



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*^{1,2}
Лисько В.В. *канд. фіз.-мат. Наук*^{1,2}

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна



Лисько В.В.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ У СКЛАДІ ГЕНЕРАТОРНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Запропоновано методику визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів. Розглянуто детальну фізичну модель цієї методики та наведено результати оцінки можливих величин похибок. Досліджено ефективність застосування різних методів зниження похибок, зокрема застосування градієнтних радіаційних екранів та теплових ключів. Бібл. 9, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: вимірювання, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, добротність, термоелектричний модуль.

Вступ

Подальший прогрес у термоелектриці у значній мірі залежить від якості термоелектричного матеріалу, яка визначається добротністю матеріалу Z , від якої залежить ефективність термоелектричних перетворювачів енергії – ККД генераторів, максимальний перепад температур та холодильний коефіцієнт охолоджувачів, опалювальний коефіцієнт нагрівачів.

При цьому найбільш ефективними є експериментальні методи оптимізації матеріалу, які зводяться до створення набору зразків матеріалів різного складу та з різними концентраціями домішок, вимірювання їх електропровідності, термоЕРС, теплопровідності та визначення добротності Z . У цій процедурі вирішальну роль відіграє коректне вимірювання цих параметрів матеріалів.

Попередні дослідження [1-7], проведені в Інституті термоелектрики НАН та МОН України, дозволили розробити методи та створити апаратуру для точного визначення абсолютним методом властивостей термоелектричних матеріалів, точність якої перевищує точність світових аналогів у 3-5 разів.

Важливою залишається задача створення вимірювального обладнання для дослідження параметрів матеріалів у складі готових термоелектричних перетворювачів енергії. Ця інформація є необхідною як для оптимізації термоелектричного матеріалу для конкретних його застосувань, так і для вдосконалення конструкції самих термоелектричних перетворювачів, покращення технології

створення комутаційних переходів, а також розширення можливостей контролю якості готової продукції.

Найбільш підходящим для вирішення цієї задачі є абсолютний метод вимірювання параметрів генераторних термоелектричних модулів та обладнання «АЛТЕК-10002» на його основі [8].

Метою цієї роботи є розробка методики визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів, оцінка можливих величин похибок цієї методики та визначення умов їх мінімізації.

Опис методики визначення σ , α , κ , Z матеріалу віток при вимірюванні параметрів генераторного термоелектричного модуля

Методика, що пропонується для визначення усереднених значень σ , α , κ , Z матеріалу віток, з яких складається модуль, полягає у наступному:

- визначення електропровідності σ за виміряними значеннями опору модуля на змінному струмі та відомій конструкції модуля;
- визначення коефіцієнту ЕРС α за виміряними значеннями ЕРС модуля та перепаду температур між нагрівником та тепловідводом;
- визначення теплопровідності κ за виміряними значеннями теплового потоку через модуль (за допомогою тепломіра) та перепаду температур між нагрівником та тепловідводом.

Усереднені значення електропровідність, термоЕРС, теплопровідності та добротності матеріалу віток термоелектричного модуля визначаються за формулами

$$\sigma = \frac{1}{R_M / 2N} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{E / 2N}{(T_{z_0} - T_{x_0})}, \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{Q / 2N}{(T_{z_0} - T_{x_0})} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1}, \quad (3)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (4)$$

де R_M – опір модуля, виміряний на змінному струмі; $a_1 \times b_1$ – переріз віток; h_1 – висота віток; N – кількість пар; E – ЕРС модуля; T_{z_0} – температура на тепловирівнюючій пластині, що розташована на гарячій стороні модуля; T_{x_0} – температура на тепломірі, що розташований на холодній стороні модуля; Q – тепловий потік, через модуль, виміряний тепломіром.

Однак отримані за формулами (1) - (4) значення σ , α , κ , Z будуть неточними, оскільки у цих формулах не враховано перепади температур між нагрівником (холодильником) і модулем, перепади температур на керамічних пластинах та комутації, контакті та комутаційні електричні опори, втрати тепла в оточуюче середовище шляхом конвекції, випромінювання та через провідники термпар та струмові провідники модуля тощо. Для оцінки можливих величин похибок необхідно розглянути детальну фізична модель вимірювань, що наведена на рис. 1.

