

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

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ОХОЛОДЖЕННЯ

Представлено результати розробки конструкції обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження, а також визначення термоелектричних властивостей матеріалів у складі цих модулів. Обладнання створено на основі абсолютного методу, що дозволяє визначати параметри модулів у реальних умовах їх експлуатації та дає можливість інструментально мінімізувати основні джерела похибок вимірювань. 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. Бібл. 5, рис. 6.

Ключові слова: термоелектричний модуль, охолодження, 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 охолодження. Такий контроль здійснюється шляхом вимірювання параметрів термоелектричних модулів – холодопродуктивності, холодильного коефіцієнту та перепаду температур на модулі, а також їх залежностей від температури [1]. Одним з найкращих методів вимірювань при цьому є абсолютний метод [2, 3]. Основними перевагами цього методу є визначення параметрів модулів у реальних умовах їх експлуатації та можливість інструментальної мінімізації основних джерел похибок вимірювань [4].

Крім того, абсолютний метод дозволяє додатково отримати інформацію про властивості матеріалу у складі модуля – термоЕРС, електропровідності та теплопровідності пари термоелектричних віток [5]. Ця інформація є корисною як для оптимізації термоелектричного матеріалу для конкретних його застосувань, так і для вдосконалення конструкції модулів.

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

Опис методики вимірювань

Схему абсолютного методу, взятого за основу при створенні автоматизованого обладнання для визначення параметрів термоелектричних модулів охолодження, наведено на рис. 1. Для визначення параметрів термоелектричного модуля, останній розміщується між двома тепловирівнюючими пластинами, які у свою чергу розташовані між електричним нагрівником та термостатом. Додатково використовується захисний нагрівник, температура на якому підтримується рівною температурі еталонного нагрівника, що запобігає втратам тепла з нагрівника через притискний механізм. Через модуль пропускається електричний струм і підбирається така його величина, при якій різниця температур між холодною та гарячою поверхнями модуля досягатиме максимального значення ΔT_{\max} . Після цього включається та поступово збільшується електричний струм через нагрівник до величини, при якій перепад температур на модулі стане рівним нулю. Максимальна холодопродуктивність модуля вважається рівною електричній потужності, що при цьому виділяється електричним нагрівником.

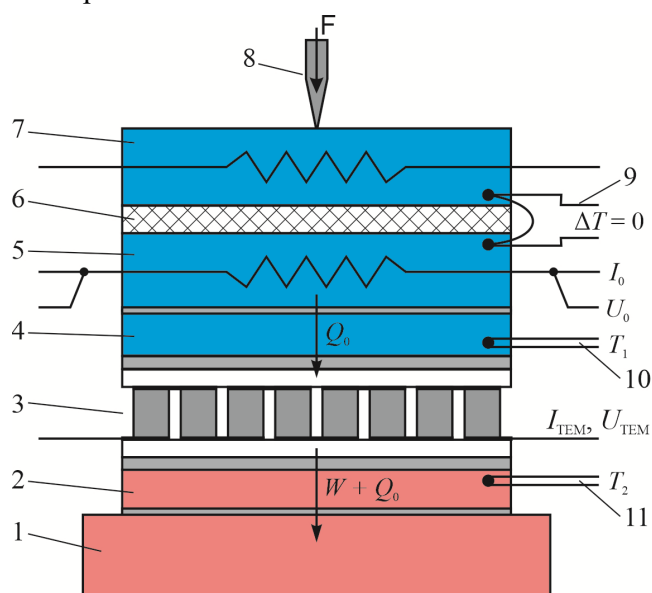


Рис. 1. Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – термостат; 2, 4 – тепловирівнюючі пластини; 3 – досліджуваний модуль; 5 – еталонний нагрівник; 6 – теплоізоляція; 7 – захисний нагрівник; 8 – притиск; 9 – нуль-термопара; 10, 11 – термопари

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 роботі [5]. Вона полягає у наступному:

- визначення електропровідності σ за вимірним значенням 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 вимірними значеннями ЕРС модуля та перепаду температур на модулі;

- визначення теплопровідності κ за вимірними 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

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

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

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

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

де R_M – опір модуля, вимірний 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.

