



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: anatysh@gmail.com;

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



Лисько В.В.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ У СКЛАДІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ОХОЛОДЖЕННЯ

Запропоновано методику визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження. Розглянуто детальну фізичну модель цієї методики та наведено результати оцінки можливих величин похибок. Досліджено ефективність застосування різних методів зниження похибок. Бібл. 7, рис. 2, табл. 1.

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

Вступ

При розробці термоелектричних перетворювачів енергії, зокрема і термоелектричних модулів охолодження, та при створенні на їх основі термоелектричних приладів важливу роль відіграє метрологія модулів. При цьому точність визначення їх параметрів повинна бути високою, щоб надійно фіксувати вплив нових технологій та конструкцій на якість модулів.

Серед існуючих методів визначення параметрів термоелектричних модулів охолодження найбільш поширеним є метод Хармана [1 – 3]. Однак, у цьому методі параметри досліджуваного модуля охолодження (холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт, максимальний перепад температур) не вимірюються, а розраховуються за отриманим значенням добротності модуля. При цьому не враховуються температурні залежності параметрів матеріалу. А оскільки умовою методу є невеликий перепад температур на модулі, отримані значення добротності будуть відрізнятися від тих, які будуть насправді в робочому режимі, особливо в режимі, близькому до ΔT_{\max} . Загальний вплив факторів, що призводять до похибок в методі Хармана, для випадку

вимірювань мікромодулів може досягати 60-70%. Навіть їх врахування за допомогою введення поправок, дозволяє зменшити похибки тільки до 10-15%. При цьому необхідно знати багато додаткової інформації про властивості термоелектричного матеріалу, матеріалу комутації, струмових та потенціальних провідників, кераміки тощо [4].

Таких недоліків позбавлений абсолютний метод [5]. Похибки вимірювань абсолютним методом, як і методом Хармана, також можуть бути високими (до 25%). Однак, особливість і перевага абсолютного методу в тому, що ці похибки можуть бути інструментально мінімізовані або визначені експериментально та враховані у вигляді поправок [6].

Однак, таке обладнання призначене для визначення параметрів готових виробів – холодопродуктивності, холодильного коефіцієнту та перепаду температур на модулі. Воно може бути вдосконаленим для отримання інформації про властивості матеріалу у складі модуля – термоЕРС, електропровідності та теплопровідності пари термоелектричних віток. Ця інформація є корисною як для оптимізації термоелектричного матеріалу для конкретних його застосувань, так і для вдосконалення конструкції модулів.

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

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

При використанні абсолютного методу для визначення параметрів термоелектричного модуля охолодження, досліджуваний модуль розташовують між термостатованою основою та джерелом тепла – електричним нагрівником (рис. 1). Допускається, що бічна та верхня поверхні джерела тепла, а також бічна поверхня модуля є адіабатично ізольованими.

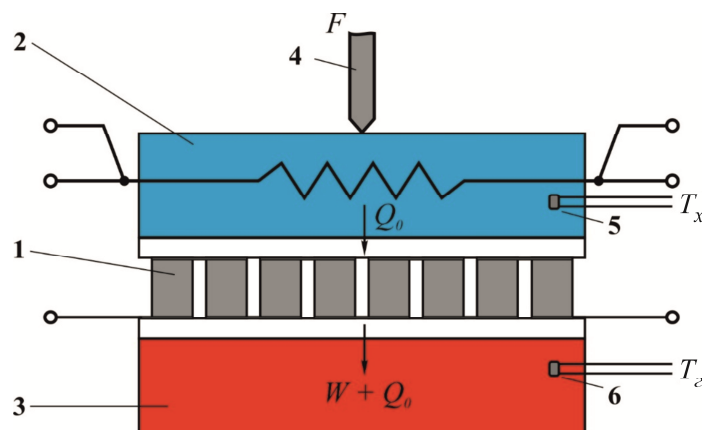


Рис. 1. Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – термоелектричний модуль, 2 – еталонний нагрівник, 3 – термостат, 4 – притискний механізм, 5, 6 – термопари.

Величини холодопродуктивності Q_0 , перепаду температур ΔT та холодильного коефіцієнту ε визначаються по формулам

$$Q_0 = I_0 \cdot U_0, \quad (1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_x, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W}, \quad (3)$$

де I_0 та U_0 – струм через нагрівник та спад напруги на ньому, T_x – температура «холодної» сторони модуля, T_2 – температура «гарячої» сторони модуля, W – споживана модулем електрична потужність.