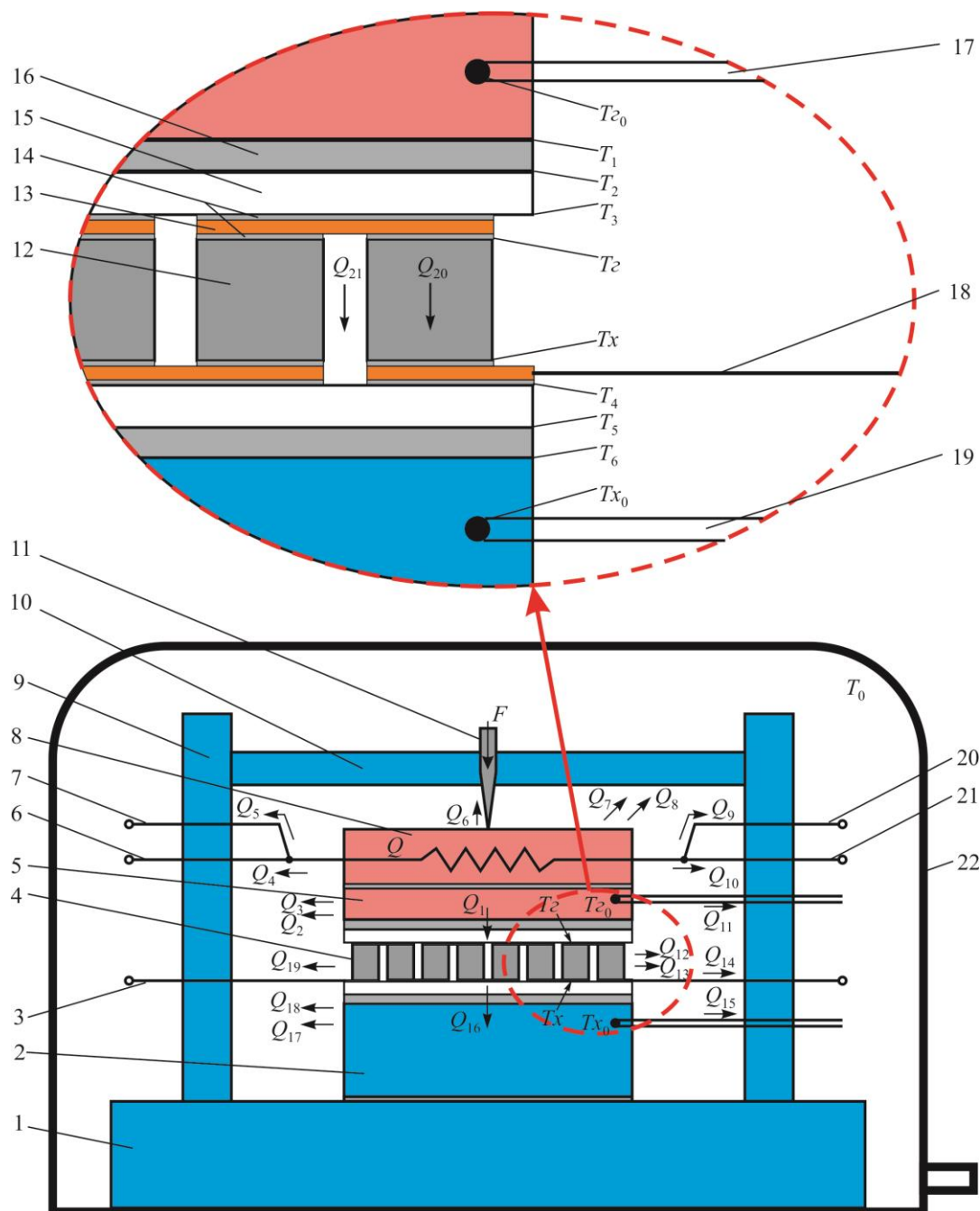


Рис. 1 – Схема визначення термоелектричних параметрів матеріалів при вимірюванні параметрів генераторних термоелектричних модулів:

- 1 – пристрій для забезпечення необхідної «холодної» температури модуля;
- 2 – тепломір; 3, 18 – струмовиводи модуля; 4 – модуль; 5 – теплоірівнююча пластина;
- 6, 21 – струмові провідники нагрівника; 7, 20 – потенціальні провідники нагрівника;
- 8 – нагрівник модуля; 9 – стійки притискного механізму; 10 – планка притискного механізму;
- 11 – притискний гвинт; 12 – вітки матеріалу; 13 – комутаційні пластини;
- 14 – електричні контактні опори; 15 – керамічні пластини; 16 – теплові контактні опори;
- 17, 19 – терморари; 22 – вакуумний ковпак.

На рис. 1: Q – тепло, що виділяється нагрівником 8; Q_1 – тепло, що передається від нагрівника 8 до «гарячої» сторони модуля 4; Q_2 – тепло, що передається від теплоірівнюючої пластини 5 у

оточуюче середовище шляхом конвекції; Q_3 – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 5 у оточуюче середовище шляхом випромінювання; Q_4, Q_{10} – тепло, що передається від нагрівника 8 у оточуюче середовище через струмові провідники нагрівника; Q_5, Q_9 – тепло, що передається від нагрівника 8 у оточуюче середовище через потенціальні провідники нагрівника; Q_6 – тепло, що передається від нагрівника 8 у оточуюче середовище через притиск модуля; Q_7 – тепло, що передається від нагрівника 8 у оточуюче середовище шляхом конвекції; Q_8 – тепло, що передається від нагрівника 8 у оточуюче середовище шляхом випромінювання; Q_{11} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 5 у оточуюче середовище через провідники термопари 17; Q_{12} – тепло, що передається від модуля 4 у оточуюче середовище шляхом конвекції; Q_{13} – тепло, що передається від модуля 4 у оточуюче середовище шляхом випромінювання; Q_{14}, Q_{19} – тепло, що передається від модуля 4 у оточуюче середовище через струмові провідники модуля 3 та 18; Q_{15} – тепло, що передається від тепломіра 2 у оточуюче середовище через провідники термопари 19; Q_{16} – тепло, що передається від «холодної» сторони модуля 4 до тепломіра 2; Q_{17} – тепло, що передається від тепломіра 2 у оточуюче середовище шляхом конвекції; Q_{18} – тепло, що передається від тепломіра 2 у оточуюче середовище шляхом випромінювання; Q_{20} – тепло, що пройшло через вітки 13 модуля; Q_{21} – тепло, що передалось від «гарячої» кераміки до «холодної» в зазорі між вітками.