Опис конструкції вимірювального обладнання

Обладнання для визначення параметрів термоелектричного модуля охолодження складається з держака термоелектричного модуля, електронних вимірювального блоку та блоку терморегулювання, блоку електричного живлення, гідравлічної арматури для підключення держака до магістралі водяного охолодження. Вимірювальний блок має інтерфейс для підключення до ПК для проведення вимірювань та обробки їх результатів. Держак модуля охолодження - це механічний конструктив, в який поміщається досліджуваний модуль. Конструкцію держака наведено на рис. 2.

Держак забезпечує подання через модуль струму живлення та теплового навантаження і зняття з модуля інформації про створені перепади температур та переноси теплової енергії. Перенос теплової енергії через модуль здійснюється за допомогою струму живлення між двома теплообмінними блоками – від нагрівного блоку до блоку відведення тепла.

Нагрівний блок має основний еталонний нагрівник холодної сторони модуля охолодження та елементи контролю температури та теплового потоку: термопари, екранний термоелектричний нагрівник/охолоджувач та повітряний охолоджувач.

Блок відведення тепла з гарячої сторони модуля має основний водяний теплообмінник, елементи контролю температури: термопари, допоміжний термоелектричний столик, нагрівники та повітряний охолоджувач.

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

Теплообмінні блоки мають підшипники ковзання за допомогою яких вони можуть рухатись вгору-вниз вздовж двох сталевих стійок, закріплених на основі сталевих каркасу. Теплообмінні блоки мають робочі площадки між якими і затискається досліджуваний модуль 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 досліджуваного модуля охолодження між робочими площадками теплообмінних блоків. Зусилля притиску фіксується важільно-пружинним способом, а виставляється за допомогою домкратного механізму. В якості пружини використовується стандартний динамометр.

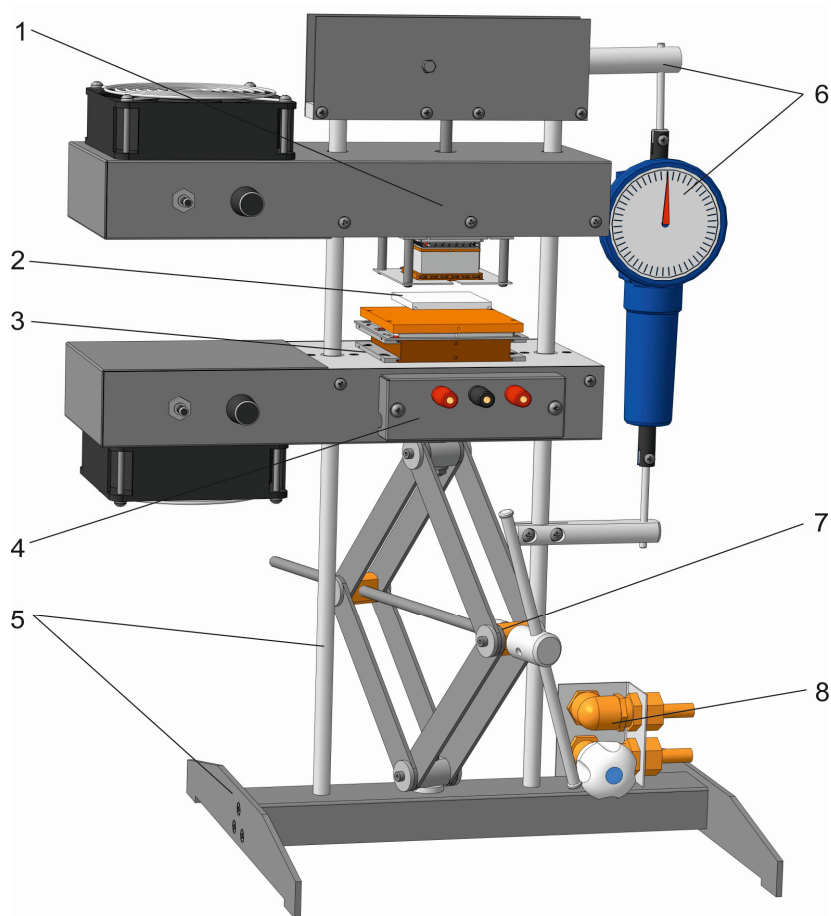


Рис. 2. Конструкція держака модуля обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – нагрівний блок; 2 – досліджуваний модуль; 3 – блок відведення тепла; 4 – електричний клемник; 5 – несучий сталевий каркас; 6 – важельно-пружинний механізм притиску; 7 – домкратно-гвинтовий механізм переміщення теплообмінника; 8 – гідравлічна арматура

До блоку відводу тепла прикріплений електричний клемник для підключення виводів модуля охолодження. Клемник кабелем підключається до електронних блоків.

