

УДК 53.082

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

Гаврилюк М.В.¹

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

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЯ
ПРОЦЕСІВ ВИМІРЮВАНЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ У СКЛАДІ ГЕНЕРАТОРНИХ
ТА ХОЛОДИЛЬНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

Представлено результати розробки системи автоматизації процесу вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів абсолютним методом. Блок керування вимірюваннями побудовано на основі багатоканального аналогово-цифрового перетворювача. Обробка та відображення результатів вимірювань проводяться за допомогою комп'ютера, до якого блок вимірювань підключається по стандартному каналу USB. Результати відображаються у вигляді графіків і таблиць. Розроблена система автоматизації є універсальною та дозволяє реалізовувати вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів як у складі генераторних, так і у складі холодильних термоелектричних модулів. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, термоелектричний матеріал, автоматизація, комп'ютеризація.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Відомо, що контроль якості термоелектричних перетворювачів енергії (модулів) відіграє важливу роль як при їх розробці, так і при створенні на основі цих модулів термоелектричних приладів для охолодження та генерації електричної енергії. Такий контроль здійснюється шляхом вимірювання параметрів термоелектричних модулів – холодопродуктивності, холодильного коефіцієнту та перепаду температур на модулі для термоелектричних охолоджувачів; ККД, електричної потужності – для термоелектричних генераторів. Одним з найкращих методів вимірювань при цьому є абсолютний метод [1, 2]. Основними перевагами цього методу є

визначення параметрів модулів у реальних умовах їх експлуатації та можливість інструментальної мінімізації основних джерел похибок вимірювань [3].

Крім того, абсолютний метод дозволяє додатково отримати інформацію 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 [4 - 6].

Реалізація цих методик вимагає повної автоматизації процесу вимірювань. Крім того, це дозволить усунути можливі суб'єктивні помилки операторів при вимірюваннях електричних сигналів, їх обробки для визначення σ , α , κ , Z , при побудові графіків та таблиць тощо.

Тому *метою роботи* було створення комп'ютеризованої системи керування вимірюваннями для автоматизації процесів визначення термоелектричних властивостей матеріалів у складі термоелектричних перетворювачів енергії, обробки і відображення їх результатів.

Вимоги до автоматизації вимірювань.

Схеми абсолютного методу, взятого за основу при створенні автоматизованого обладнання для визначення параметрів генераторних та холодильних термоелектричних модулів, наведені на рис. 1 та рис. 2. відповідно.

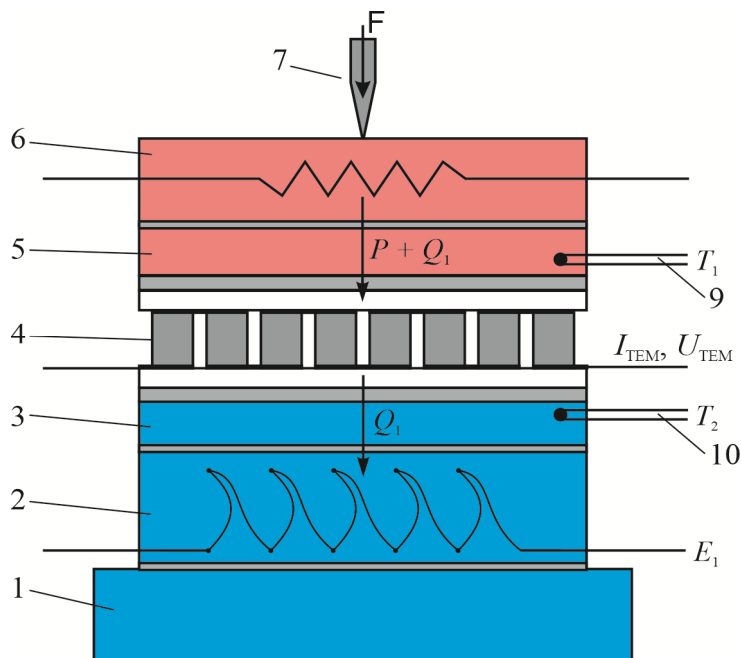


Рис. 1 Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів: 1 – термостат; 2 – тепломір, 3, 5 – тепловирівнюючі пластини; 4 – досліджуваний модуль; 6 – нагрівник; 7 – притиск; 9, 10 – термопари.