Ефективними засобами зменшення величин наведених вище теплових потоків є градієнтний тепловий екран та теплові ключі на всіх провідниках та притиску (рис. 2).

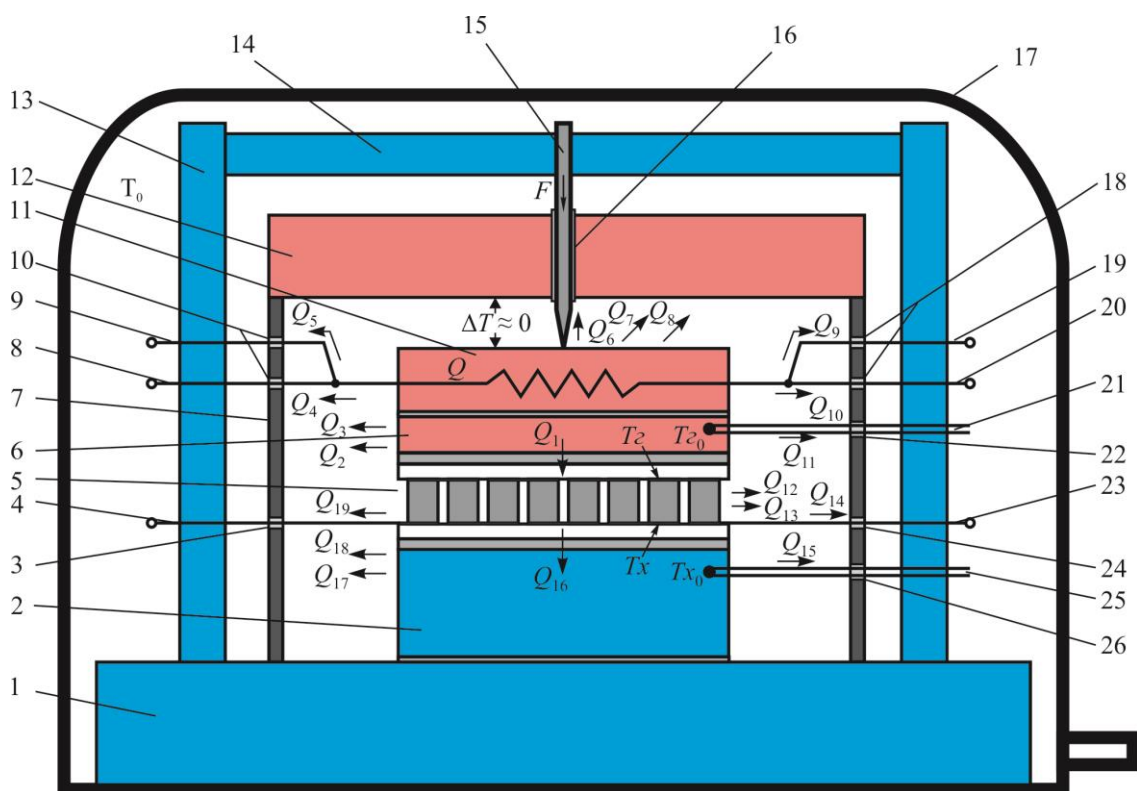


Рис. 2 – Схема визначення термоелектричних параметрів матеріалів при вимірюванні параметрів генераторних термоелектричних модулів з використанням теплових ключів та радіаційного екрану:

- 1 – пристрій для забезпечення необхідної «холодної» температури модуля; 2 – тепломір;
- 3, 10, 16, 18, 22, 24, 26 – теплові ключі; 4, 23 – струмовиводи модуля; 5 – модуль; 6 – тепловирівнююча пластинка; 7 – градієнтний радіаційний екран; 8, 20 – струмові провідники нагрівника; 9, 19 – потенціальні провідники нагрівника; 11 – нагрівник модуля; 12 – нагрівник екрану; 13 – стійки притискного механізму; 14 – планка притискного механізму; 15 – притискний гвинт; 17 – вакуумний ковпак; 21, 25 – термопари.

