

УДК 53.082

Анатичук Л.І. ак. НАН України,^{1,2}

Лисько В.В. канд. фіз.-мат. наук^{1,2}



Анатичук Л.І.

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

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



Лисько В.В.

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ НЕПЕРЕРВНОЇ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ

Наведено результати комп'ютерних досліджень, направлених на підвищення швидкодії при визначенні термоелектричних параметрів матеріалів абсолютним методом. Розглянуто можливість підвищення швидкодії шляхом проведення вимірювань в умовах неперервного монотонного розігріву вимірювального термостату. Проведено аналіз похибок при вимірюваннях теплопровідності для такого випадку та встановлено умови їх мінімізації. Визначено, що вимірювання в умовах неперервної зміни температури при врахуванні теплоємностей досліджуваного зразка та еталонного нагрівника дозволяють у 3-5 разів зменшити час, необхідний на вимірювання температурних залежностей термоелектричних параметрів зразка, при незначному, до 0.5 – 1 %, збільшенні похибок вимірювань. Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: вимірювання, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, добротність, похибки, швидкодія.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Створення термоелектричних матеріалів, ефективних у різних інтервалах температур є однією з важливих задач термоелектрики [1 – 3]. Для її вирішення необхідні високоточні методи і обладнання для вимірювань температурних залежностей термоелектричних параметрів матеріалів.

У роботах [4 – 7] показано, що для забезпечення високої точності вимірювань найбільш ефективним є абсолютний метод. Однак, при його застосуванні проблемною є швидкодія вимірювань. Необхідність досягнення стаціонарних умов викликає збільшення тривалості вимірювань. Так, для вимірювання температурної залежності одного зразка в інтервалі температур 30 - 550 °С необхідно до 20 годин.

У роботі [8] розглянуто можливість підвищення швидкодії при використанні абсолютного

методу шляхом застосування імпульсів змінного струму для пришвидшення досягнення стаціонарних умов у досліджуваних зразках, а також програмованого форсованого розігріву зразка та термостату. Такі методи дозволяються у 3-5 разів зменшити час, необхідний на вимірювання температурної залежності термоелектричних параметрів зразка, однак вимагають складних алгоритмів вимірювань для своєї реалізації.

Метою даної роботи було дослідження можливості підвищення швидкодії абсолютного методу шляхом проведення вимірювань в умовах неперервного монотонного розігріву вимірювального термостату.

Фізична модель та її математичний опис. Комп'ютерна модель

Досліджуваний зразок прикріплений однією стороною до вимірювального термостату, як це показано на рис. 1. Температура термостату T_0 монотонно зростає, починаючи від кімнатної. Для цього на фоновий нагрівник термостату подається електрична потужність W_0 , величина якої є функцією часу. До другої сторони зразка підводиться тепло постійною потужністю Q від еталонного нагрівника.