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;

- створення на модулі перепаду температур за допомогою електричного нагрівника (при відключеному струмі через модуль);

- визначення коефіцієнту ЕРС α за виміряними значеннями ЕРС модуля та перепаду температур на модулі;

- визначення теплопровідності κ за виміряними значеннями теплового потоку через модуль (потужності електричного нагрівника) та перепаду температур на модулі.

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

$$\sigma = \frac{1}{R_M / 2N} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{E / 2N}{\Delta T}, \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{Q / 2N}{\Delta T} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1}, \quad (6)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (7)$$

де R_M – опір модуля, вимірянний на змінному струмі; $a_1 \times b_1$ – переріз віток; h_1 – висота віток; N – кількість пар; E – ЕРС модуля; ΔT – різниця температур між термопарами, розташованими на тепловирівнюючих пластинах, між якими знаходиться досліджуваний модуль; Q – тепловий потік через модуль, що вважається рівним потужності електричного нагрівника.

Однак отримані за формулами (4 - (7) 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,

теплообмін з оточуючим середовищем шляхом конвекції, випромінювання та через провідники термопар та струмові провідники модуля тощо.

Оцінка можливих величин похибок запропонованої методики

Для оцінки можливих величин похибок необхідно розглянути детальну фізична модель вимірювань, що наведена на рис. 2. Вона містить досліджуваний термоелектричний модуль, з обох сторін якого розміщені мідні тепловирівнюючі пластини. З «холодної» сторони модуля над тепловирівнюючою пластинною розташовано електричний нагрівник. Модуль, нагрівник та пластини притискаються до основи термостату за допомогою притискного механізму, який складається з гвинта та планки, кінці якої закріплені на стінці термостату. Притискний гвинт для зменшення натікань тепла має загострений кінець. Вся система розміщена під ковпаком вакуумної установки, якою забезпечується вакуум на рівні 10^{-4} Па.

Струм до електричного нагрівника підводиться струмовими провідниками, спад напруги на ньому вимірюється за допомогою додаткових потенціальних провідників. Для визначення властивостей термоелектричного матеріалу, з якого виготовлено модуль, на модулі за допомогою електричного нагрівника створюється невеликий перепад температур, близько 10 К.