На рис. 2: Q – тепло, що виділяється нагрівником 11; Q_1 – тепло, що передається від нагрівника 11 до «гарячої» сторони модуля 5; Q_2 – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до екрану 7 шляхом конвекції; Q_3 – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до екрану 7 шляхом випромінювання; Q_4, Q_{10} – тепло, що передається від нагрівника 11 до екрану 7 через струмові провідники нагрівника; Q_5, Q_9 – тепло, що передається від нагрівника 11 до екрану 7 через потенціальні провідники нагрівника; Q_6 – тепло, що передається від нагрівника 11 до екрану 7 через притиск модуля; Q_7 – тепло, що передається від нагрівника 11 до екрану 7 шляхом конвекції; Q_8 – тепло, що передається від нагрівника 11 до екрану 7 шляхом випромінювання; Q_{11} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до екрану 7 через провідники термопари 21; Q_{12} – тепло, що передається від модуля 5 до екрану 7 шляхом конвекції; Q_{13} – тепло, що передається від модуля 5 до екрану 7 шляхом випромінювання; Q_{14}, Q_{19} – тепло, що передається від модуля 5 до екрану 7 через струмові провідники модуля 4 та 23; Q_{15} – тепло, що передається від тепломіра 2 до екрану 7 через провідники термопари 25; Q_{16} – тепло, що передається від «холодної» сторони модуля 5 до тепломіра 2; Q_{17} – тепло, що передається від тепломіра 2 до екрану 7 шляхом конвекції; Q_{18} – тепло, що передається від тепломіра 2 до екрану 7 шляхом випромінювання.

Оцінка можливих величин похибок запропонованої методики

Похибки при визначенні електропровідності.

При визначенні усередненого значення електропровідності віток термоелектричного модуля визначається за формулою (1) використовується загальний опір модуля R_M , виміряний на змінному струмі, який крім опору віток R_1 , включає у себе також комутаційний опір R_2 , контактний опір R_3 та опір струмових провідників R_4

$$R_M = R_1 + R_2 + R_3 + R_4. \quad (5)$$

Для оцінки можливих похибок, як приклад використано параметри термоелектричного генераторного модуля типу Altec-1061:

- кількість пар – $N = 56$;
- висота віток $h_1 = 3$ мм;
- переріз віток $a_1 \times b_1 = 1.8$ мм x 4.2 мм;
- товщина кераміки $h_2 = 0.65$ мм;
- площа кераміки $a_2 \times b_2 = 40$ мм x 40 мм;
- товщина комутації $h_3 = 0.25$ мм;
- електропровідність матеріалу віток $\sigma = 2000$ Ом⁻¹·см⁻¹.

Для наведених значень геометрії модуля та властивостей матеріалів: $R_1 = 0.222$ Ом; $R_2 \approx 0.004$ Ом; $R_3 = 0.03$ Ом (при величині питомого електричного контактного опору 10^{-5} Ом·см); $R_4 = 0.005$ Ом (для двох струмових провідників діаметром 1 мм та довжиною 10 см); $R_M \approx 0.261$ Ом.

Отже, похибка у визначенні електропровідності через неврахування контактного опору складатиме $\sim 13.5\%$; комутаційного опору $\sim 1.8\%$; опору струмових провідників $\sim 2.3\%$. Похибки, пов'язані з точністю інформації про геометричні розміри віток, визначатимуться технологією виготовлення віток і методами контролю їх геометрії. Зменшити величини цих похибок можна за допомогою введення відповідних поправок, розрахованих для заданої конструкції модуля або визначених експериментально.

Похибки при визначенні термоЕРС.

Похибки при визначенні коефіцієнту термоЕРС матеріалу віток термоелектричного модуля виникатимуть через те, що у формулу (2) повинен входити не перепад температури ($T_{20} - T_{x0}$) на теплообмінниках, що контактують з модулем, а перепад температури ($T_2 - T_x$) безпосередньо на вітках

$$\alpha = \frac{E/2N}{(T_2 - T_x)}. \quad (6)$$

Перепад температури на вітках ($T_2 - T_x$) можна знайти як

$$(T_2 - T_x) = (T_{20} - T_{x0}) - (T_{20} - T_1) - (T_1 - T_2) - (T_2 - T_3) - (T_3 - T_2) - (T_x - T_4) - (T_4 - T_5) - (T_5 - T_6) - (T_6 - T_{x0}). \quad (7)$$

де ($T_{20} - T_1$) – перепад температур на частині тепловирівнюючої пластини між термопарою та поверхнею цієї пластини, яка контактує з модулем; ($T_1 - T_2$) та ($T_5 - T_6$) – перепади температур на теплових контактних опорах «гарячої» та «холодної» сторін модуля; ($T_2 - T_3$) та ($T_4 - T_5$) – перепади температур на керамічних пластинах «гарячої» та «холодної» сторін модуля; ($T_3 - T_2$) та ($T_x - T_4$) – перепади температур на комутації «гарячої» та «холодної» сторін модуля; ($T_6 - T_{x0}$) – перепад температур на частині тепломіра між термопарою та поверхнею, яка контактує з модулем.

