

Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Представлено результати розробки конструкції автоматизованого обладнання для визначення параметрів генераторних термоелектричних модулів. Обладнання створено на основі абсолютного методу, що дозволяє проводити вимірювання параметрів модулів у реальних умовах їх експлуатації, інструментально мінімізувати основні джерела похибок вимірювань, а також визначати термоелектричні властивості матеріалів у складі цих модулів. Блок керування вимірюваннями побудовано на основі багатоканального аналогово-цифрового перетворювача. Обробка та відображення результатів вимірювань проводяться за допомогою комп'ютера, результати відображаються у вигляді графіків і таблиць.

Ключові слова: термоелектричний модуль, генерація електричної енергії, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, термоелектричний матеріал, автоматизація, комп'ютеризація.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Контроль якості термоелектричних генераторних модулів відіграє важливу роль при розробці цих модулів та створенні на їх основі термоелектричних генераторів. Цей контроль здійснюється шляхом вимірювання параметрів модулів – електричної потужності та ККД, а також їх залежностей від температури [1]. Одним з найкращих методів вимірювань при цьому є абсолютний метод [2, 3], який дозволяє проводити вимірювання у реальних умовах експлуатації модулів та дає можливість інструментальної мінімізації основних джерел похибок вимірювань.

Крім того, абсолютний метод дозволяє додатково отримати інформацію про властивості матеріалу у складі модуля – термоЕРС, електропровідності та теплопровідності пари термоелектричних віток [4, 5]. Ця інформація є корисною для оптимізації матеріалу для конкретних застосувань модулів у термоелектричних генераторах різного типу, а також для вдосконалення конструкції самих модулів.

Мета цієї роботи – розробка конструкції обладнання для визначення параметрів генераторних термоелектричних модулів, а також властивостей термоелектричного матеріалу у складі цих модулів.

1. Опис методики вимірювань

Схему абсолютного методу визначення параметрів генераторних термоелектричних модулів наведено на рис. 1. Модуль розміщується між двома тепловирівнюючими пластинами, які у свою чергу розташовані між електричним нагрівником та тепломіром. 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

$$P = I_{TEM} \cdot U_{TEM}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_1 + P_{TEM}}. \quad (2)$$

The diagram illustrates a multi-layered structure for a quantum device. The layers are numbered 1 through 10. A probe tip (7) applies a force F to the top layer (6). A zigzag line in layer 6 represents a quantum dot chain. A downward arrow labeled $P + Q_1$ indicates the total force on layer 5. A series of gray rectangles in layer 4 represent a gate array. A downward arrow labeled Q_1 indicates the force on layer 3. A wavy line in layer 2 represents a quantum dot chain. Labels on the right indicate temperatures T_1 and T_2 , and a current U_{TEM} . The bottom layer is labeled E_1 .

Рис. 1 – Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів:
1 – термостат; 2 – тепломір, 3, 5 – теплоірівнюючі пластини; 4 – досліджуваний модуль; 6 – нагрівник;
8 – притиск; 10, 11 – термопари

Для знаходження властивостей термоелектричного матеріалу у складі модулів використано методику, детально описану у роботі [5]. Усереднені значення електропровідності, термоЕРС, теплопровідності та добротності матеріалу віток термоелектричного модуля визначаються за формулами

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

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

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

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

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 тепловирівнюючих 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.

2. Опис конструкції вимірювального обладнання

Обладнання для визначення параметрів генераторного термоелектричного модуля складається з держака модуля, електронних вимірювального блоку та блоку терморегулювання, блоку електричного живлення, гідравлічної арматури для підключення держака до магістралі водяного охолодження.

Обладнання є комп'ютеризованим для усунення можливих суб'єктивних похибок та підвищення точності і швидкодії вимірювань. Система автоматизації вимірювань побудована на основі 4-канального аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) з диференціальними входами, діапазон вимірюваних напруг якого – $\pm (5 \text{ мВ} - 2.5 \text{ В})$. Диференціальні входи АЦП дозволяють проводити високоточні вимірювання напруг в електричних колах різних блоків, які можуть мати різні джерела живлення.

Зовнішній вигляд системи автоматизації вимірювань наведено на рис. 2.



Рис. 2 – Зовнішній вигляд системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних генераторних модулів

Розроблена система керування є універсальною. 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 модулів.

Держак генераторного модуля - це механічний конструктив, в який поміщається досліджуваний генераторний модуль. Держак забезпечує перенесення через модуль теплової потужності і зняття з модуля генерованої електричної напруги. Перенос теплової енергії через модуль здійснюється за допомогою двох теплообмінних блоків: нагрівного блоку і блоку відведення тепла. Зовнішній вигляд держака генераторного модуля показаний на рис. 3.