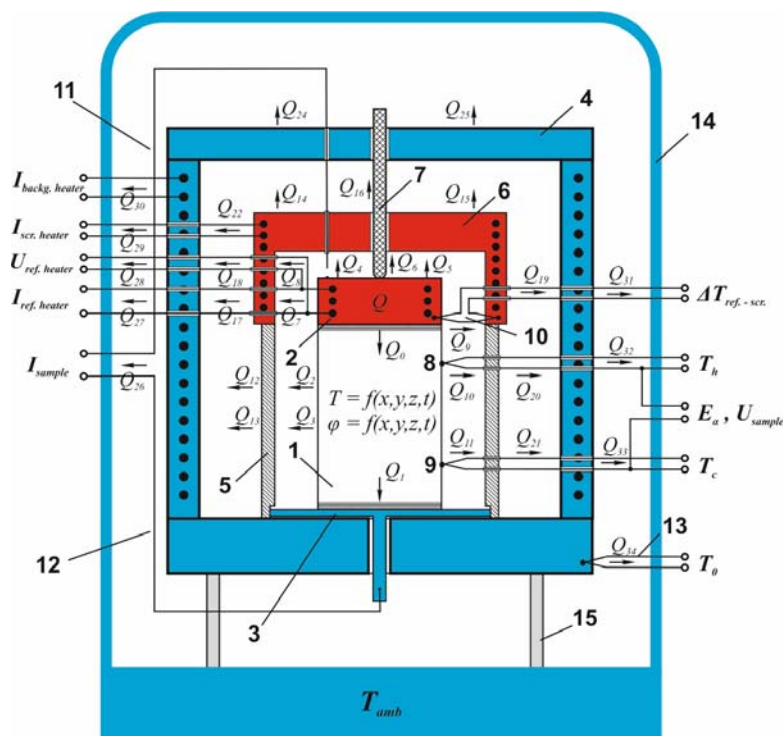


Рис. 1. Фізична модель комплексного абсолютного методу для дослідження факторів, що впливають на швидкість переходу від однієї температурної точки до іншої. 1 – досліджуваний зразок; 2 – еталонний нагрівник; 3 – посадочна площадка; 4 – термостат; 5 – екран; 6 – нагрівник екрану; 7 – притиск; 8, 9 – вимірювальні зонди-термопари; 10 – нуль-термопара; 11, 12 – струмопідводи зразка; 13 – термопара термостату; 14 – зовнішній термостат (вакуумний ковпак); 15 – стійки, на яких вимірювальний термостат кріпиться у зовнішньому пасивному термостаті.

У фізичній моделі, наведеній на рис. 1: Q – тепло, що виділяється еталонним електричним нагрівником при пропусканні через нього струму; Q_0 – тепло, що надходить від еталонного нагрівника до зразка; Q_1 – тепло, що передається від зразка до термостату; Q_2 – тепловий потік між поверхнями зразка та градієнтного теплового екрану шляхом випромінювання; Q_3 – тепловий потік між поверхнями зразка та градієнтного теплового екрану шляхом конвекції; Q_4 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану шляхом випромінювання; Q_5 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану шляхом конвекції; Q_6 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану через притиск; Q_7 та Q_8 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану через струмові та потенціальні провідники еталонного нагрівника; Q_9 – тепловий потік між поверхнями еталонного нагрівника та нагрівника екрану через провідники нуль-термопар; Q_{10} та Q_{11} – тепловий потік між поверхнями зразка та градієнтного теплового екрану через провідники зондів-термопар; Q_{12} – тепловий потік між поверхнями градієнтного теплового екрану та термостату шляхом випромінювання; Q_{13} – тепловий потік між поверхнями градієнтного теплового екрану та термостату шляхом конвекції; Q_{14} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату шляхом випромінювання; Q_{15} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату шляхом конвекції; Q_{16} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через притиск; Q_{17} та Q_{18} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через струмові та потенціальні провідники еталонного нагрівника; Q_{19} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через провідники нуль-термопар; Q_{20} та Q_{21} – тепловий потік між поверхнями градієнтного теплового екрану та термостату через провідники зондів-термопар; Q_{22} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через струмові провідники нагрівника екрану; Q_{23} – тепловий потік між поверхнями нагрівника екрану та термостату через струмопідвід, Q_{24} – тепловий потік між поверхнями вимірювального термостату та зовнішнього пасивного термостату шляхом випромінювання, Q_{25} – тепловий потік між поверхнями вимірювального термостату та зовнішнього пасивного термостату шляхом конвекції, Q_{26} – тепловий потік між поверхнями вимірювального термостату та зовнішнього пасивного термостату через провідники (зондів-термопар, нуль-термопар, потенціальних та струмових електродів еталонного нагрівника та нагрівника екрану тощо).

Вимірювальний термостат поміщено під ковпак вакуумної установки для усунення теплообміну через повітря шляхом конвекції та теплопровідності.

Для випадку стаціонарного абсолютного методу значення електропровідності σ , коефіцієнту термоЕРС α , теплопровідності κ та добротності Z досліджуваного зразка визначаються з формул

$$\sigma = \frac{I}{U} \frac{l}{S}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{E_a}{T_h - T_c}, \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{W}{T_h - T_c} \frac{l}{S}, \quad (3)$$

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

де S – площа поперечного перерізу зразка; I , U – струм через зразок та спад напруги на ньому при вимірюванні електропровідності; E_a – термоЕРС; T_h і T_c – «гаряча» та «холодна» температури на кінцях зразка.