Для визначення параметрів генераторного термоелектричного модуля, останній розміщується між двома тепловирівнюючими пластинами, які у свою чергу розташовані між електричним нагрівником та тепломіром (рис. 1). Тепломір другою стороною контактує з термостатом. За допомогою електричного нагрівника на модулі створюється заданий перепад температур та вимірюється ЕРС $E_{ТЕМ}$, що виникає на виводах модуля. Після цього до виводів модуля підключається узгоджене електричне навантаження, при якому напруга на виводах модуля стане рівною половині ЕРС.

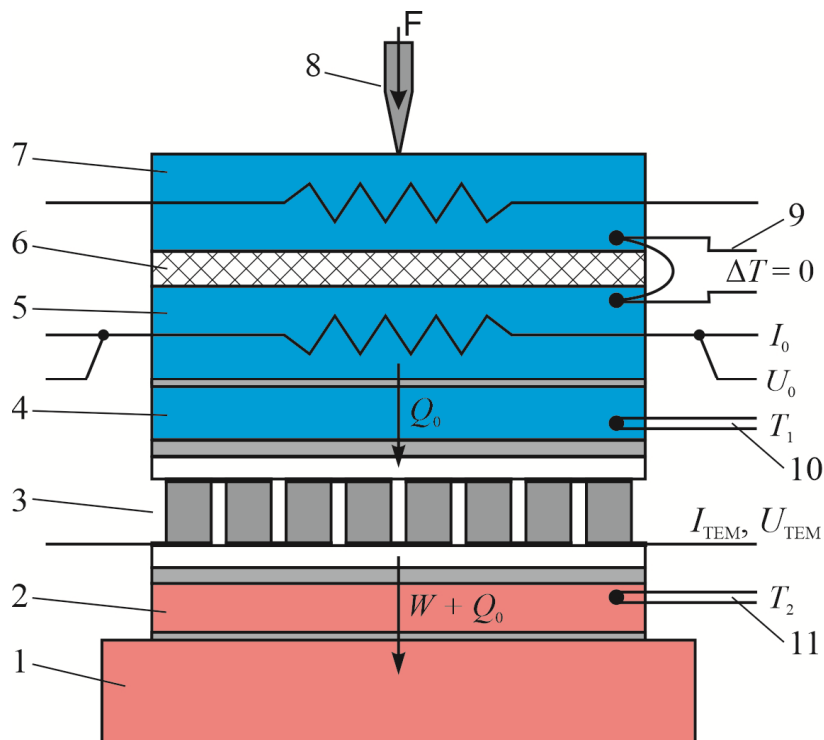


Рис. 2 Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – термостат; 2, 4 – тепловирівнюючі пластини; 3 – досліджуваний модуль; 5 – еталонний нагрівник; 6 – теплоізоляція; 7 – захисний нагрівник; 8 – притиск; 9 – нуль-термопара; 10, 11 – термопари.

Вимірюються величини електричного струму $I_{ТЕМ}$, що проходить через модуль, напруги на його виводах $U_{ТЕМ}$ та за допомогою тепломіра визначається величина теплового потоку Q_1 , що відводиться від холодної сторони модуля до термостату. Електрична потужність модуля P та його ККД η визначаються за формулами

$$P = I_{ТЕМ} \cdot U_{ТЕМ} , \tag{1}$$

$$\eta = \frac{P}{Q_1 + P_{ТЕМ}} . \tag{2}$$

де $I_{\text{ТЕМ}}$ та $U_{\text{ТЕМ}}$ – струм та напруга модуля, Q_1 – тепловий потік, що відводиться від холодної сторони модуля та визначається за допомогою тепломіра, F – притиск.

При визначенні параметрів модулів охолодження додатково використовується захисний нагрівник, що запобігає втратам тепла з нагрівника через притискний механізм (рис. 2). Величини холодопродуктивності Q_0 , перепаду температур ΔT та холодильного коефіцієнту ε визначаються по формулам

$$Q_0 = I_0 \cdot U_0, \quad (3)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W}, \quad (5)$$

де I_0 та U_0 – струм через нагрівник та спад напруги на ньому, T_1 – температура «холодної» сторони модуля, T_2 – температура «гарячої» сторони модуля, W – споживана модулем електрична потужність.

Для знаходження властивостей термоелектричного матеріалу у складі модулів використано методику, детально описану у роботах [4, 6]

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

$$\sigma = \frac{1}{R_M / 2N} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1} \cdot K_1, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{E / 2N}{\Delta T} \cdot K_2, \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{Q / 2N}{\Delta T} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1} \cdot K_3, \quad (8)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (9)$$

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; ΔT – різниця температур між термопарами, розташованими на тепловірвнюючих пластинах, між якими знаходиться досліджуваний модуль; Q – тепловий потік через модуль; $K_1 - K_3$ – поправочні коефіцієнти для зменшення величини похибок вимірювань,

розраховані для заданої конструкції модуля та вимірювального обладнання або визначені експериментально.

