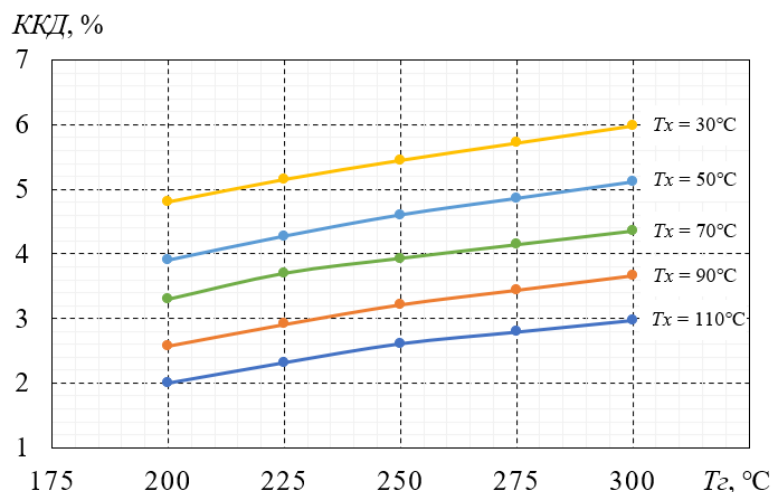


Рис. 5. Температурні залежності ККД термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 3.2 мм

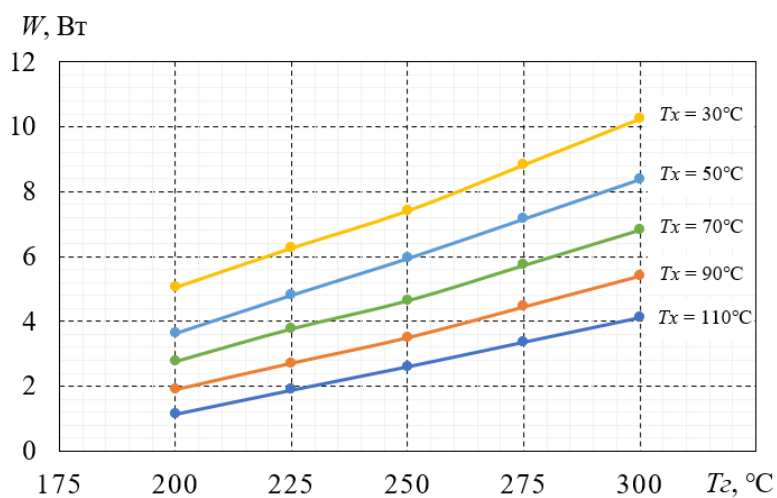


Рис. 6. Температурні залежності вихідної електричної потужності термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 3.2 мм

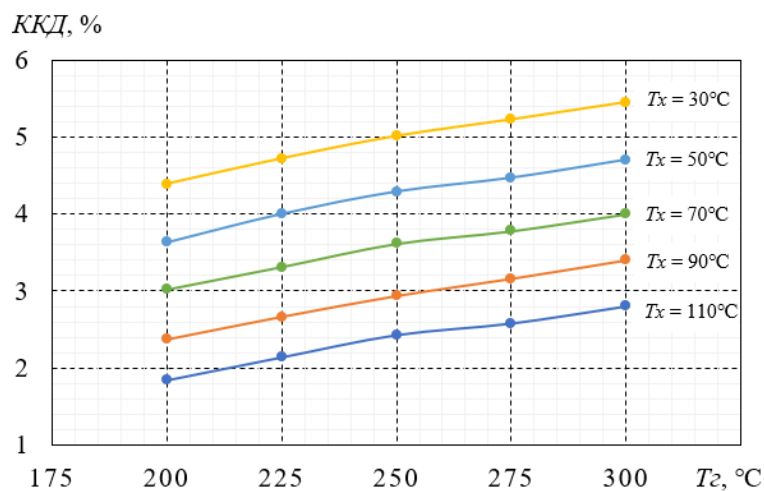


Рис. 7. Температурні залежності ККД термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 2.1 мм