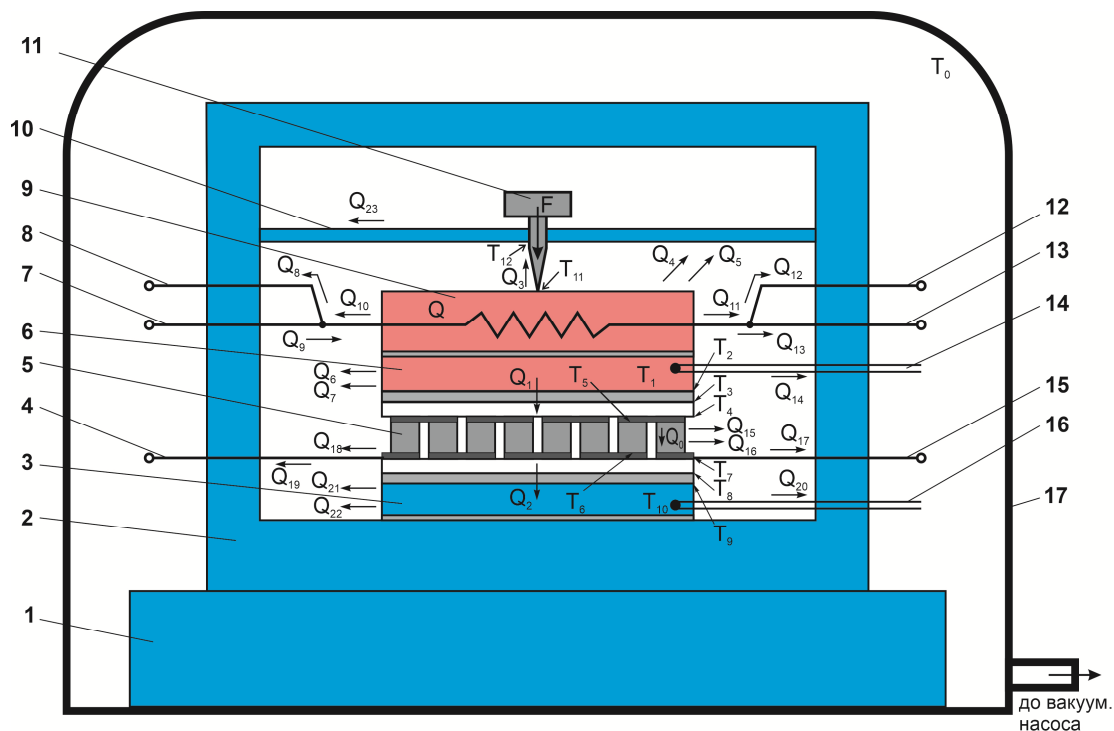


Рис. 2 – Схема абсолютного методу вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – термостат; 2 – ізотермічний екран; 3, 6 – тепловирівнюючі пластини; 4, 15 – струмові провідники досліджуваного модуля; 5 – досліджуваний модуль; 7, 13 – струмові провідники нагрівника; 8, 12 – потенціальні провідники нагрівника; 9 – нагрівник; 10 – планка притискного механізму; 11 – притискний гвинт; 14, 16 – термопари; 17 – ковпак вакуумної установки.

На рис. 2: Q_1 – тепло, що передається від електричного нагрівника 9 досліджуваному модулю 5 через тепловирівнюючу пластину 6; Q_2 – тепло, що передається від модуля 5 до тепловирівнюючої пластини 3; Q_3 – тепло, що передається від електричного нагрівника 9 до притискної планки 10; Q_4 – тепло, що передається від нагрівника 9 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_5 – тепло, що передається від нагрівника 9 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; Q_6 – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_7 – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; $Q_8 - Q_{13}$ – тепло, що передається від нагрівника 9 до ізотермічного екрану 2 через струмові (7 і 13) та потенціальні (8 і 12) провідники нагрівника; Q_{14}, Q_{20} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до ізотермічного екрану 2 через провідники термопар (14 і 16); Q_{15} – тепло, що передається від бічної поверхні модуля 5 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_{16} – тепло, що передається від бічної поверхні модуля 5 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; Q_{17}, Q_{18} – тепло, що передається від модуля 5 до ізотермічного екрану 2 через струмові провідники модуля (4 і 15); Q_{21} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 3 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_{22} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 3 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; Q_{23} – тепло, що від нагрівника 9 до ізотермічного екрану 2 через планку притискного механізму 10.

Похибки при визначенні електропровідності.

При визначенні усередненого значення електропровідності віток термоелектричного модуля визначається за формулою (4) використовується загальний опір модуля R_M , вимірний 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

$$R_M = R_1 + R_2 + R_3 + R_4. \quad (11)$$

Для оцінки можливих похибок, як приклад використано параметри термоелектричного модуля охолодження типу Altec-СМ-1-S-SQ-127-1.8x1.8-2.0:

- кількість пар – $N = 127$;
- висота віток $h_1 = 2$ мм;
- переріз віток $a_1 \times b_1 = 1.8$ мм \times 1.8 мм;
- товщина кераміки $h_2 = 0.65$ мм;
- площа кераміки $a_2 \times b_2 = 40$ мм \times 40 мм;
- товщина комутації $h_3 = 0.5$ мм;
- електропровідність матеріалу віток $\sigma = 1000$ Ом⁻¹·см⁻¹.

Для наведених значень геометрії модуля та властивостей матеріалів: $R_1 = 1.568$ Ом; $R_2 \approx 0.011$ Ом; $R_3 = 0.078$ Ом (при величині питомого електричного контактного опору $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²); $R_4 = 0.008$ Ом (для двох струмових провідників діаметром 1 мм та довжиною 15 см); $R_M \approx 1.665$ Ом.

Отже, похибка у визначенні електропровідності через неврахування контактної опору складатиме $\sim 4.7\%$; комутаційного опору $\sim 0.7\%$; опору струмових провідників $\sim 0.5\%$. 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 (5) повинен входити не перепад температури ($T_1 - T_{10}$) на пластинах, що контактують з модулем, а перепад температури ($T_5 - T_6$) безпосередньо на вітках

$$\alpha = \frac{E/2N}{(T_5 - T_6)}. \quad (12)$$

Перепад температури на вітках ($T_5 - T_6$) можна знайти як

$$(T_5 - T_6) = (T_1 - T_{10}) - (T_1 - T_2) - (T_2 - T_3) - (T_3 - T_4) - (T_4 - T_5) - (T_6 - T_7) - (T_7 - T_8) - (T_8 - T_9) - (T_9 - T_{10}). \quad (13)$$

де ($T_1 - T_2$) та ($T_9 - T_{10}$) – перепади температур на частинах тепловирівнюючих пластин між термopарами та поверхнями пластин, які контактують з «гарячою» та «холодною» сторонами модуля; ($T_2 - T_3$) та ($T_8 - T_9$) – перепади температур на теплових контактних опорах «гарячої» та «холодної» сторін модуля; ($T_3 - T_4$) та ($T_7 - T_8$) – перепади температур на керамічних пластинах «гарячої» та «холодної» сторін модуля; ($T_4 - T_5$) та ($T_6 - T_7$) – перепади температур на комутації «гарячої» та «холодної» сторін модуля.