Нагрівний блок має основний еталонний нагрівник гарячої сторони генераторного модуля та елементи контролю температури та теплового потоку: термопари, захисні і екранні допоміжні нагрівники та повітряний охолоджувач.

Блок відведення тепла з холодної сторони модуля має основний водяний теплообмінник і також елементи контролю температури та теплового потоку: термопари, тепломір, допоміжні нагрівники та повітряний охолоджувач.

Для підвищення точності вимірювань і універсальності, теплообмінні блоки мають змінні елементи, які розроблені для конкретних типорозмірів модулів і які можна легко змінювати.

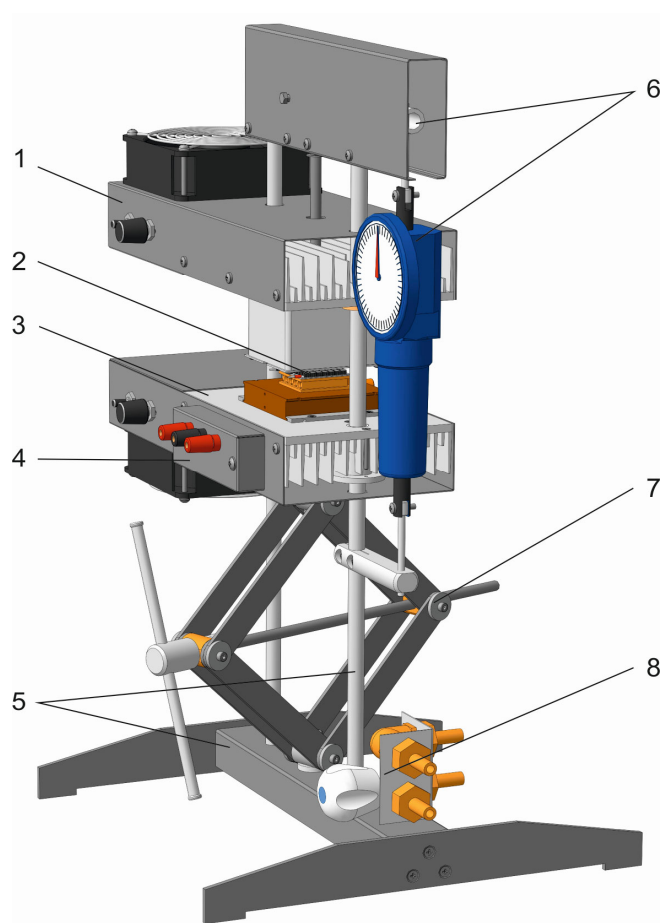


Рис. 3 – Конструкція держака генераторного модуля:

1 – нагрівний блок; 2 – генераторний модуль; 3 – блок відведення тепла;
4 – електричний клемник; 5 – несучий сталевий каркас; 6 – важельно-пружинний механізм притиску;
7 – домкратно-гвинтовий механізм переміщення теплообмінника; 8 – гідравлічна арматура

Теплообмінні блоки мають підшипники ковзання за допомогою яких вони можуть рухатись вгору-вниз вздовж двох сталевих стійок, закріплених на основі сталевий каркасу. Теплообмінні блоки мають робочі площадки між якими і затискається генераторних модулів при вимірюванні. Центри робочих площадок співвісні.

Нагрівний блок закріплений у верхній частині стійок каркасу, а блок відведення тепла на цих же стійках розміщений нижче і може переміщатись вгору-вниз за допомогою гвинтового механізму домкратного типу. Ще вище, над нагрівним блоком на стійках закріплений пристрій притиску генераторного модуля між робочими площадками теплообмінних блоків. Зусилля притиску фіксується важельно-пружинним способом, а виставляється за допомогою домкратного механізму. В якості пружини використовується стандартний динамометр.

До блоку відводу тепла прикріплений електричний клемник для підключення виводів генераторного модуля. Клемник кабелем електрично підключається до блоку електронного навантаження.

Джерелом теплової потужності для генераторного модуля у пристрої є нагрівний блок. Основою конструкції нагрівного блоку є алюмінієвий ребристий радіатор, до якого прикріплюється всі його складові частини: елементи переміщення, притиску та змінний вузол нагрівників. Для різних типорозмірів генераторних модулів передбачені співрозмірні їм нагрівні елементи - пічки. Будова нагрівного блоку показано на рис. 4.