Відсутність стаціонарних умов при проведенні вимірювань викликати похибки, в першу чергу при визначенні теплопровідності. Для дослідження величин цих похибок необхідно знайти часову залежність розподілу температури у досліджуваному зразку. Для цього необхідно для кожного елемента фізичної моделі, наведеної на рис. 1, розв'язати систему диференціальних рівнянь з відповідними граничними умовами, записану у вигляді

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \left((\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha \phi \sigma) \nabla T \right) - \nabla \left((\alpha \sigma T + \phi \sigma) \nabla \phi \right) = 0, \\ \nabla \left(\epsilon \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) - \nabla (\sigma \nabla \phi) - \nabla (\sigma \alpha \nabla T) = 0. \end{cases}, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, σ – електропровідність, κ – теплопровідність, ρ – густина, C – теплоємність, ϵ – діелектрична проникність.

Граничні умови для випадку вимірювання при певній заданій температурі термостату T_0 можуть бути записані у наступному вигляді:

– бічна поверхня зразка

$$r = \frac{d}{2}, \quad z \in [0; l]: q = \epsilon_1 (G_1 - \sigma T^4); \quad (6)$$

– бічна поверхня еталонного нагрівника

$$r = \frac{d}{2}, \quad z \in [l; l + l_2]: q = \epsilon_2 (G_2 - \sigma T^4); \quad (7)$$

– верхня поверхня еталонного нагрівника

$$r = \left[0; \frac{d}{2} \right], \quad z \in l + l_2: q = \epsilon_2 (G_3 - \sigma T^4); \quad (8)$$

– внутрішня поверхня екрану

$$r = \frac{d}{2} + \Delta R, \quad z \in [0; l]: \quad q = \varepsilon_3 (G_4 - \sigma T^4); \quad (9)$$

– внутрішня поверхня нагрівника екрану

$$r = \frac{d}{2} + \Delta R, \quad z \in [l; l + l_4]: \quad q = \varepsilon_4 (G_5 - \sigma T^4); \quad (10)$$

$$r \in \left[0; \frac{d}{2} + \Delta R \right], \quad z = l + l_2 + \Delta R: \quad q = \varepsilon_4 (G_6 - \sigma T^4); \quad (11)$$

– зовнішня поверхня нагрівника екрану

$$r = \frac{d_4}{2}, \quad z \in [l; l = l_4]: \quad q = \varepsilon_4 (G_7 - \sigma T^4); \quad (12)$$

$$r \in \left[0; \frac{d}{2} + \Delta R \right], \quad z = l + l_4: \quad q = \varepsilon_4 (G_8 - \sigma T^4), \quad T = T_0 + \Delta T; \quad (13)$$

– зовнішня поверхня екрану

$$r = \frac{d_3}{2}, \quad z \in [0; l]: \quad q = \varepsilon_3 (G_9 - \sigma T^4); \quad (14)$$

– поверхня термостату між зразком і екраном

$$r \in \left[\frac{d}{2}; \frac{d}{2} + \Delta R \right], \quad z = 0: \quad q = \varepsilon_5 (G_{10} - \sigma T^4); \quad (15)$$

– поверхня термостату з зовнішньої сторони екрану

$$r \in \left[\frac{d_3}{2}; \frac{d_5}{2} \right], \quad z = 0: \quad q = \varepsilon_5 (G_{11} - \sigma T^4); \quad (16)$$

$$r \in \left[0; \frac{d_5}{2} \right], \quad z = l_5: \quad q = \varepsilon_5 (G_{12} - \sigma T^4); \quad (17)$$

$$r = \frac{d_5}{2}, \quad z \in [0; l_5]: \quad q = \varepsilon_5 (G_{13} - \sigma T^4); \quad (18)$$