Джерелом теплової потужності для модуля охолодження у пристрої є нагрівний блок, з якого переноситься у блок відведення тепла. Якщо притоку тепла з нагрівного блоку нема – то модуль працює в режимі максимального перепаду температур. При появі теплового навантаження отриманий перепад температур буде меншим і модуль буде працювати в режимі холодопродуктивності. Основою конструкції нагрівного блоку є алюмінієвий ребристий радіатор, до якого прикріплюється всі його складові частини: елементи переміщення, притиску та змінний вузол нагрівників – робочої площадки для теплового контакту з поверхнею модуля та нагрівників теплового навантаження. Для різних типорозмірів модулів охолодження передбачені співрозмірні їм елементи – робочі площадки і пічки. Будова нагрівного блоку показано на рис. 3.

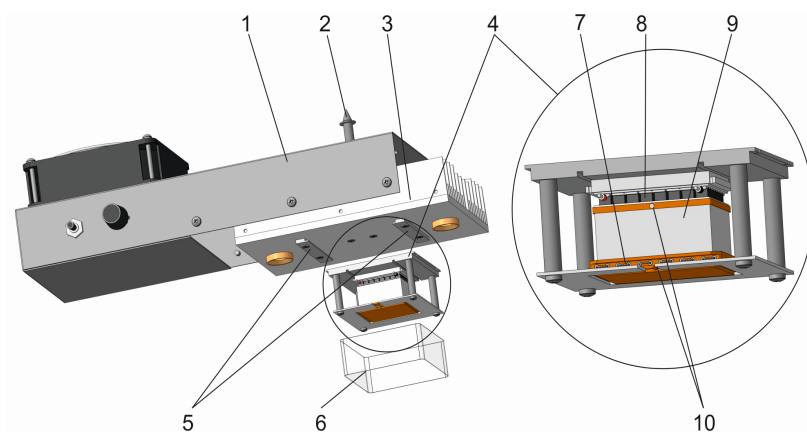


Рис. 3. Будова блоку нагрівників вимірювального обладнання:

- 1 – кожух з вентилятором; 2 – шток вузла притиску; 3 – ребристий радіатор;
 4 вузол нагріву та приймальна робоча площадка для модуля охолодження;
 5 – кріпильний вузол для змінних вузлів нагріву; 6 – кожух вузла нагрівників;
 7 – еталонний нагрівник з приймальною площадкою;
 8 – екранний нагрівник/охолоджувач;
 9 – термоізоляційна прокладка; 9 - отвори для установки термопар

Електричний струм живлення, який протікає через модуль охолодження створює на своїх робочих поверхнях перепад температури і при наявності теплового контакту модуля з робочими площадками теплообмінних блоків появиться тепловий потік в напрямку від блоку нагрівників до блоку відводу тепла. При термостатуванні робочої площадки блоку відводу тепла, на робочій площадці нагрівного блоку температура буде понижуватись до рівня компенсації теплових втрат, викликаних теплопровідністю самого матеріалу модуля та натіканням на робочу площадку зовнішнього тепла. Зовнішнє тепло може бути згенеровано як еталонним нагрівником так і поглинатись з навколишнього середовища. Для відсікання натікання тепла із зовнішнього середовища використовується пасивна термоізоляція робочої площадки та застосування екранного нагрівника/охолоджувача, робота якого керується електронними блоками.

Будова блоку відведення тепла зображена на рис. 4. Основою конструкції блоку є теж алюмінієвий ребристий радіатор, до якого прикріплюється всі його складові частини: елементи переміщення, притиску та змінний вузол водяного теплообмінника та додаткового коригуючого термостоліка – нагрівника, або охолоджувача, за потребою.

Для різних типів модулів охолодження передбачені з'ємні, спів розмірні їм водяні теплообмінники з розміщеними на них робочими площадками, або термостоліками. За допомогою коригуючих нагрівників, або термоелектричних модулів термостоліка можна в широких межах міняти температурний діапазон вимірювання параметрів модулів охолодження.

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.

Для збільшення точності вимірювань параметрів термоелектричного модуля охолодження необхідно, щоб тепло, яке виділяється верхнім теплообмінником і через модуль забирається нижнім теплообмінником, проходило з найменшими втратами. Не ідеальність площин робочих площадок теплообмінників та модуля охолодження, який вимірюється призводить до того, що температури на поверхнях теплообмінників відрізняються від температур на робочих поверхнях модуля. Реальний перепад на модулі буде меншим від вимірюваного перепаду між теплообмінниками, але саме в теплообмінниках розміщені датчики температури з технологічних та конструктивних причин.