Для реалізації такого методу система керування вимірюваннями повинна мати:

- засоби задання та підтримання температури вимірювального термостату у широкому інтервалі температур (терморегулятор, блок живлення, контрольна термопара тощо);
- регульований блок живлення для пропускання струму через модуль, комутатор струму;
- регульований блок живлення еталонного нагрівника;
- засоби підтримання нульового перепаду температур між еталонним нагрівником та захисним екраном (терморегулятор, блок живлення, контрольна нуль-термопара тощо);
- високоточний вимірювач напруги з розрізною здатністю не менше 1 мкВ;
- можливість відпрацювання необхідної циклограми включення/виключення блоків живлення та запису результатів вимірювання всіх вимірювальних каналів (температур «гарячої» та «холодної» термопар, спаду напруги між модулі, величин струму та напруги через модуль, струму та напруги живлення еталонного нагрівника тощо);
- можливість передавання результатів вимірювань на комп'ютер для їх подальшої обробки, побудови графіків та таблиць, формування паспорту модуля.

Опис системи керування вимірюваннями.

Розроблено універсальні блоки, які мають дискретні входи управління і відповідні аналогові виходи. Комбінуючи ці блоки і керуючи ними по необхідних циклограмах за допомогою програмованого контролера, можна створити різні установки, що дозволяють здійснити будь-який спосіб вимірювання параметрів термоелектричних модулів.

Блок-схема системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів наведена на рис. 3. Вона побудована на основі 4-канального аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) з диференціальними входами, діапазон вимірюваних напруг якого – $\pm (5 \text{ мкВ} - 2.5 \text{ В})$. Диференціальні входи АЦП дозволяють проводити високоточні вимірювання напруг в електричних колах різних блоків, які можуть мати різні джерела живлення.

До складу системи також входять електронне навантаження 18, в якому використана лінійка сучасних польових транзисторів, виготовлених за MOSFET технологією, з низьким опором у відкритому стані, що зменшує виділення на ньому тепла та дозволяє обійтися без радіаторів.

У держаку термоелектричного модуля 1 використовується змінний нагрівний теплообмінник, який містить в собі еталонний нагрівник 15, з давачем температури в тепловірвнюючій пластині 14, екранний нагрівник та диференціальну нуль-термопару. Теплообмінник через колодку 19 підключається до блоків живлення еталонного 27 та екранного 24 нагрівачів, а також до вимірювачів струму/напруги еталонного нагрівача 26 та нуль-вузла 25. Ці всі елементи входять у силовий блок 2.

Для виконання алгоритму вимірювань застосовується блок керування 3, який містить 4 – канальний прецизійний АЦП 20 та електронне навантаження 18, а також системи управління електронним навантаженням та термостатом охолодження. До системи управління електронним

навантаженням входить блок керування 22 та перетворювач струму/напруги електронного навантаження 21. До системи управління термостатом входять блоки живлення 23 елементів термостата та схеми самого блока керування. Управляє всіма елементами блока керування центральний процесор 29, який також забезпечує вивід отриманої інформації на цифровий індикатор 28. В блоці керування знаходиться силовий ключ 30 для еталонного нагрівника 15.

Термостат пристрою містить основу-радіатор 6 з вентилятором 5, водяний теплообмінник 7 із регульовальним краном води 8 та додатковий нагрівник 9. Над термостатом розташовується тепломір 10 для визначення теплового потоку. Між тепломіром та нагрівником розміщується досліджуваний термоелектричний модуль 12. Елементи термостату 7 – 11 теж можуть бути змінними, в залежності від типу досліджуваного модуля і різних умов вимірювання. Вентилятори 5 та 7, а також нагрівник 9 – допоміжні, використовуються за потреби. Нагрівний теплообмінник, модуль і термостат у держаку між собою притискуються при вимірюванні вузлом притиску, зусилля якого контролюється і визначається динамометром 13.