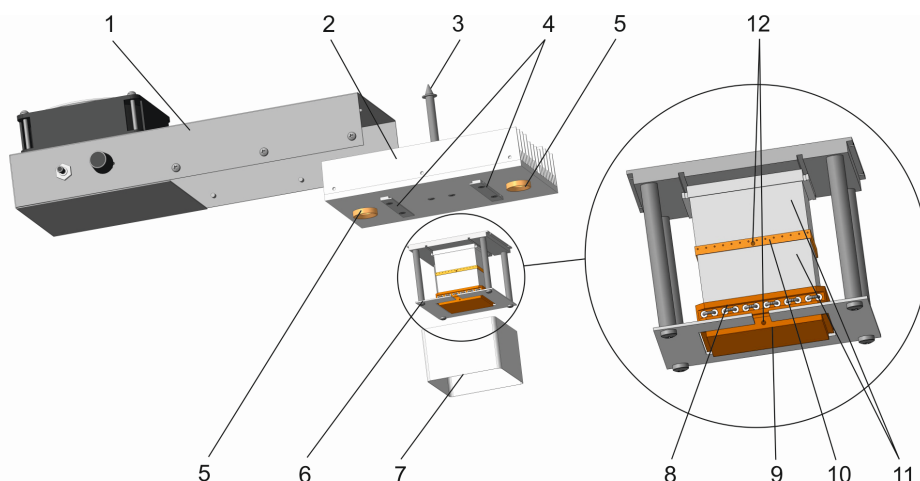


Рис. 4 – Будова нагрівного блоку: 1 – кожух з вентилятором; 2 – ребристий радіатор; 3 – шток вузла притиску; 4 – кріпильний вузол для змінних нагрівників, 5 – підшипники ковзання вузла переміщення теплообмінних блоків; 6 - вузол нагрівників; 7 – кожух вузла нагрівників; 8 – еталонний нагрівник; 9 - тепловірівнююча пластина; 10 – екранний нагрівник; 11 - термоізоляційні прокладки; 12 – отвори для установки термопар

Теплова енергія яка протікає через робочі поверхні генераторного модуля частково перетворюється в електричну енергію, а решту забирається блоком відводу тепла і розсіюється в навколишнє середовище. Основою конструкції блоку відводу тепла є теж алюмінієвий ребристий радіатор, до якого прикріплюється всі його складові частини: елементи переміщення, притиску та змінний вузол водяного теплообмінника, термоміра та додаткового коригуючого нагрівника (рис. 5).

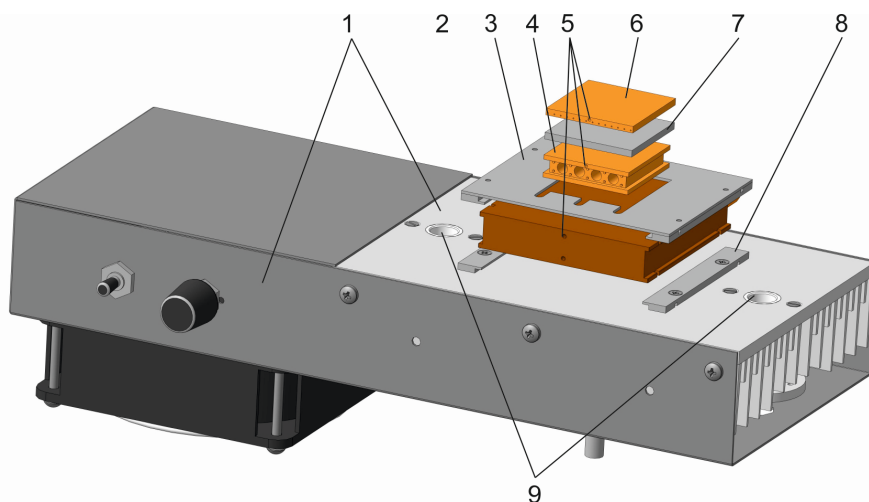


Рис. 5 – Будова блоку відводу тепла:

1 – ребристий радіатор з вентилятором обдуву; 2 – водяний теплообмінник; 3 – центрувальна пластина для термоміра; 4 – термомір; 5 - отвори для установки термопар; 6 – коригуючий нагрівник, 7 - тепловий шунт; 8 – кріпильний вузол для змінних теплообмінників. 9 – підшипники ковзання вузла переміщення теплообмінних блоків

Для різних типів генераторних модулів передбачені з'ємні, співрозмірні їм термоміри та нагрівники. За допомогою коригуючого нагрівника можна в широких межах міняти температурний діапазон вимірювання параметрів генераторних модулів. До центральної частини ребристого радіатора, внизу прикріплений кронштейн, який з'єднаний з верхньою рухомою площадкою домкрату. За допомогою цього домкрату блок відводу тепла і переміщається вверх-вниз.