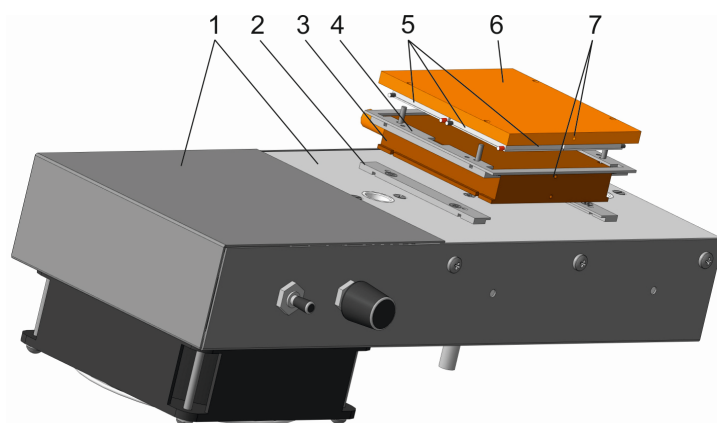


Рис. 4. Будова блоку відведення тепла від модуля охолодження:

1 – ребристий радіатор з вентилятором обдуву; 2 – кріпильний вузол для змінних теплообмінників; 3 – водяний теплообмінник; 4 – центрувальна пластина для термостоліка; 5 – термоелектричні модулі термостоліка; 6 – робоча площадка для установки модуля охолодження; 7 – отвори для установки термодатчиків

Для покращення теплового контакту використовують також теплові драйвери – рідкоподібні речовини з досить великим (відносно повітря) коефіцієнтом теплопровідності. Це можуть бути різноманітні теплопровідні пасти, олії тощо. При використанні таких речовин відбувається заповнення ними повітряного прошарку між нерівностями прилягання поверхонь модуля і теплообмінників. Для покращення теплового контакту поверхні модуля між теплообмінниками слід притиснути із таким зусиллям, щоб вся лишня речовина теплового драйвера з прошарку була витіснена, а тверді поверхні теплообмінників і модуля упирались між собою тільки найближчими виступами. Конструкція держака дозволяє прикладати до модуля зусилля стиску від 0 до 200 кг (наприклад стандартний термоелектричний модуль АЛТЕК - 22, який має сумарну площу віток біля 10 см², повинен притискатись між теплообмінниками із зусиллям біля 80 кг).

Обладнання є комп'ютеризованим для усунення можливих суб'єктивних похибок та підвищення точності і швидкодії вимірювань. Блок-схема системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів наведена на рис. 5. 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.

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 як модулів охолодження, так і генераторних модулів. Всі виміряні 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.