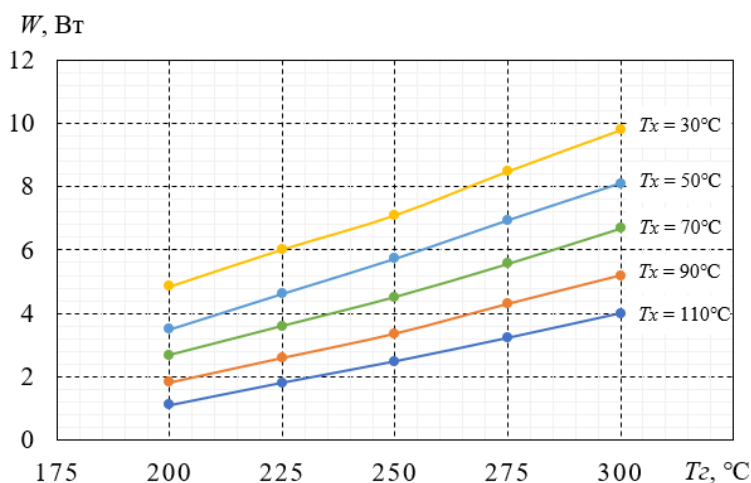


Рис. 8. Температурні залежності вихідної електричної потужності термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 2.1 мм

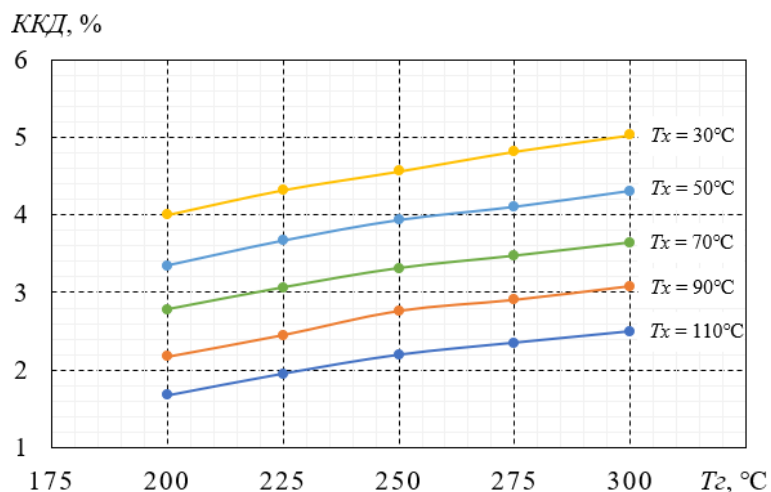


Рис. 9. Температурні залежності ККД термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 1.6 мм

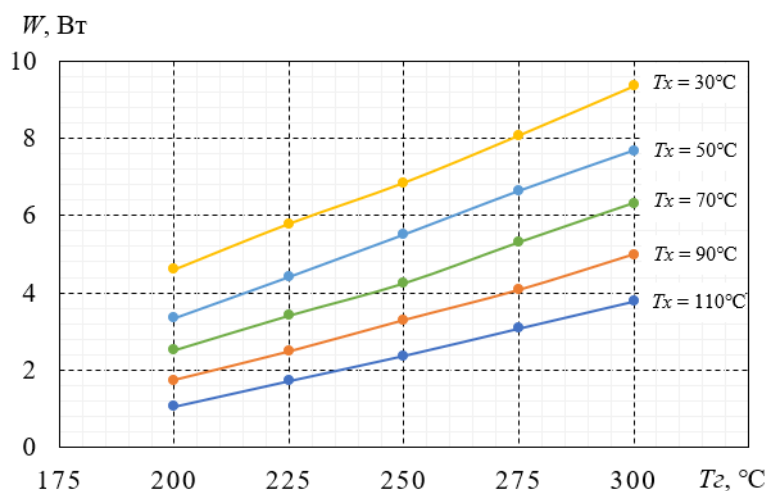


Рис. 10. Температурні залежності вихідної електричної потужності термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 1.6 мм