Важливим є пристрій притиску. Для покращення теплових контактів використовуються теплові драйвери, які можуть працювати при підвищених температурах, в межах діапазону максимальних робочих температур для генераторного модуля.

При вимірюванні параметрів модуля тепла 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. Величини електричних напруг, струмів та температур виводяться на цифровий індикатор, а також надходять до персонального комп'ютера 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.

Розроблене обладнання дозволяє проводити вимірювання параметрів генераторних термоелектричних модулів розмірами від 10x10 до 72x72 мм у діапазоні температур від 30°C до 600°C, а також визначати властивості термоелектричних матеріалів у складі цих модулів.

Висновки

1. Розроблено конструкцію вимірювального обладнання, що дозволяє реалізовувати вимірювання параметрів генераторних термоелектричних модулів абсолютним методом, а також визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі цих модулів. Створене обладнання дозволяє проводити вимірювання параметрів модулів розмірами від 10x10 до 72x72 мм у діапазоні температур від 30°C до 600°C.
2. Створене обладнання комп'ютеризовано, що дозволяє виконувати вимірювання за заданим алгоритмом, 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. A. Montecucco, J. Buckle, J. Siviter, A. R. Knox. A New Test Rig for Accurate Nonparametric Measurement and Characterization of Thermoelectric Devices. *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, No. 7, 2013.
2. L. Rauscher, S. Fujimoto, H.T. Kaibe, S. Sano, Efficiency Determination and General Characterization of Thermoelectric Generators Using an Absolute Measurement of the Heat Flow, *Komatsu LTD, Technology Research Center, Research Division, 1200 Manda, Hiratsuka, Kanagawa, Japan, Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol.* 16, 2005, 1054-1060.
3. L.I. Anatychuk, 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.
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.

Надійшла до редакції: 16.08.2021

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

Гаврилюк Н.В.¹

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

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

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

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Представлены результаты разработки конструкции автоматизированного оборудования для определения параметров генераторных термоэлектрических модулей. Оборудование создано на основе абсолютного метода, позволяющего производить измерение параметров модулей в реальных условиях их эксплуатации, инструментально минимизировать основные источники погрешностей измерений, а также определять термоэлектрические свойства материалов в составе этих модулей. Блок управления измерениями построен на основе многоканального аналогово-цифрового преобразователя. Обработка и отображение результатов измерений производятся с помощью компьютера, результаты отображаются в виде графиков и таблиц.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, генерация электрической энергии, электропроводность, термоЭДС, теплопроводность, термоэлектрический материал, автоматизация, компьютеризация.

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

Havryliuk M.V.¹

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: anatykh@gmail.com;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynsky str., 58000, Chernivtsi, Ukraine

EQUIPMENT FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF GENERATOR THERMOELECTRIC MODULES

The results of development of the design of automated equipment for determining the parameters of generator thermoelectric modules are presented. The equipment was created on the basis of the absolute method, which allows measuring the parameters of the modules in real conditions of their operation, instrumentally minimizing the main sources of measurement errors, as well as determining the thermoelectric properties of the materials in the composition of these modules. The measurement control unit is built on the basis of a multi-channel analog-to-digital converter. Processing and display of measurement results are carried out using a computer, the results are displayed in the form of graphs and tables.

Key words: thermoelectric module, generation of electrical energy, electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, thermoelectric material, automation, computerization.

References

1. Montecucco A., Buckle J., Siviter J., Knox A.R. (2013). A new test rig for accurate nonparametric measurement and characterization of thermoelectric devices. *J. Electronic Materials*, 42(7),
2. Rauscher L., Fujimoto S., Kaibe H.T, Sano S. (2005). Efficiency determination and general characterization of thermoelectric generators using an absolute measurement of the heat flow. Komatsu LTD, Technology Research Center, Research Division, 1200 Manda, Hiratsuka, Kanagawa, Japan, Institute of Physics Publishing, *Meas. Sci. Techolog.* 16, 1054-1060.
3. Anatychuk L.I., Havrylyuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *J. Electronic Materials*, 40(5), 1292-1297.
4. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2020). Determination of thermoelectric parameters of materials as part of generator thermoelectric modules. *J. Thermoelectricity*, 3, 70-80.
5. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2021). Determination of temperature dependences of thermoelectric parameters of materials as part of generator thermoelectric modules with a rising temperature drop. *J. Thermoelectricity*, 2, 53-57.

Submitted: 16.08.2021