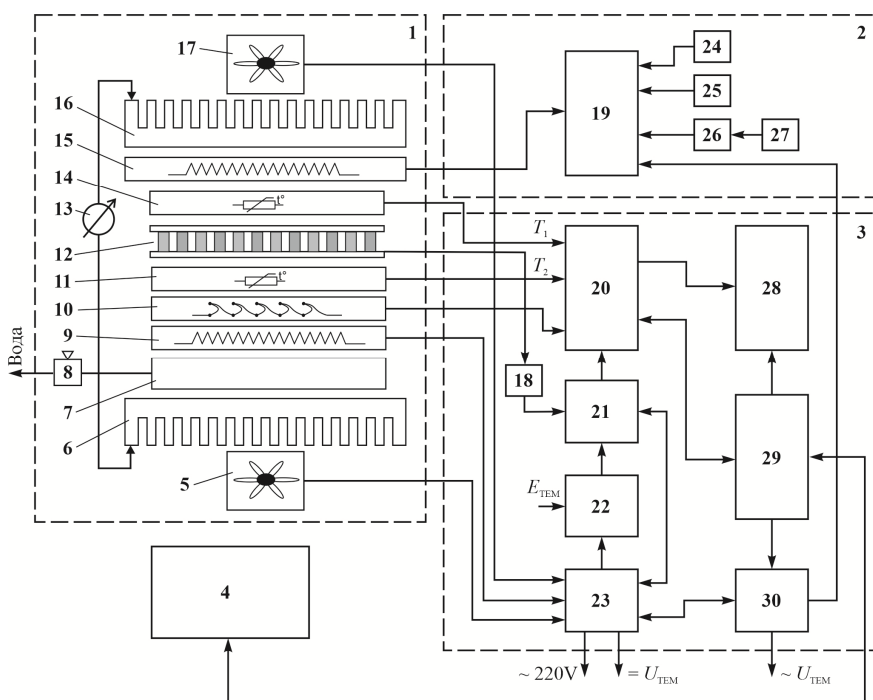


Рис. 3 Блок схема системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів абсолютним методом: 1 – держак термоелектричного модуля; 2 – силовий блок; 3 – блок керування; 4 – персональний комп'ютер; 5, 17 – вентилятори; 6, 16 – повітряні теплообмінники; 7 – водяний теплообмінник; 8 – кран; 9 – електричний нагрівач термостата; 10 – тепломір; 11, 14 – тепловирівнюючі пластини з вмонтованими давачами температури; 12 – досліджуваний термоелектричний модуль; 13 – динамометр; 15 – нагрівач модуля; 18 – електронне навантаження; 19 – колодка підключення нагрівачів; 20 – 4- каналний прецизійний АЦП; 21 – перетворювач струму/напруги електронного навантаження; 22 – блок керування електронним навантаженням; 23 – блок живлення термостату; 24 – блок живлення екранного нагрівача; 25 – нуль-вузол; 26 – вимірювач струму/напруги еталонного нагрівача; 27 – блок живлення еталонного нагрівача; 28 – цифровий індикатор; 29 – керуючий процесор; 30 – симісторний ключ керування нагрівачем.

Вимірювальний блок по каналу USB підключений до персонального комп'ютера 4, де задаються циклограми вимірювань, відбуваються необхідні обчислення, будуються відповідні графіки, формуються протоколи вимірювань.

Для вимірювання параметрів термоелектричного модуля на термостаті задається необхідна температура, яка підтримується на тепловирівнюючій пластині 11. Підтримка на заданому рівні температури відбувається за допомогою регулювання витрати води у теплообміннику 7 та коригуванні її додатковим нагрівником 8 за допомогою ПД-ШИМ-регулятора. Задається температура і на гарячій стороні термоелектричного модуля, яка буде визначатись за показами давача в пластині 14 нагрівного теплообмінника. На еталонний нагрівник 15, через ключ 30, подається напруга для нагріву гарячої сторони модуля до необхідної температури. Відслідковуючи сигнал нуль-термопари, екранний нагрівник автоматично нагрівається до температури гарячої сторони модуля, максимально компенсуючи таким чином теплові втрати з еталонного нагрівника. Похибка в підтримці температур - не більше $\pm 0,1$ °С. Тепловий потік, що проходить через модуль, проходить також і через тепломір, сигнал якого вимірюється АЦП. Також АЦП вимірює через блок 26 струм і напругу еталонного нагрівника