– зовнішня поверхня термостату

$$r \in \left[0; \frac{d_5}{2} + h_5 \right], \quad z = -h_5 : T = T_0; \quad (19)$$

$$r \in \left[0; \frac{d_5}{2} + h_5 \right], \quad z = l_5 + h_5 : T = T_0; \quad (20)$$

$$r = \frac{d_5}{2} + h_5, \quad z \in [-h_5; l_5 + h_5] : T = T_0. \quad (21)$$

де T_0 – температура термостата, T_1 – температура нагрівників зразка та екрану, κ_1 – теплопровідність зразка, κ_2 – теплопровідність еталонного нагрівника, κ_3 – теплопровідність екрана, κ_4 – теплопровідність нагрівника екрана, ε_1 – коефіцієнт поглинання поверхні зразка, ε_2 – коефіцієнт поглинання поверхні еталонного нагрівника, ε_3 – коефіцієнт поглинання поверхні екрана, ε_4 – коефіцієнт поглинання поверхні нагрівника екрана, ε_5 – коефіцієнт поглинання поверхні термостата, d_1, l_1 – діаметр і довжина зразка; d_2, l_2 – діаметр і довжина еталонного нагрівника; d_3, l_3 – зовнішній діаметр и довжина екрана; d_4, l_4 – діаметр і довжина нагрівника екрана; d_5, l_5, h_5 – внутрішній діаметр, довжина і товщина термостата; ΔR – відстань між зразком і екраном; σ – постійна Стефана-Больцмана; G – вхідний тепловий потік випромінюванням для кожної окремої границі:

$$G = G_m + F_{amb} \sigma T_{amb}^4, \quad (22)$$

де G_m – величина випромінювання від інших границь елементів вимірювальної установки і зразка; F_{amb} – фактор поля зору, рівний тій його частині, яка не підпадає під дію інших поверхонь; T_{amb} – температури у далековіддалених точках у напрямках, включених до F_{amb} .

Такі задачі знаходження розподілу електричного потенціалу і температури, а також теплових і електричних потоків в досліджуваних зразках важко піддаються аналітичному рішенню через складність геометрії, температурні залежності властивостей зразка і елементів конструкції вимірювального обладнання тощо. Для розрахунку температурних і електричних полів, а також впливу на них різних факторів, можуть бути використані комп'ютерні методи об'єктно-орієнтованого моделювання реальних фізичних моделей. Зокрема, для вирішення таких завдань добре підходить пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics.

Коефіцієнт G_m , що залежить від взаємного розташування поверхонь, розраховується введенням в комп'ютерну модель додаткової змінної J , яка задається рівнянням

$$J = (1 - \varepsilon) \{ G_m(J) + F_{amb} \sigma T_{amb}^4 \} + \varepsilon \sigma T^4, \quad (23)$$

яке розв'язується сумісно з іншими рівняннями математичної моделі.

Результати комп'ютерних досліджень

При використанні стаціонарного абсолютного методу для вимірювань термоелектричних параметрів досліджуваного зразка при кожній фіксованій температурі вимірювального термостату необхідно витратити 30-60 хв. При цьому близько $\frac{3}{4}$ часу витрачається на перехід від однієї температури до іншої, а решта $\frac{1}{4}$ – на вимірювання електропровідності, створення стаціонарного градієнту температури на зразку та вимірювання теплопровідності і коефіцієнту термоЕРС.

Таким чином, для дослідження температурної залежності термоелектричних параметрів одного зразка в інтервалі температур від кімнатної до 550 °С з кроком 25 °С необхідно до 20 годин. Це еквівалентно монотонному розігріву вимірювального термостату зі швидкістю приблизно 0.4 К/хв. За допомогою розробленої комп'ютерної моделі можна отримати відповідну часова залежність потужності фонових нагрівників, необхідної для такого монотонного розігріву (рис. 2.). Аналогічні залежності можуть бути отримані і для іншої швидкості монотонного розігріву вимірювального термостату.

