

УДК 53.082

Гаврилюк М.В., Руснак О.С.



Гаврилюк М.В..

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна
email: anatykh@gmail.com



Руснак О.С.

**СТЕНД ДЛЯ ГРАДУЮВАННЯ ТЕПЛОМІРІВ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ГЕНЕРАТОРНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

Представлено результати розробки стенду для градуювання тепломірів для визначення теплового потоку через генераторний термоелектричний модуль при вимірюваннях його параметрів абсолютним методом. Стенд дає можливість досліджувати метрологічні характеристики тепломірів у необхідному інтервалі температур та у реальному часі передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: термоелектричний модуль, тепломір, градуювання, точність.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Підвищення якості та зниження собівартості термоелектричних генераторних модулів вимагає застосування при їх розробці та виготовленні передових технологій та високоефективних матеріалів. При цьому підвищення точності при визначенні теплових та електричних параметрів модулів дає можливість більш прогнозовано корегувати технологію виробництва модулів, а також оптимально підходити до безпосереднього створення кінцевих пристроїв, основою яких є ці генераторні модулі. Точність визначення параметрів модулів має бути такою, щоб надійно фіксувати вплив нових технологій та конструкцій на якість модулів. Не менш важливим є метрологічне забезпечення при створенні термоелектричних генераторів. Тотожність і надійність вимірювань параметрів модулів у постачальників і споживачів модулів, що використовують їх у термоелектричних виробках, дозволяє виключити проблеми, що виникають при цьому.

Найбільш надійним і точним серед існуючих методів визначення параметрів термоелектричних генераторних модулів є абсолютний метод [1 – 3], який дозволяє проводити вимірювання параметрів модулів у реальних умовах їх експлуатації та дає 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, 6]. Ця інформація є корисною як для оптимізації термоелектричного матеріалу для конкретних його застосувань, так і для вдосконалення конструкції модулів. При застосуванні абсолютного методу

одним з основних джерел похибок є неточність визначення теплового потоку, що проходить через модуль, пов'язана з наявністю теплових втрат шляхом конвекції та випромінювання з поверхні еталонного нагрівника та модуля, а також теплових втрат по провідниках та елементах конструкції вимірювального обладнання. Ефективним методом зменшення цих похибок є використання тепломірів для визначення теплового потоку, що відводиться від холодної сторони модуля до термостату [3]. Очевидно, що при цьому точність градування тепломіра відіграватиме вирішальну роль.

Мета цієї роботи – створення стенду для градування тепломірів для високоточного визначення теплового потоку через досліджуваний генераторний термоелектричний модуль при вимірюванні його параметрів абсолютним методом.

Опис абсолютного методу вимірювань параметрів термоелектричних генераторних модулів

Для вимірювання параметрів генераторних термоелектричних модулів абсолютним методом використовується вимірювальна комірка, яка включає в себе гарячий і холодний теплообмінники, між якими розміщується досліджуваний модуль. В якості гарячого теплообмінника зазвичай використовують електричний нагрівальний резистивний елемент. Холодний теплообмінник може бути з рідинним або з повітряним охолодженням. Теплообмінники мають вмонтовані датчі температури, які, для зменшення похибок вимірювання, розміщені в теплоізолюючих пластинах. Між собою теплообмінники і модуль притискаються з заданим зусиллям. Теплова модель такої вимірювальної комірки наведена на рис. 1