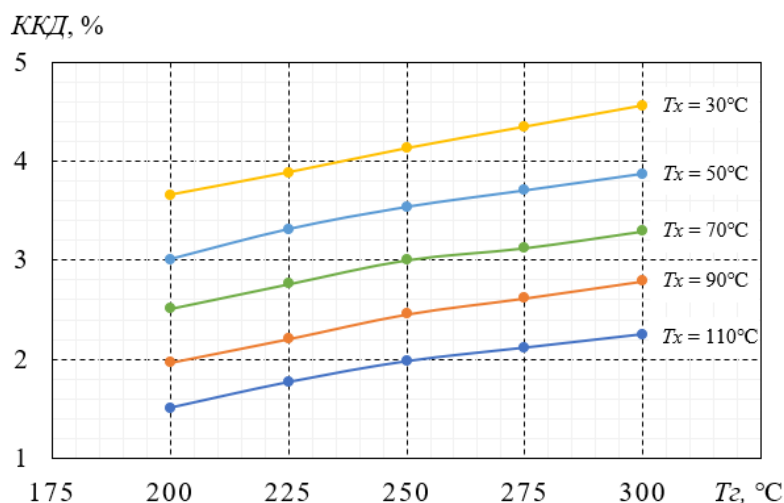


Рис. 11. Температурні залежності ККД термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 1.2 мм

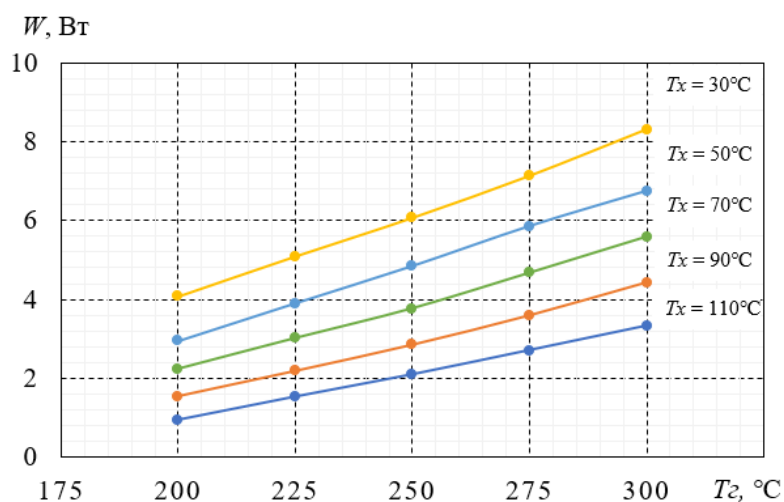


Рис. 12. Температурні залежності вихідної електричної потужності термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» з висотою віток 1.2 мм

Як видно з наведених залежностей, вихідна електрична потужність модуля при зменшенні висоти віток дещо знижується, хоча теоретично мала б зростати у зв'язку зі зменшенням електричного опору модуля. Причиною цього є зменшення термічного опору модуля, зростання теплового потоку через нього і, як наслідок, зростання впливу теплового опору теплопереходів між модулем і поверхнями джерела тепла та тепловідводу на реальний перепад температур на термоелементах. ККД модулів по мірі зменшення висоти віток, як і можна було очікувати, знижується.

На рис. 13 наведено залежність ККД термоелектричних модулів від висоти віток термоелементів, з яких вони виготовлені (при $T_2 = 300^\circ\text{C}$ і $T_x = 30^\circ\text{C}$). Як видно з рис. 13, навіть при зменшенні висоти віток у 1.5–2 рази ККД падає лише на 10–15 %.

Це свідчить про значний потенціал зниження собівартості виробленої електричної енергії шляхом мініатюризації модулів, оскільки, як відомо, основною частиною вартості термоелектричного перетворювача енергії є вартість термоелектричного матеріалу, з якого він виготовлений.