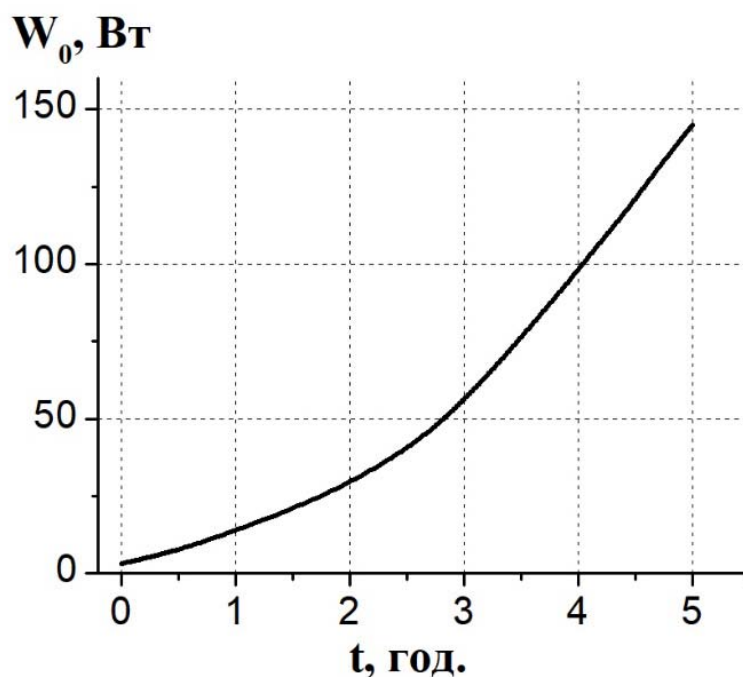


Рис. 2. Часова залежність потужності фонових нагрівників, необхідної для монотонного розігріву термостату від кімнатної температури до 500 °С

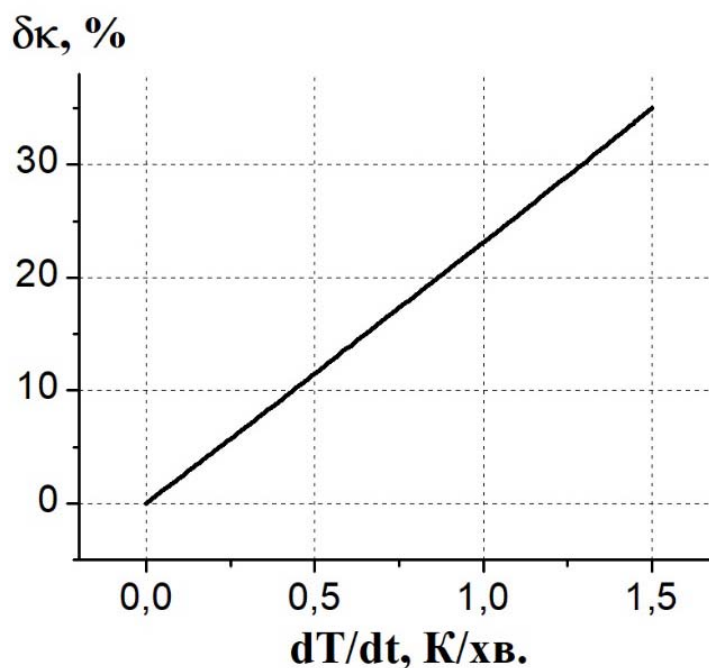


Рис. 3. Залежність похибки вимірювання теплопровідності абсолютним методом в умовах монотонного розігріву від швидкості росту температури термостату

На рис. 3 наведено залежність похибок при визначенні теплопровідності, що виникатимуть через витрати тепла еталонного нагрівника на розігрів зразка та елементів вимірювальної установки. Як видно з рисунка, навіть при швидкості розігріву 0.4 К/хв., що відповідає стаціонарному випадку 1 год. на вимірювання при одній температурі, похибка при вимірюванні теплопровідності буде неприпустимо великою – до 10 %.