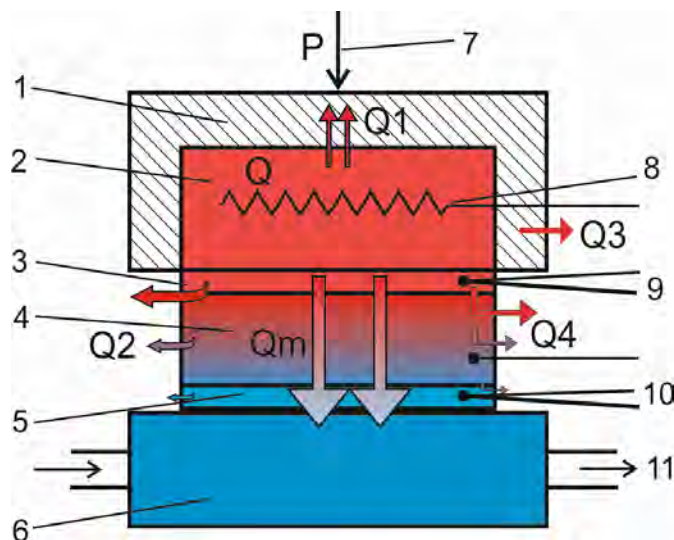


Рис. 1. Теплова модель вимірювальної комірки для визначення параметрів генераторних термоелектричних модулів абсолютним методом: 1 – гарячий теплообмінник; 2 – еталонний нагрівник; 3 – «гаряча» теплоізолююча пластина; 4 – генераторний термоелектричний модуль; 5 – «холодна» теплоізолююча пластина; 6 – холодний рідинний теплообмінник; 7 – вузол притиску; 8 – електричні виводи еталонного нагрівника; 9 – термопара «гарячого» теплообмінника; 10 – термопара «холодного» теплообмінника; 11 – теплоносій (рідина)

На рис. 1 стрілками показано шляхи проходження тепла, яка виділяється в еталонному нагрівнику. Воно проходить через модуль і розсіюється теплоносієм в холодному теплообміннику. Схематично величина стрілок пропорційна величинам теплових потоків.

В ідеальних умовах вся теплова потужність еталонного нагрівника повинна перейти через модуль. Але в реальних умовах, частина теплової потужності розсіюється в навколишнє середовище. Так, на рис. 1: Q – тепло, що виділяється еталонним нагрівником; Q_1 – втрати тепла по елементах конструкції корпусу гарячого теплообмінника; Q_2 – втрати тепла з поверхні модуля та тепловирівнюючих пластин шляхом конвекції та випромінювання; Q_3 – втрати тепла по електричних виводах живлення нагрівника; Q_4 – втрати тепла по електричних виводах модуля та датчиків температури; Q_m – корисна теплова потужність, яка пройшла через модуль і створила на ньому робочий перепад температур.

Очевидно, що

$$Q_m = Q - Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4.$$

Величини теплових втрат залежать від багатьох факторів і зазвичай їх важко врахувати, тому необхідно використовувати спеціальні методи для точного визначення теплових потоків.

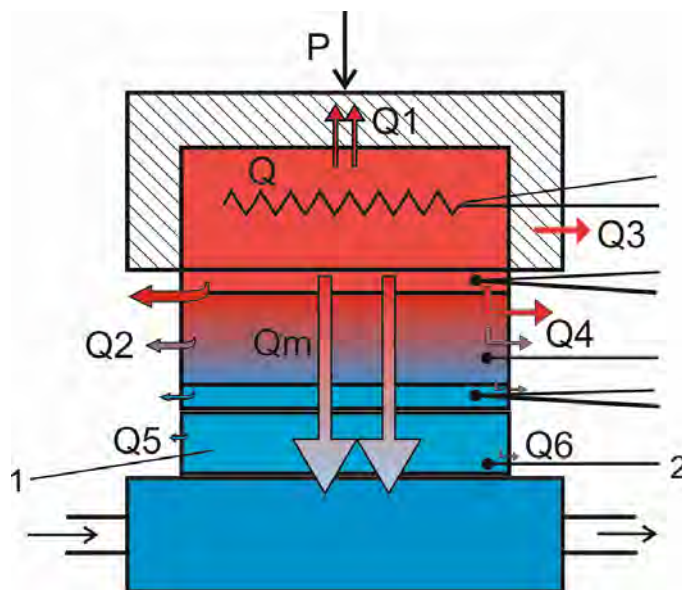


Рис. 2. Схема вимірювальної комірки з тепломіром:

1 – тепломір; 2 – потенціальні виводи тепломіра

Використання тепломірів значно спрощує процес вимірювань та підвищує точність визначення параметрів генераторних модулів. Реальна теплова модель вимірювальної комірки з тепломіром наведена на рис. 2. Так як тепломір послідовно додається у теплове коло вимірювальної комірки, то на ньому теж створюється перепад температур і при цьому з бокової поверхні тепломіра і по електричним виводам теж буде втрачатись тепло (Q_5 і Q_6), однак величини

цих теплових втрат будуть не великими, оскільки температура тепломіра є близькою до температури оточуючого середовища.