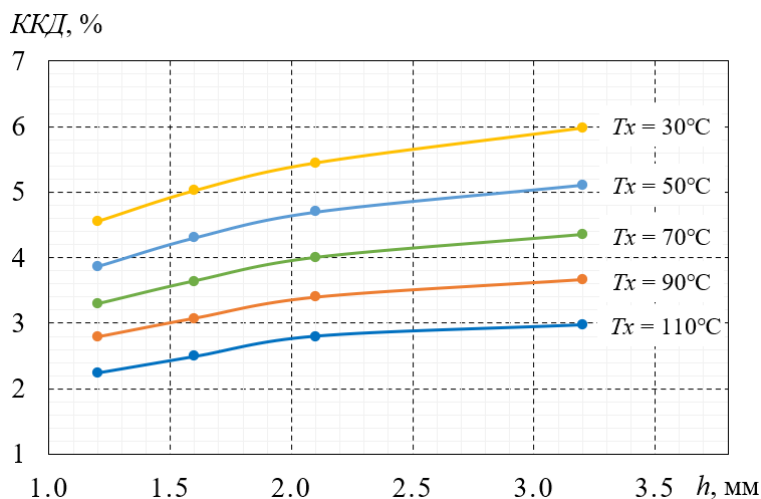


Рис. 11. Залежності ККД термоелектричних модулів типу «Алтек-1061» від висоти віток, з яких вони виготовлені (при $T_c = 300^\circ\text{C}$)

Висновки

1. Наведено опис конструкції обладнання «Алтек-10002» для дослідження параметрів термоелектричних генераторних модулів, його технічні характеристики та переваги.
2. Представлено результати вимірювань ККД та вихідної електричної потужності модулів типу «Алтек-1061» зі зменшеною висотою віток для значень температур гарячої сторони від 200 до 300 $^\circ\text{C}$ і холодної – від 30 до 110 $^\circ\text{C}$.
3. Показано, що навіть при зменшенні висоти віток у 1.5–2 рази ККД модуля падає лише на 10–15 %. Це свідчить про значний потенціал зниження собівартості виробленої електричної енергії шляхом мініатюризації термоелектричних модулів.

Література

1. U.S. Department of Energy. (2005, April 18–21). *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization: Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization*. USA: DOE.
2. European Commission. (n.d.). *Energy 2020: Roadmap 2050*. Retrieved from http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm
3. BCS, Incorporated. (2008). *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. USA.
4. Haddad C., et al. (2014). Some efficient solutions to recover low and medium waste heat: Competitiveness of the thermoacoustic technology. *Energy Procedia*, 50, 1056–1069.
5. Enescu D. (2022). Applications of thermoelectricity in buildings: From energy harvesting to energy management. In J. Littlewood, R.J. Howlett & L.C. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings 2022. SEB 2022. Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 336). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4_15
6. Anatychuk 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.
7. Anatychuk L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
8. d'Angelo M., Galassi C., & Lecis N. (2023). Thermoelectric materials and applications: A review. *Energies*, 16(17), 6409. <https://doi.org/10.3390/en16176409>
9. Rowe M.D., Min G., Williams S.G.K., Aoune A., Matsuura K., Kuznetsov V.L., & Li W.F. (1997). Thermoelectric recovery of waste heat: Case studies. In *Energy Conversion Engineering Conference*

- (Vol. 2, pp. 1075–1079).
10. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk, Y.I., & Konstantynovych I.A. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 2). *Journal of Thermoelectricity*, (3), 36–43.
 11. 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.
 12. Konstantynovych I.A., Ivanochko M.M., & Kadelnyk K.O. (2024). Design of a portable universal thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 78–89.
 13. Lysko V.V., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., & Derevianko T.V. (2024). Possibilities of reducing the specific cost of thermoelectric generator energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 44–52.
 14. Cherkez R.G. (2013). Energy characteristics of permeable thermoelements. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 1558–1563.
 15. Cherkez R.G. (2012). Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 439–442.
 16. Anatyshuk L.I., & Cherkez R.G. (2003). On the properties of permeable thermoelements. In *Proceedings of the International Conference on Thermoelectrics (ICT)* (pp. 480–483).
 17. Thermonamic. (n.d.). *TEG-BS-5W-5V-1*. https://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=887
 18. Thermonamic. (n.d.). *TEG-BS-10W-5V-2*. https://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=876
 19. BioLite. (n.d.). *CampStove Complete Cook Kit*. <https://www.bioliteenergy.com/products/campstove-complete-cook-kit>
 20. Anatyshuk L., & Havrylyuk M. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *Journal of Electronic Materials*, 40, 1292–1297. <https://doi.org/10.1007/s11664-011-1619-8>
 21. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., & Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2(2), 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>
 22. 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.
 23. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
 24. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., & Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 80–88.