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 0.00324 Вт, а через весь модуль – 0.823 Вт (при теплопровідності матеріалу віток $\kappa = 2$ Вт/(м·К). Тоді перепади температур на кожному з елементів можна оцінити як:

$$(T_1 - T_2) = \frac{Q_1}{\kappa_{Cu} \cdot \frac{a_2 \cdot b_2}{h_{Cu}}} = 0.0026 \text{ К} \quad (\text{при відстані між термopарою та поверхнею, яка контактує з}$$

модулем $h_{Cu} = 2$ мм);

- $(T_2 - T_3) = \frac{Q_1}{K_{\text{конт.}}} = 0.0412 \text{ K}$ (при величині контактного теплового опору $K_{\text{конт.}} = 20 \text{ Вт/К}$);
- $(T_3 - T_4) = \frac{Q_1}{\kappa_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \frac{a_2 \cdot b_2}{h_2}} = 0.0223 \text{ K}$;
- $(T_4 - T_5) = \frac{Q_1}{\kappa_{\text{Cu}} \cdot \frac{2N \cdot a_1 \cdot b_1}{h_3}} = 0.0013 \text{ K}$ (при допущенні, що тепловий потік Q_1 рівномірно

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

- $(T_6 - T_7) = (T_4 - T_5) = 0.0013 \text{ K}$;
- $(T_7 - T_8) = (T_3 - T_4) = 0.0223 \text{ K}$;
- $(T_8 - T_9) = (T_2 - T_3) = 0.0412 \text{ K}$;
- $(T_9 - T_{10}) = (T_1 - T_2) = 0.0026 \text{ K}$.

Таким чином, перепад температур, виміряний термопарами, буде складати $(T_{T_0} - T_{X_0}) = 10.135 \text{ K}$, що на 1.35% більше, ніж перепад на вітках. При цьому, найбільший вклад у похибку вносить контактний тепловий опір (0.82%) та тепловий опір керамічних пластин (0,45%). Ці похибки можуть бути значно зменшені шляхом введення відповідних поправок, визначених експериментально.

Похибки при визначенні теплопровідності.

Похибка при визначенні теплопровідності матеріалу за формулою (6) буде складатись з похибок при визначенні перепаду температур на вітках (без введення поправок $\sim 1.35\%$, 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 модуля та тепловирівнюючої пластини ($Q_{17} - Q_{22}$) можна не брати до уваги, оскільки вони не впливають на визначення теплопровідності матеріалу віток за формулою (6).

Усі провідники та притискний механізм для зменшення теплових втрат мають мати так звані теплові ключі, що представляються собою елементи з електроізоляційного матеріалу, температура яких підтримується близькою до температури нагрівника.

Передача тепла в зазорі між вітками шляхом випромінювання (Q_{24})

$$Q_{24} \approx \varepsilon_1 \sigma_B S (T_4^4 - T_7^4), \quad (14)$$

де ε_1 – коефіцієнт випромінювання внутрішньої поверхні кераміки; $\sigma_B = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постійна Стефана-Больцмана; $S = (a_1 \cdot b_1 - 2N \cdot a_2 \cdot b_2)$ – загальна площа зазору між вітками.

Втрати тепла Q_4 з нагрівника шляхом конвекції

$$Q_4 = H_{conv}(h_4)(2a_2 + 2b_2)(T_{11} - T_{exp}), \quad (13)$$

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

Втрати тепла Q_5 з нагрівника шляхом випромінювання

$$Q_5 = \varepsilon_4 \sigma_B (h_4)(2a_2 + 2b_2)(T_{11}^4 - T_{exp}^4), \quad (14)$$

де ε_4 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні нагрівника.

Втрати тепла Q_6 з тепловирівнюючої пластини шляхом конвекції

$$Q_6 = H_{conv}(h_5)(2a_2 + 2b_2)(T_1 - T_{exp}), \quad (13)$$

де h_5 – висота тепловирівнюючої пластини.