Опис стенду для градування тепломірів

При використанні у обладнанні для визначення параметрів генераторних модулів під кожний з типорозмірів модулів, які можуть вимірюватись на цьому обладнанні, виготовляється окремий тепломір. Зовнішній вигляд тепломірів різних типорозмірів наведено на рис. 3.

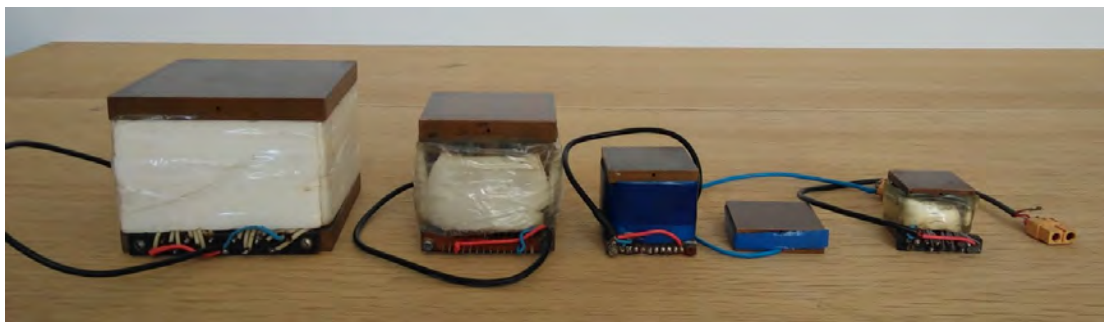


Рис. 3 – Тепломірів різних типорозмірів для обладнання для визначення параметрів термоелектричних генераторних модулів абсолютним методом

Тепломір складається з монолітного тіла з матеріалу з високою теплопровідністю, в якому на боковій поверхні розміщена термобатарея (рис. 4). Торцеві поверхні тіла тепломіра – це його робочі поверхні, вони паралельні між собою і виконані з високою чистотою обробки поверхонь – для якісного теплового контакту з модулем та холодним теплообмінником. Спаї термопар термобатареї розміщені на боковій поверхні в два ряди по висоті, причому кожний ряд знаходиться на своїй спільній площині, паралельній основі. Спаї розміщені на спеціальних штирьках, які мають добрий тепловий контакт з тілом тепломіра, але електрично від нього ізолювані.

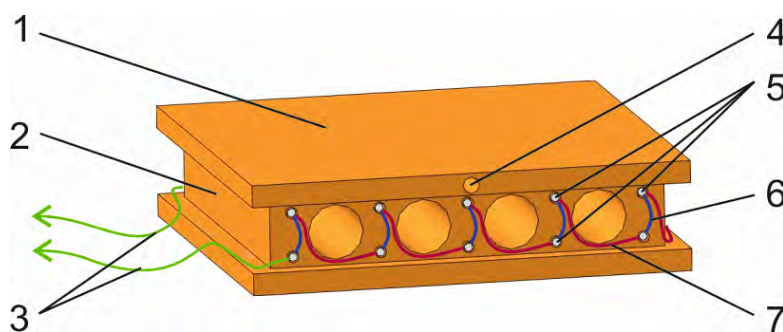


Рис. 4. Конструкція тепломіра: 1 – робоча площадка тепломіра; 2 – тіло тепломіра; 3 – електричні виводи тепломіра; 4 – отвір для вимірювальної термопари; 5 – спаї диференціальних термопар; 6 – n-вітки термопар; 7 – p-вітки термопар

Загальні вимоги до тепломірів: розміри робочої площадки тепломіра повинні бути близькими до розмірів робочих поверхонь генераторного модуля; висота тепломіра має бути оптимальною для створення мінімального перепаду температур на тепломірі, але достатньою для забезпечення його високої чутливості. Коефіцієнт перетворення тепломіра, його вольт-ватна чутливість, повинен бути стабільним в робочому діапазоні температур.