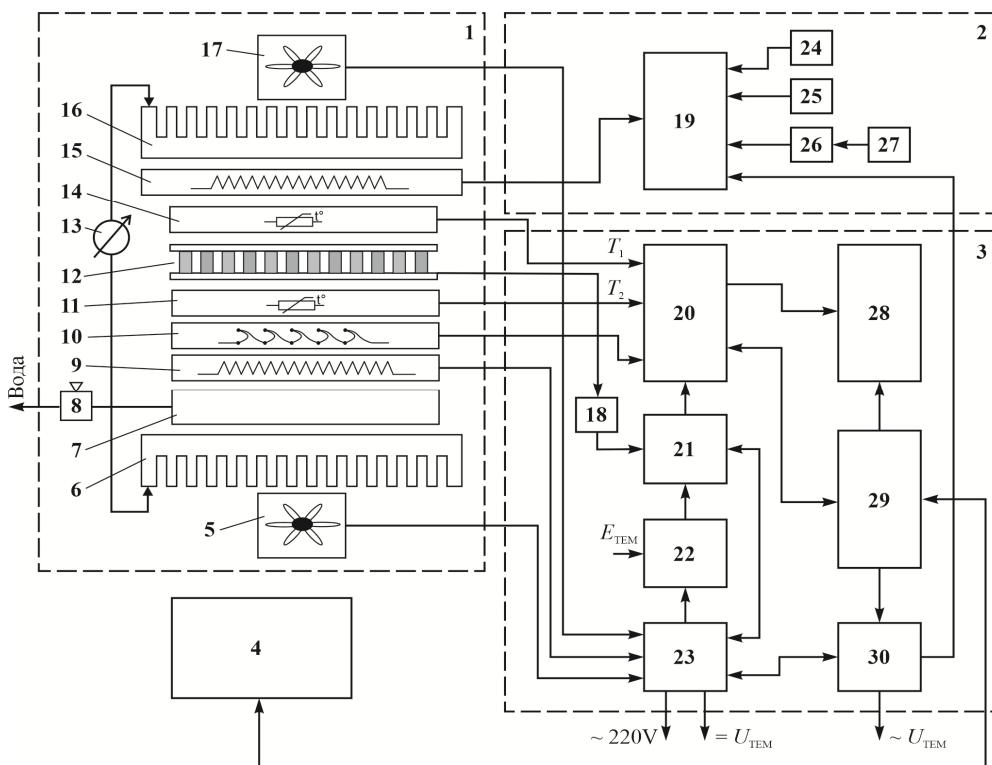


Рис. 5. Блок схема системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів абсолютним методом: 1 – держак термо-електричного модуля; 2 – силовий блок; 3 – блок керування; 4 – персональний комп'ютер; 5, 17 – вентилятори; 6, 16 – повітряні теплообмінники; 7 – водяний теплообмінник; 8 – кран; 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- канальний 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

Зовнішній вигляд розробленого обладнання наведено на рис. 6. Розроблене обладнання дозволяє проводити вимірювання параметрів термоелектричних модулів розмірами від 10×10 до 72×72 мм у діапазоні температур від -50 °С до 100 °С, а також визначати властивості термоелектричних матеріалів у складі цих модулів.



Рис. 6. Зовнішній вигляд обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження

Висновки

1. Розроблено конструкцію вимірювального обладнання, що дозволяє реалізувати вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження абсолютним методом, а також визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі цих модулів. Створене обладнання дозволяє проводити вимірювання параметрів модулів розмірами від 10×10 до 72×72 мм у діапазоні температур від -50 °С до 100 °С.
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. Булат Л.П., Ведерников М.В., Вялов А.П. и др. Термоэлектрическое охлаждение / Под ред. Л.П. Булата. – Спб.:СПбГУНиПТ, 2002. – 147 с.

2. 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.
3. L.I. Anatyshuk, M.V. Havrylyuk. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules // Journal of Electronic Materials. – Vol. 40. – No. 5. – pp 1292-1297.
4. 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.
5. 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: 16.08.2021

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

Гаврилюк Н.В.¹

Лисько 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

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Представлены результаты разработки конструкции оборудования для измерения параметров термоэлектрических модулей охлаждения, а также определения термоэлектрических свойств материалов в составе этих модулей. Оборудование создано на основе абсолютного метода, позволяющего определять параметры модулей в реальных условиях их эксплуатации и позволяет инструментально минимизировать основные источники погрешностей измерений. Блок управления измерениями построен на основе многоканального аналогово-цифрового преобразователя. Обработка и отображение результатов измерений производятся с помощью компьютера, результаты отображаются посредством графиков и таблиц. Библ. 5, рис. 6

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, охлаждение, 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: anatych@gmail.com;

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

EQUIPMENT FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THERMOELECTRIC COOLING MODULES

The results of the development of the design of equipment for measuring the parameters of thermoelectric cooling modules, as well as determining the thermoelectric properties of materials in these modules, are presented. The equipment was created on the basis of the absolute method, which makes it possible to determine the parameters of modules in real conditions of their operation and allows instrumental minimization of the main sources of measurement errors. The measurement control unit is built on the basis of a multichannel analog-to-digital converter. Processing and display of measurement results are carried out using a computer; the results are displayed through graphs and tables. Bibl. 5, Fig. 6.

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

References

1. Bulat L.P., Vedernikov M.V., Vialov A.P., et al. (2002). *Termoelektricheskoiie okhlazhdeniie [Thermoelectric cooling]*. L.P. Bulat (Ed.) St.Petersburg: St.Petersburg Institute of Management and Food Technologies [in Russian].
2. Kolodner P. (2014). High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules. *Review of Scientific Instruments*, 85(5), 054901/1-054901/11.
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. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 43 (10), 3863-3869, 2014.
5. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *J. Thermoelectricity*, 3, 49-54.

Submitted: 16.08.2021