Втрати тепла Q_7 з тепловирівнюючої пластини шляхом випромінювання

$$Q_7 = \varepsilon_5 \sigma_B (h_5)(2a_2 + 2b_2)(T_1^4 - T_{exp}^4), \quad (14)$$

де ε_5 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні тепловирівнюючої пластини.

Втрати тепла з модуля через потенціальні провідники нагрівника (Q_8 та Q_{12})

$$Q_8 = Q_{12} = \kappa_8 \frac{S_8}{L_8}(T_{11} - T_{ключа}), \quad (11)$$

де: S_8 – площа поперечного перерізу потенціального провідника; L_8 – довжина потенціального провідника; κ_8 – теплопровідність матеріалу потенціального провідника; $T_{ключа}$ – температура теплового ключа.

Втрати тепла з модуля через струмові провідники нагрівника (Q_9 та Q_{13})

$$Q_9 = Q_{13} = \kappa_9 \frac{S_9}{L_9}(T_{11} - T_{ключа}), \quad (11)$$

де: S_9 – площа поперечного перерізу потенціального провідника; L_9 – довжина потенціального провідника; κ_9 – теплопровідність матеріалу потенціального провідника;

Втрати тепла Q_{14} з через провідники термопари

$$Q_{14} = \kappa_{10} \frac{S_{10}}{L_{10}}(T_1 - T_0) + \kappa_{11} \frac{S_{11}}{L_{11}}(T_1 - T_{ключа}), \quad (12)$$

де S_{10} та S_{11} – площі поперечного перерізу провідників термопари; L_{10} та L_{11} – довжини провідників

термопари; κ_{10} та κ_{11} – теплопровідності провідників термопари.

Втрати тепла Q_{15} з бічної поверхні модуля шляхом конвекції

$$Q_{15} \approx H_{conv} (h_1 + 2h_2 + 2h_3)(2a_2 + 2b_2) \left(\frac{T_3 + T_8}{2} - \bar{T}_{екр.} \right), \quad (9)$$

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

Втрати тепла Q_{16} з бічної поверхні модуля шляхом випромінювання

$$Q_{16} \approx \varepsilon_2 \sigma_B (h_1 + 2h_2 + 2h_3)(2a_2 + 2b_2) \left(\left(\frac{T_3 + T_8}{2} \right)^4 - \bar{T}_{екр.}^4 \right), \quad (10)$$

де ε_2 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні модуля.

Для розрахунків можливих величин цих теплових втрат використано наступні параметри: коефіцієнти випромінювання – 0.7; діаметр струмових та потенціальних провідників нагрівника – 0.2 мм, їх довжина (до контакту з тепловим ключем) – 10 см; діаметр провідників термопар – 0.2 мм, їх довжина (до контакту з тепловим ключем) – 10 см; кількість пар – 127; висота віток – 2 мм; переріз віток – 1.8 мм x 1.8 мм; товщина кераміки – 0.65 мм; площа кераміки – 40 мм x 40 мм; товщина комутації – 0.5 мм; висота нагрівника – 5 мм; висота тепловирівнюючої пластини – 5 мм.

Результати оцінки можливих похибок при визначенні теплового потоку через вітки матеріалу, викликаних втратами тепла через провідники нагрівника та термопари, притиск, а також втратами тепла шляхом випромінювання з поверхні нагрівника, тепловирівнюючої пластини та модуля наведено у табл. 1. Результати отримані для випадку, коли температура теплового ключа рівна температурі тепловирівнюючої пластини T_{10} , а перепад температури між гарячою та холодною пластинами ($T_1 - T_{10}$) складає 10 К. Також розглянуто випадок застосування захисного екрану з температурою, що відрізняється від температури нагрівника не більше ніж на 1К.

Таблиця 1

Результати оцінки можливих похибок при визначенні теплового потоку через вітки матеріалу.