Для оцінки величин цих перепадів спочатку було оцінено величину теплового потоку Q_1 , що проходить через модуль. Без врахування втрат тепла з модуля та за умови створення на вітках перепаду температур 10 К, величина теплового потоку через одну вітку складатиме 0.0504 Вт, а через весь модуль – 5.645 Вт (при теплопровідності матеріалу віток $\kappa = 2$ Вт/(м·К). Тоді перепади температур на кожному з елементів можна оцінити як:

$$- (T_{20} - T_1) = \frac{Q_1}{\kappa_{Cu} \cdot \frac{a_2 \cdot b_2}{h_{Cu}}} = 0.018 \text{ К (при відстані між термопарою та поверхнею, яка контактує з}$$

модулем $h_{Cu} = 2$ мм);

$$- (T_1 - T_2) = \frac{Q_1}{K_{конт.}} = 0.282 \text{ К (при величині контактного теплового опору } K_{конт.} = 20 \text{ Вт/К);}$$

$$- (T_2 - T_3) = \frac{Q_1}{\kappa_{Al_2O_3} \cdot \frac{a_2 \cdot b_2}{h_2}} = 0.153 \text{ К};$$

$$- (T_3 - T_2) = \frac{Q_1}{\kappa_{Cu} \cdot \frac{2N \cdot a_1 \cdot b_1}{h_3}} = 0.004 \text{ К (при допущенні, що тепловий потік } Q_1 \text{ рівномірно}$$

розподіляється між $2N$ ділянками комутації з площею перерізу рівною площі перерізу вітки та висотою рівною товщині комутації);

$$- (T_x - T_4) = (T_3 - T_2) = 0.004 \text{ К};$$

$$- (T_4 - T_5) = (T_2 - T_3) = 0.153 \text{ К};$$

$$- (T_5 - T_6) = (T_1 - T_2) = 0.282 \text{ К};$$

$$- (T_6 - T_x) = (T_{20} - T_1) = 0.018 \text{ К}.$$

Таким чином, перепад температур, виміряний термопарами, буде складати $(T_{г0} - T_{х0}) = 10.914$ К, що на 9.1% більше, ніж перепад на вітках. При цьому, найбільший вклад у похибку вносить контактний тепловий опір (5.6%) та тепловий опір керамічних пластин (3%). Ці похибки можуть бути значно зменшені шляхом введення відповідних поправок, визначених експериментально.

Похибки при визначенні теплопровідності

Похибка при визначенні теплопровідності матеріалу за формулою (3) буде складатись з похибок при визначенні перепаду температур на вітках (без введення поправок ~ 9.1%, відповідно до розрахунків, наведених у п.2.2.), похибок вимірювання геометричних розмірів віток та похибок при визначенні теплового потоку, що пройшов через вітки.

Теплові потоки з поверхні нагрівника та тепловирівнюючої пластини ($Q_2 - Q_{11}$) можна не брати до уваги, оскільки тепломіром вимірюється тепло, що вийшло з «холодної» сторони модуля.

Передача тепла в зазорі між вітками шляхом випромінювання (Q_{21})

$$Q_{21} \approx \varepsilon_1 \sigma_B S (T_3^4 - T_4^4), \quad (8)$$

де ε_1 – коефіцієнт випромінювання внутрішньої поверхні кераміки; $\sigma_B = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постійна Стефана-Больцмана; $S = (a_1 \cdot b_1 - 2N \cdot a_2 \cdot b_2)$ – загальна площа зазору між вітками.

Втрати тепла Q_{12} з бічної поверхні модуля шляхом конвекції

$$Q_{12} \approx H_{conv} (h_1 + 2h_2 + 2h_3)(2a_2 + 2b_2) \left(\frac{T_2 + T_x}{2} - \bar{T}_{екр.} \right), \quad (9)$$

де H_{conv} – коефіцієнт конвективного теплообміну, $\bar{T}_{екр.}$ – середня температура поверхні екрану, що знаходиться навпроти поверхні модуля.

Втрати тепла Q_{13} з бічної поверхні модуля шляхом випромінювання

$$Q_{13} \approx \varepsilon_2 \sigma_B (h_1 + 2h_2 + 2h_3)(2a_2 + 2b_2) \left(\left(\frac{T_2 + T_x}{2} \right)^4 - \bar{T}_{екр.}^4 \right), \quad (10)$$

де ε_2 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні модуля.

Втрати тепла з модуля через струмові провідники (Q_{14} та Q_{19})

$$Q_{14} = Q_{19} = \kappa_{Cu} \frac{S_4}{L_4} (T_4 - T_{ключа}), \quad (11)$$

де: S_4 – площа поперечного перерізу струмового провідника; L_4 – довжина струмового провідника; $T_{ключа}$ – температура теплового ключа.

Втрати тепла Q_{15} з тепломіра через провідники термопари

$$Q_{15} = \kappa_5 \frac{S_5}{L_5} (T_{х0} - T_0) + \kappa_6 \frac{S_6}{L_6} (T_{х0} - T_{ключа}), \quad (12)$$

де S_5 та S_6 – площі поперечного перерізу провідників термопари; L_5 та L_6 – довжини провідників термопари; κ_5 та κ_6 – теплопровідності провідників термопари.