В залежності від вибраного алгоритму вимірювання, тепловий потік може визначатись як по тепломіру так і по потужності еталонного нагрівника, за умови компенсації теплових втрат екранним нагрівником. Це дозволяє реалізувати різні алгоритми вимірювання параметрів як генераторних модулів, так і модулів охолодження. Наприклад, при визначенні параметрів генераторних модулів теплова потужність від електричного нагрівника, яка проходить через модуль, генерує на його виводах електричну напругу. До моменту виходу температур на тепловирівнюючих пластинах на задані рівні, електронне навантаження відключене і за допомогою АЦП вимірюється термоЕРС модуля. Після досягнення заданого перепаду температур, по команді процесора, вмикається електронне навантаження і вимірюється струм модуля. При цьому терморегулятори термостату і нагрівного теплообмінника автоматично компенсують теплове збурення, викликане ефектом Пельтьє від дії струму модуля. Всі вимірні сигнали надходять у контролер, де нормуються до конкретних фізичних величин. Величини електричних напруг, струмів та температур виводяться на цифровий індикатор 28, а також надходять до персонального комп'ютера 4 для обчислень та побудови графіків в заданому діапазоні температур. Послідовність вимірювань та часові витримки між ними задаються у циклограмі, яку формує оператор перед початком вимірювань.

Зовнішній вигляд системи автоматизації вимірювань наведено на рис. 4.



Рис. 4. Зовнішній вигляд системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів.

Розроблена система є універсальною. Кількість і характеристики керуючих та вимірювальних каналів дозволяє застосовувати її і для інших методів вимірювання, наприклад, методу Хармана.

На основі розробленої системи управління було проведено автоматизацію обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів розмірами від 10×10 до 72×72 мм у діапазоні температур від 30 до 600 °С та модулів охолодження аналогічних розмірів – від -50 до 100 °С, а також визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі цих модулів.

Висновки

1. Розроблено універсальну електронну систему керування, що дозволяє реалізовувати вимірювання параметрів термоелектричних генераторних та холодильних модулів абсолютним методом, а також визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі цих модулів. Автоматизоване вимірювальне обладнання на основі такої системи дозволяє проводити вимірювання для широкого діапазону робочих температур: від -50 до 100 °С – для модулів охолодження та від 30 до 600 °С – для генераторних модулів.
2. Проведено комп'ютеризацію процесу вимірювань. Обладнання, створене на основі розробленої системи керування, дозволяє виконувати вимірювання в режимі реального часу, обробляти їх результати, виводити результати вимірювань на екран у вигляді графіків і таблиць, зберігати їх на комп'ютері, роздруковувати паспорт дослідженого модуля.

Література

1. 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.
2. L.I. Anatyshuk, M.V. Havrylyuk. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules // Journal of Electronic Materials. – Vol. 40. – No. 5. – 2011. – pp. 1292-1297.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermo-electric materials, Journal of Electronic Materials, Volume 43, Issue 10, p. 3863-3869, 2014.
4. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів // Термоелектрика. – 2020, – №3. – С. 70-80.
5. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Визначення температурних залежностей термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів при зростаючому перепаді температур // Термоелектрика. – 2021, №2. – С. 53-57.
6. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження // Термоелектрика. – 2021, №3. – С. 49-54.

Надійшли до редакції: 10.06.2021

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*

Гаврылюк Н.В.¹

Лысько В.В. *канд. физ.-мат. наук*

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, *e-mail: anatysh@gmail.com*

²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ
В СОСТАВЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МОДУЛЕЙ ПРИ ВОЗРАСТАЮЩЕМ ПЕРЕПАДЕ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Предложена методика определения термоэлектрических параметров материалов в составе генераторных термоэлектрических модулей в случае, когда холодная сторона модуля термостатирована, а перепад температуры на модуле постепенно возрастает за счет повышения температуры горячей стороны с помощью электрического нагревателя. Рассмотрена подробная физическая модель этой методики и приведены результаты оценки возможных величин погрешностей при измерениях. Библ. 9, рис. 3.

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

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

M.V. Havryliuk¹

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;

AUTOMATION AND COMPUTERIZATION OF PROCESSES OF MEASURING THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS FORMING PART OF GENERATOR AND COOLING THERMOELECTRIC MODULES

The results of development of automation system for measuring thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric modules by the absolute method are presented. The measurement control unit is built on the basis of a multi-channel analog-to-digital converter. Processing and display of measurement results is carried out using a computer to which the measurement unit is connected via a standard USB channel. The results are displayed in the form of graphs and tables. The developed automation system is universal and makes it possible to measure the thermoelectric properties of materials both as part of generator and as part of cooling thermoelectric modules. Bibl. 9, Fig. 3.

Key words: electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, thermoelectric material, automation, computerization.

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, 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: 10.06.2021