Для зменшення похибок і досягнення можливості пришвидшення процесу вимірювань необхідно враховувати величини теплоємностей зразка та елементів вимірювальної установки, зокрема еталонного нагрівника. Для цього для розрахунку потрібно користуватись наступною формулою

$$\kappa = \frac{Q - \left[C_2 m_2 + \frac{1}{2} C_1 m_1 \right] \cdot \frac{dT_h}{dt} l}{T_h - T_c} \cdot \frac{1}{S}, \quad (24)$$

де C_1 – теплоємність досліджуваного зразка; C_2 – теплоємність еталонного нагрівника; T_h – температура гарячого кінця зразка (еталонного нагрівника); T_c – температура холодного кінця зразка (термостату); l – довжина зразка; S – площа поперечного перерізу зразка.

При цьому для досягнення високої точності вимірювань при одночасному підвищенні їх швидкодії необхідною буде точна інформація про теплоємності C_1 та C_2 .

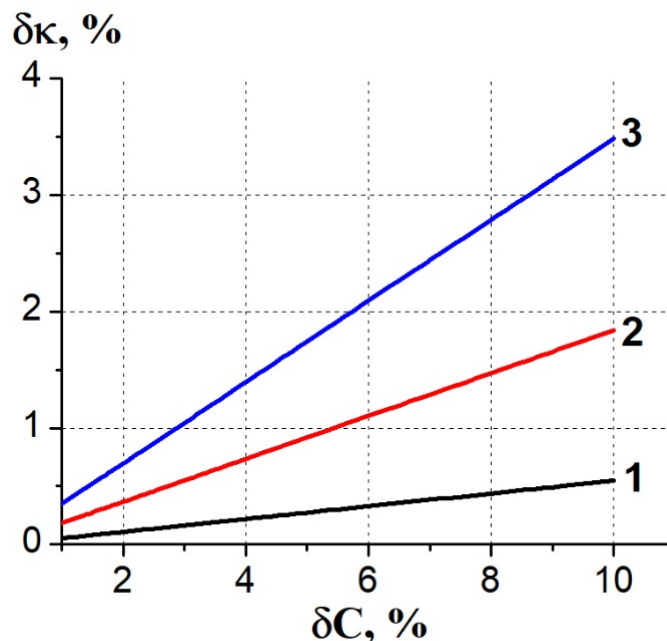


Рис. 4. Залежність похибки вимірювання теплопровідності абсолютним методом в умовах монотонного розігріву від точності інформації про теплоємності досліджуваного зразка та еталонного нагрівника (для різних швидкостей підвищення температури термостату: 1 – 25 К/год; 2 – 75 К/год; 3 – 125 К/год;)

На рис. 4 наведено залежність похибки при вимірюванні теплопровідності абсолютним методом в умовах монотонного розігріву від точності інформації про теплоємності досліджуваного зразка та еталонного нагрівника для різних швидкостей підвищення температури термостату. Залежність 1 на рис. 4 для стаціонарних вимірювань абсолютним методом відповідає вимірюванню при одній температурі за одну годину. Для пришвидшення вимірювань у 3-5 разів (як це можливо у випадку застосування алгоритмів програмованого розігріву вимірювального термостату за допомогою ПІД-регуляторів з одночасним підігрівом зразка змінним струмом та теплом еталонного нагрівника) з внесенням додаткової похибки не вище 0.5 % необхідно є інформація про теплоємності зразка та еталонного нагрівника з точністю не гірше 1 – 3 %.

Висновки

1. Створено комп'ютерну модель, яка дозволяє розраховувати часову залежність потужності фонових нагрівників, необхідну для монотонного розігріву вимірювального термостату із заданою швидкістю.
2. Досліджено похибки при вимірюванні теплопровідності абсолютним методом в умовах неперервного зростання температури. Встановлено, що для зменшення похибок і досягнення

- можливості пришвидшення процесу вимірювань необхідно враховувати величини теплоємностей зразка та елементів вимірювальної установки, зокрема еталонного нагрівника.
3. Встановлено, що для пришвидшення вимірювань у 3-5 разів із внесенням додаткової похибки не вище 0.5 % необхідна інформація про теплоємності зразка та еталонного нагрівника з точністю не гірше 1 – 3 %.