Втрати тепла Q_{17} з тепломіра шляхом конвекції

$$Q_{17} = H_{conv}(h_4)(2a_2 + 2b_2) \left(\frac{T_{x_0} + T_0}{2} - T_{exp} \right), \quad (13)$$

де H_{conv} – коефіцієнт конвективного теплообміну, h_4 – висота тепломіра.

Втрати тепла Q_{19} з тепломіра шляхом випромінювання

$$Q_{18} = \varepsilon_4 \sigma_B (h_4)(2a_2 + 2b_2) \left(\left(\frac{T_{x_0} + T_0}{2} \right)^4 - T_{exp}^4 \right), \quad (14)$$

де ε_4 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні тепломіра.

Для розрахунків можливих величин цих теплових втрат використано наступні параметри: коефіцієнти випромінювання – 0.7; діаметр струмових провідників – 1 мм; довжина струмових провідників (до контакту з тепловим ключем) – 10 см; діаметр провідників термопар – 0.2 мм; довжина провідників термопар (до контакту з тепловим ключем) – 10 см; кількість пар – 56; висота віток – 3 мм; переріз віток – 1.8 мм x 4.2 мм; товщина кераміки – 0.65 мм; площа кераміки – 40 мм x 40 мм; товщина комутації – 0.25 мм.

Втрати по провідниках та притиску

У таблиці наведено результати оцінки можливих похибок при визначенні теплового потоку через вітки матеріалу, викликаних втратами тепла через провідники модуля, нагрівника та термопар, а також через притиск. Вони отримані для різних перепадів температури $\Delta T_{ключа}$ між місцем контакту провідника з модулем (або нагрівником модуля) та з тепловим ключем, тобто в залежності ефективності роботи теплового ключа.

Таблиця

Зультати оцінки можливих похибок при визначенні теплового потоку через вітки матеріалу, викликаних втратами тепла через провідники модуля, нагрівника та термопар, а також через притиск.

№ з/п	Найменування втрат	$\delta Q, \%$ – відношення втрат тепла по елементу до потоку тепла через вітки			
		$\Delta T_{ключа} = 0.1$ К	$\Delta T_{ключа} = 0.2$ К	$\Delta T_{ключа} = 0.5$ К	$\Delta T_{ключа} = 1$ К
1	Втрати по струмових провідниках модуля	0.011	0.022	0.056	0.111
2	Втрати по провідниках термопар	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
3	Втрати по провідниках нагрівника	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
4	Втрати по притиску	0.0174	0.0348	0.0869	0.1738

Таким чином, найбільшими є втрати по притиску, але вони не впливають на покази тепломіра, тому їх можна не враховувати.

Втрати тепла по струмових виводах при застосуванні теплового ключа з точністю не гірше 1 К знаходяться в межах 0.11%, а втрати по провідниках термопар, струмових і потенціальних провідниках нагрівника разом не перевищують 0.01%.

Випромінювання у зазорі між вітками

Як показують результати розрахунків, випромінювання у зазорі між вітками є визначальним фактором, що впливає на точність визначення теплопровідності віток.

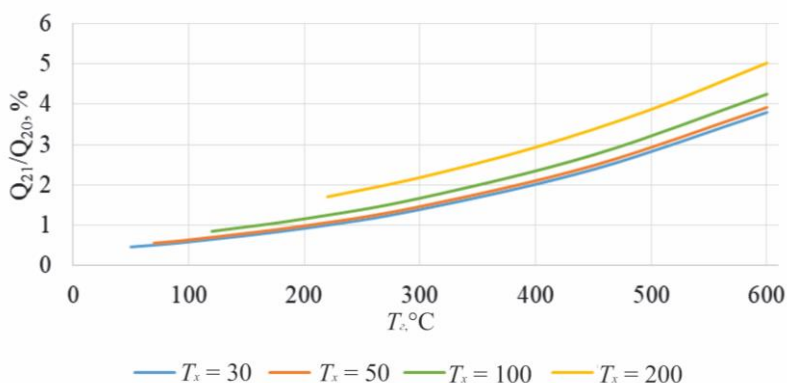


Рис. 3. Співвідношення між теплом, що передається через вітки модуля та теплом, що передається випромінюванням у зазорі між ними (для різних T_x та T_2)

Для інтервалів температур холодної сторони модуля T_x від 30 до 200 °C та гарячої T_2 – від 30 до 600 °C втрати тепла у зазорі між вітками зростаються при підвищенні T_2 та T_x і складають до 5% від загального теплового потоку через вітки при відповідному перепаді (рис. 3). Однак, ці втрати можуть бути визначені для відомої конструкції та враховані у вигляді поправок.

Випромінювання з поверхні нагрівника

На рис. 4 наведено залежності величини теплових втрат Q_8 від температури нагрівника T_2 при фіксованій $T_x = 30$ °C та різних значень перепаду температури ΔT між нагрівником модуля та нагрівником екрана.