Надійшла до редакції: 30.09.2024.

V.V. Lysko, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*^{1,2}
I.A. Konstantynovych, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*^{1,2}
M.V. Havryliuk,^{1,2}
O.S. Rusnak¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES
of Ukraine, 1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;
e-mail: anatyck@gmail.com

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PARAMETERS OF THERMOELECTRIC GENERATOR ENERGY CONVERTERS WITH DIFFERENT HEIGHT OF LEGS

The paper describes the equipment for studying the parameters of thermoelectric generator modules Altec-10002, developed at the Institute of Thermoelectricity (Ukraine). The results of experimental studies on generator modules with a reduced height of the thermoelement legs that make up the module are presented. It is shown that the height of the legs can be reduced 1.5–2 times without a significant decrease in the module efficiency. In this case, the reduction of the height of the legs is hindered, first of all, by the increasing influence of the thermal resistance of the heat spreaders between the module and the surfaces of the heat source and heat sink. Bibl 24, Fig. 7, Tabl. 1.

Key words: thermoelectric module, electric energy generation, measurement, efficiency, electric power, miniaturization.

References

1. U.S. Department of Energy. (2005, April 18–21). *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization: Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization*. USA: DOE.
2. European Commission. (n.d.). *Energy 2020: Roadmap 2050*. Retrieved from http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm
3. BCS, Incorporated. (2008). *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. USA.
4. Haddad C., et al. (2014). Some efficient solutions to recover low and medium waste heat: Competitiveness of the thermoacoustic technology. *Energy Procedia*, 50, 1056–1069.
5. Enescu D. (2022). Applications of thermoelectricity in buildings: From energy harvesting to energy management. In J. Littlewood, R.J. Howlett & L.C. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings 2022. SEB 2022. Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 336). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4_15
6. Anatyck 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.
7. Anatyck L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
8. d'Angelo M., Galassi C., & Lecis N. (2023). Thermoelectric materials and applications: A review. *Energies*, 16(17), 6409. <https://doi.org/10.3390/en16176409>
9. Rowe M.D., Min G., Williams S.G.K., Aoune A., Matsuura K., Kuznetsov V.L., & Li W.F. (1997). Thermoelectric recovery of waste heat: Case studies. In *Energy Conversion Engineering Conference* (Vol. 2, pp. 1075–1079).
10. Anatyck L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk, Y.I., & Konstantynovych I.A. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 2). *Journal of Thermoelectricity*, (3), 36–43.
11. Anatyck 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.

12. Konstantynovych I.A., Ivanochko M.M., & Kadelnyk K.O. (2024). Design of a portable universal thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 78–89.
13. Lysko V.V., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., & Derevianko T.V. (2024). Possibilities of reducing the specific cost of thermoelectric generator energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 44–52.
14. Cherkez R.G. (2013). Energy characteristics of permeable thermoelements. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 1558–1563.
15. Cherkez R.G. (2012). Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 439–442.
16. Anatyshuk L.I., & Cherkez R.G. (2003). On the properties of permeable thermoelements. In *Proceedings of the International Conference on Thermoelectrics (ICT)* (pp. 480–483).
17. Thermonamic. (n.d.). *TEG-BS-5W-5V-1*. https://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=887
18. Thermonamic. (n.d.). *TEG-BS-10W-5V-2*. https://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=876
19. BioLite. (n.d.). *CampStove Complete Cook Kit*. <https://www.bioliteenergy.com/products/campstove-complete-cook-kit>
20. Anatyshuk L., & Havrylyuk M. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *Journal of Electronic Materials*, 40, 1292–1297. <https://doi.org/10.1007/s11664-011-1619-8>
21. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., & Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2(2), 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>
22. 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.
23. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
24. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., & Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 80–88.

Submitted: 30.09.2024.