Література

1. T. Caillat, A. Borshchevsky, J.-P. Fleurial, Search for New High Temperature Thermoelectric Materials, SAE Technical Paper 929424 (1992).
2. Jin-Cheng Zheng, Recent Advances on Thermoelectric Materials, Front. Phys. China 3 (3), 269 – 279 (2008).
3. J.R. Sootsman, D.Y. Chung, and M.G. Kanatzidis, New and Old Concepts in Thermoelectric Materials, Angewandte Chemie International Edition 48 (46), 8616 – 8639 (2009).
4. Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В. Установка для вимірювання властивостей термоелектричного матеріалу // Термоелектрика. – 2010. – № 3. С. 41 – 49.
5. L.I. Anatyshuk, 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. Дослідження впливу випромінювання на точність вимірювання теплопровідності абсолютним методом // Термоелектрика. – 2012. – № 1. – С. 67 – 76.
7. L.I. Anatyshuk, V.V. Lysko. 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.
8. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Про підвищення швидкодії при вимірюванні теплопровідності абсолютним методом, Термоелектрика, №5, 2014.

Надійшла до редакції 03.12.2018

Анатичук Л.І. ак. НАН України,^{1,2}
Лисько В.В. канд. физ.-мат. наук^{1,2}

¹Інститут термоелектричності, ул. Науки, 1,
Черновці, 58029, Україна e-mail: anatysh@gmail.com;
²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновці, 58012, Україна

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ В
УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Приведены результаты компьютерных исследований, направленных на повышение быстродействия при определении термоэлектрических параметров материалов абсолютным методом. Рассмотрена возможность повышения быстродействия путем проведением измерений в условиях непрерывного монотонного разогрева измерительного термостату. Проведен анализ погрешностей при измерениях теплопроводности для такого случая и установлено условия их минимизации. Определено, что измерение в условиях непрерывного изменения температуры при учете теплоемкостей исследуемого образца и эталонного нагревателя позволяют в 3-5 раз уменьшить время, необходимое на измерение температурных зависимостей термоэлектрических параметров образца, при незначительном, к 0.5 – 1 %, увеличении погрешностей измерений. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: измерение, электропроводность, термоЕРС, теплопроводность, добротность, погрешности, быстродействие.

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

V.V. Lysko *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,

MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS UNDER CONDITIONS OF CONTINUOUS TEMPERATURE CHANGE

The results of computer studies aimed at improving performance when defining the thermoelectric parameters of materials by the absolute method are presented. The possibility of performance increase by measurement under conditions of continuous monotonous heating of the measuring thermostat is considered. The analysis of errors in the measurement of thermal conductivity for this case is carried out, and the conditions for their minimization are established. It was determined that measurements under conditions of continuous temperature change with regard to heat capacities of the test sample and the reference heater allow reducing by a factor of 3-5 the time required to measure the temperature dependences of thermoelectric parameters of the sample, with a slight increase to 0.5 - 1% of measurement errors. Bibl. 8, Fig. 4.

Key words: measurement, electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, figure of merit, errors, performance.

References

1. Caillat T., Borshchevsky A., Fleurial J.-P. (1992). Search for new high temperature thermoelectric materials. *SAE Technical Paper 929424*.
2. Zheng Jin-Cheng (2008). Recent advances on thermoelectric materials. *Front. Phys. China* 3 (3), 269 – 279.

3. J.R. Sootsman, D.Y. Chung, and M.G. Kanatzidis. (2009). New and old concepts in thermoelectric materials. *Angewandte Chemie International Edition* 48 (46), 8616 – 8639.
4. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2010). Installation for measuring thermoelectric material properties. *J.Thermoelectricity*, 3, 41 – 49.
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. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J.Thermoelectricity*, 1, 67 – 76.
7. L.I. Anatyshuk, V.V. Lysko (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J.Electronic Materials*, 43 (10), 3863-3869.
8. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). Increasing the rapidity of thermal conductivity measurement by the absolute measurement. *J.Thermoelectricity*, 5.

Submitted 03.12.2018