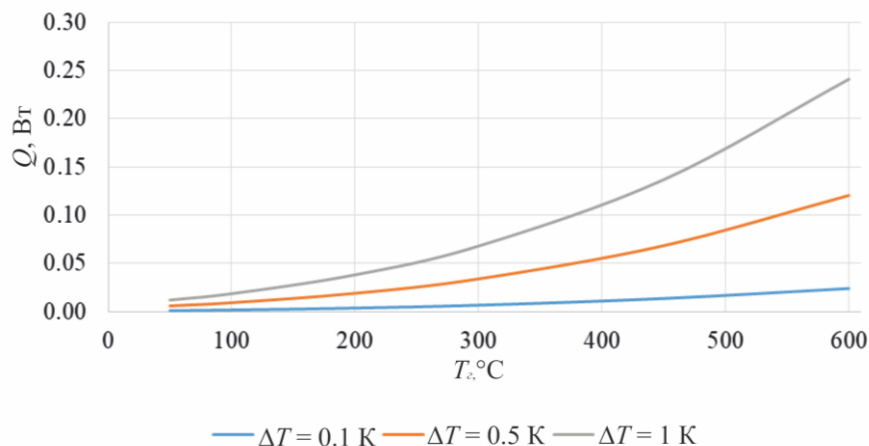


Рис. 4. Залежності величини теплових втрат Q_8 шляхом випромінювання з поверхні нагрівника від температури нагрівника T_2 (при фіксованій $T_x = 30$ °C та різних значень перепаду температури ΔT між нагрівником модуля та нагрівником екрана).

Відношення цих втрат

до теплового потоку через вітки при різних перепадах температури на модулі наведено на рис. 5. Перепад між нагрівником і екраном – 1 К.

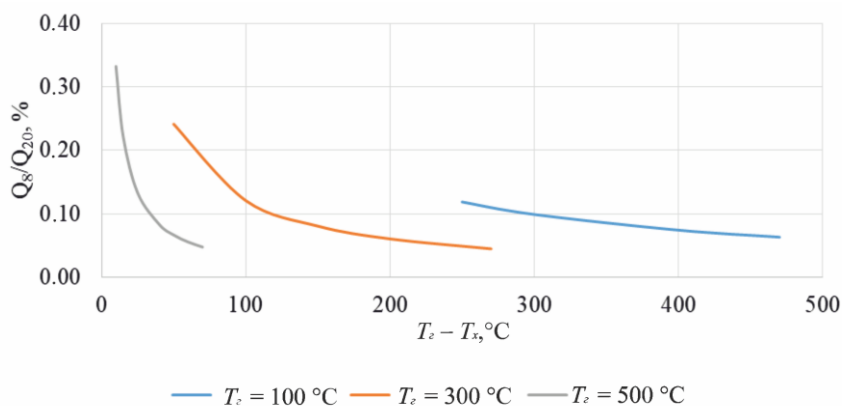


Рис. 5. Співвідношення між теплом, що передається через вітки модуля та теплом, що передається випромінюванням з поверхні нагрівника для різних значень перепаду температур на модулі (перепад температур між нагрівниками модуля і екрану – 1 К).

Слід зазначити, що випромінювання з поверхні нагрівника може не братись до уваги, оскільки не впливає на покази тепломіра, розташованого на холодній стороні модуля.

Випромінювання з поверхні модуля.

Відношення втрат випромінюванням з поверхні бічної модуля до потоку тепла через вітки при різних перепадах температури на модулі наведено на рис. 6. Оцінка зроблена для випадку коли максимальна невідповідність між температурами на поверхні модуля та на екрані не перевищує 1К.

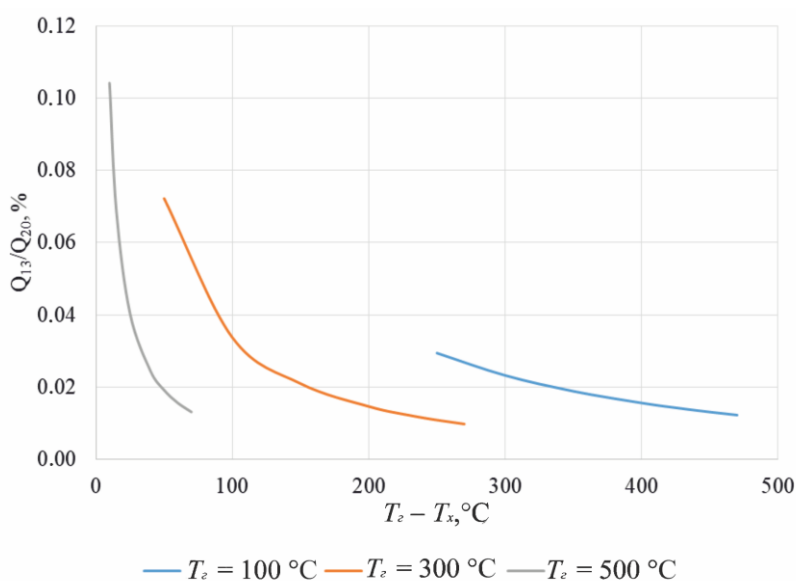


Рис. 6. Співвідношення між теплом, що передається через вітки модуля та теплом, що передається випромінюванням з поверхні модуля для різних значень перепаду температур на модулі.