№ з/п	Найменування втрат	$\delta Q, \%$ (відношення втрат тепла до потоку тепла через вітки)	
		без захисного екрана	з захисним екраном
1	Втрати шляхом випромінювання у зазорі між вітками	3.85	3.85
2	Втрати шляхом випромінювання з поверхні нагрівника	11.9	1.25
3	Втрати шляхом випромінювання з поверхні пластини	3.96	0.42

Продовження таблиці №1

4	Втрати шляхом випромінювання з поверхні модуля	1.56	0.16
5	Втрати по притиску	2.77	0.28
6	Втрати по провідниках нагрівника	0.04	<0.01
7	Втрати по провідниках термопари	<0.01	<0.01
Всього:		24.08	5.96

Таким чином, найбільшими є втрати, спричинені випромінюванням з поверхні нагрівника, модуля та тепловирівнюючої пластини, а також випромінюванням у зазорі між вітками всередині термоелектричного модуля. Загалом, втрати випромінюванням складають майже 90% від усіх теплових втрат. Однак, вони можуть бути радикально зменшені при застосуванні захисного екрана. Для випадку, коли з температура екрану відрізняється від температури нагрівника не більше ніж на 1 К, загальні втрати тепла, а, отже, похибка визначення теплового потоку через вітки модуля, не перевищуватиме 6 %. З врахуванням похибок при визначенні перепаду температур на вітках (без введення поправок ~ 1.35 %) похибка при визначенні теплопровідності термоелектричного матеріалу, з якого виготовлено вітки модуля, складатиме до 7.4 %.

Отримані результати є основою для модернізації обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження.

Висновки

1. Запропоновано методику визначення термоелектричних параметрів матеріалу віток термоелектричного модуля охолодження при вимірюванні його параметрів абсолютним методом. Розглянуто детальну фізичну модель цієї методики та наведено результати оцінки можливих величин похибок на прикладі термоелектричного модуля типу Altec-СМ-1-S-SQ-127-1.8x1.8-2.0.
2. Показано, що при визначенні електропровідності визначальним фактором, що призводитиме до похибок до ~ 4.7%, є неврахування контактної електричної опору. Вплив комутаційного опору складатиме ~ 0.7 %, опору струмових провідників ~ 0.5 %. 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 (0.82 %) та тепловим опором керамічних пластин (0.45 %). 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 захисного екрану складатиме до 7.4 %. Найбільшою

складовою при цьому (до 4%) 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. T.C. Harman. Special Techniques for Measurement of Thermoelectric Properties // J. Appl. Phys. 29, 1373, 1958.
2. R.J. Buist. A New Method For Testing Thermoelectric Materials and Devices // XI International Conference on Thermoelectrics, October 7-9, 1992, Arlington, Texas, USA.
3. G. Gromov, D. Kondratiev, A. Rogov, L. Yershova. Z-meter: Easy-to-use Application and Theory // Proceedings. Sixth European Workshop on Thermoelectricity of the European Thermoelectric Society, September 20-21, 2001, Freiburg im Breisgau, Germany.
4. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. Modified Harman's Method // AIP Conf. Proc. – 2012, №1449, p. 373-376.
5. P. Kolodner. High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules // Review of Scientific Instruments. – Vol. 85, Iss. 5. – 2014. – pp. 054901/1-054901/11.
6. Anatyshuk 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.

Надійшли до редакції: 09.06.2021

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

Лысько В.В. *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

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

²Черновицький національний університет ім. Юрія Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Черновці, 58012, Україна

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Предложена методика определения термоэлектрических параметров материалов в составе термоэлектрических модулей охлаждения. Рассмотрена подробная физическая модель этой

методики и приведены результаты оценки возможных величин погрешностей. Исследована эффективность применения различных методов снижения погрешностей. Библ. 7, рис. 2, табл. 1.

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

Anatychuk 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: anatych@gmail.com;

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

METHOD FOR DETERMINING THE THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS FORMING PART OF THERMOELECTRIC COOLING MODULES

A method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules is proposed. A detailed physical model of this method is considered and the results of estimation of possible error values are given. The efficiency of application of various methods of error reduction is investigated. Bibl. 7, Figs. 2, Table 1.

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

References

1. Harman T.C. (1958). Special techniques for measurement of thermoelectric properties. *J. Appl. Phys.*, 29, 1373.
2. Buist R.J. (1992). A new method for testing thermoelectric materials and devices. *XI International Conference on Thermoelectrics* (October 7-9, 1992, Arlington, Texas, USA).
3. Gromov G., Kondratiev D., Rogov A., Yershova L. (2001). Z-meter: easy-to-use application and theory. *Proc. of Sixth European Workshop on Thermoelectricity of the European Thermoelectric Society* (September 20-21, 2001, Freiburg im Breisgau, Germany).

4. Anatyчук L.I., Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method (2012). *AIP Conf. Proc.*, 449, 373-376.
5. Kolodner P. (2014). High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules. *Review of Scientific Instruments*, 85(5), 054901/1-054901/11.
6. Anatyчук 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.

Submitted:09.06.2021