Таким чином, загальна величина теплових втрат при застосуванні теплових ключів та радіаційного екрану складатиме 5-7%.

Отримані результати є основою для модернізації обладнання «АЛТЕК-10002» для вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів.

Висновки

1. Запропоновано методику визначення термоелектричних параметрів матеріалу віток генераторного термоелектричного модуля при вимірюванні його параметрів абсолютним методом. Розглянуто детальну фізичну модель цієї методики та наведено результати оцінки можливих величин похибок на прикладі термоелектричного модуля типу Алтек-1061.
2. Показано, що при визначенні електропровідності визначальним фактором, що призводитиме до похибок до ~ 13.5%, є неврахування контактної електричної опору. Вплив комутаційного опору складатиме ~ 1.8%, опору струмових провідників ~ 2.3%. Для зменшення величини цих похибок потрібно вносити відповідні поправки, розраховані для заданої конструкції модуля або визначені експериментально.
3. При визначенні термоЕРС найбільший вклад у похибку вносять похибки визначення перепаду температур на вітках, викликані контактним тепловим опором (5.6%) та тепловим опором керамічних пластин (3%). Ці похибки також можуть бути значно зменшені шляхом введення відповідних поправок.
4. При визначенні теплопровідності, крім похибок при визначенні перепаду температур на вітках, додатковим фактором є наявність теплових втрат, загальна величина яких при застосуванні теплових ключів та градієнтного радіаційного екрану складатиме до 7%. Найбільшою складовою при цьому (до 5%) є втрати тепла шляхом випромінювання у зазорі між вітками. Однак, ці втрати для відомої конструкції модуля можуть бути визначені та враховані у вигляді поправок.

Література

1. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Дослідження впливу випромінювання на точність вимірювання теплопровідності абсолютним методом// Термоелектрика. – 2012, №1. С. 67-76.
2. Anatychuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials // Journal of Electronic Materials. – 2012, Vol. 41, № 6, p. 1680-1685.
3. Anatychuk L.I., Lysko V.V. Modified Harman's Method// AIP Conf. Proc. – 2012, №1449, p. 373-376.
4. Anatychuk L.I., Lysko V.V. On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials // Journal of Electronic Materials, 2014, Volume 43, Issue 10, pp 3863-3869.
5. L.I. Anatychuk, M.V. Havryliuk, V.V. Lysko. Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials // Materials Today: Proceedings, №2, 2015, pp. 737 – 743.
6. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Способи забезпечення якісних електричних та теплових контактів при вимірюванні параметрів термоелектричних параметрів // Термоелектрика, №4, 2014.
7. Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В. Автоматизований пристрій для визначення електропровідності, теплопровідності, термоЕРС та добротності термоелектричних матеріалів. Патент на корисну модель № 127473. Опубл. 10.08.2018, бюл. № 15/2018.

8. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules// Journal of Electronic Materials. – 2011, Vol. 40, № 5, p. 1292 - 1297.

Надійшла до редакції 18.02.2021

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*^{1,2}

Лисько В.В. *канд. физ.-мат. Наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України,
ул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com;

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Предложена методика определения термоэлектрических параметров материалов в составе генераторных термоэлектрических модулей. Рассмотрена подробная физическая модель этой методики и приведены результаты оценки возможных величин погрешностей. Исследована эффективность применения различных методов снижения погрешностей, в частности, применения градиентных радиационных экранов и тепловых ключей. Библи. 9, рис. 6, табл. 1.

Ключевые слова: измерение, электропроводность, термоЭДС, теплопроводность, добротность, термоэлектрический модуль.

Anatyshuk L.I., *acad. National Academy
of Sciences of Ukraine*^{1,2}

Lysko V.V., *cand. phys.-math. sciences*^{1,2}

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

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

DETERMINATION OF THE THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS FORMING PART OF GENERATOR THERMOELECTRIC MODULES

A method is proposed for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of generator thermoelectric modules. A detailed physical model of this method is considered and the results of estimating possible values of errors are presented. The effectiveness of various methods for reducing errors, in particular, the use of gradient radiation shields and thermal switches, has been studied. Bibl. 9, Fig 6, Table 1.

Key words: measurement, electric conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, figure of merit, thermoelectric module.

References

1. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 1, 67-76.
2. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 41 (6), 1680-1685.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method. *AIP Conf. Proc.*, 1449, 373-376.
4. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 43 (10), 3863-3869.
5. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). *Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. Materials Today: Proceedings*, 2, 737 – 743.
6. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). Methods for assuring high quality electric and thermal contacts when measuring parameters of thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 4, 2014, 83-90.
7. *Patent for utility model № 127473* (2018). L.I. Anatyshuk, M.V.Havryliuk, V.V. Lysko. Automated device for determining electric conductivity, thermal conductivity, thermoEMF and figure of merit of thermoelectric materials [in Ukrainian].
8. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *J. Electronic Materials*, 40(5), 1292 - 1297.

Submitted 18.02.2021