Для оптимізації тепломіра вздовж проходження теплового потоку в його тілі можуть бути зроблені технологічні виборки (наприклад, на рис. 4 видно, що в тілі тепломіра зроблені отвори).

Тепловий потік який проходить по тепломіру створює між робочими поверхнями невеликий перепад температури. Диференціальні термопари об'єднані в термобатарею – для підвищення чутливості тепломіру, яка залежить від матеріалу термопар, теплопровідності матеріалу тіла тепломіру та його конструкції, відстані між спаями, а також точності у визначенні відстані та якості теплового контакту між спаєм термопари та тілом. Очевидно, що такі похибки важко врахувати, тому тепломіри потрібно калібрувати.

Калібрування тепломіра проводиться методом прямого вимірювання сигналу термобатареї від дії перепаду температур, викликаного тепловим потоком, створюваним електричним нагрівачем. Одночасно визначається електрична потужність цього нагрівача. Вольт-ватна чутливість тепломіра буде визначатися відношенням:

$$k = \frac{E}{Q} \quad \text{так як} \quad Q = W = I_h \cdot U_h, \quad \text{то} \quad k = \frac{E}{I_h \cdot U_h}$$

де k - вольт-ватна чутливість тепломіра, E - сигнал тепломіра; Q - тепловий потік; пройшов через тепломір, W - електрична потужність основного нагрівача; I_h - струм основного нагрівача, U_h - напруга на основному нагрівачі.

Тепловий потік направляється тільки через тепломір, а втрати тепла з нагрівача в навколишнє середовище усуваються за допомогою захисних та радіаційних екранів.

Зовнішній вигляд розробленого стенду наведено на рис. 5.

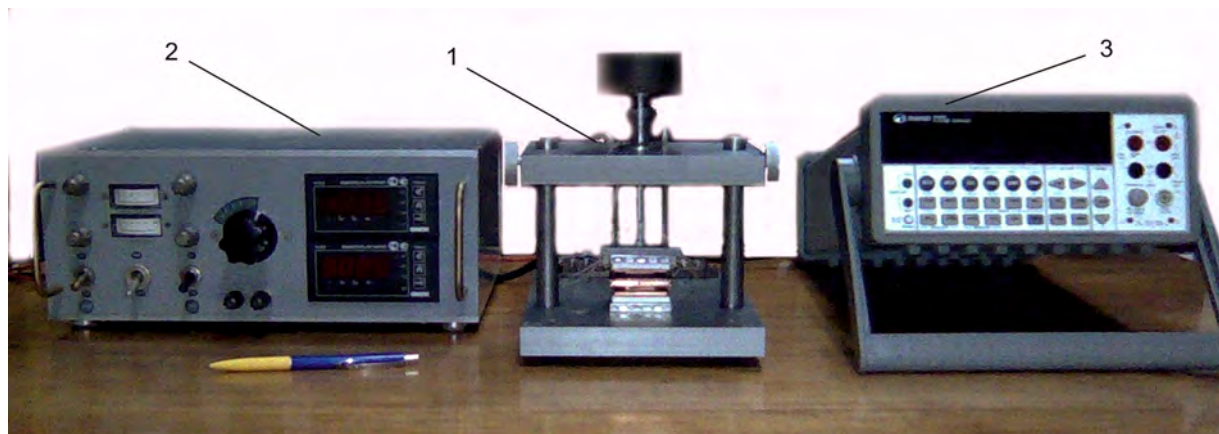


Рис. 5 – Зовнішній вигляд стенду для градування тепломірів: 1 – вимірювальний блок;
2 – блок керування; 3 – високоточний цифровий мультиметр

Стенд складається з вимірювального блоку, блоку керування та вимірювального приладу (високоточного цифрового мультиметра). У свою чергу, вимірювальний блок містить алюмінієву платформу, на якій розміщено рідинні теплообмінники, пристрій притиску і комутаційну колодку. Між гарячим і холодними теплообмінниками розміщується досліджуваний тепломір. Схема стенду наведена на рис. 6.

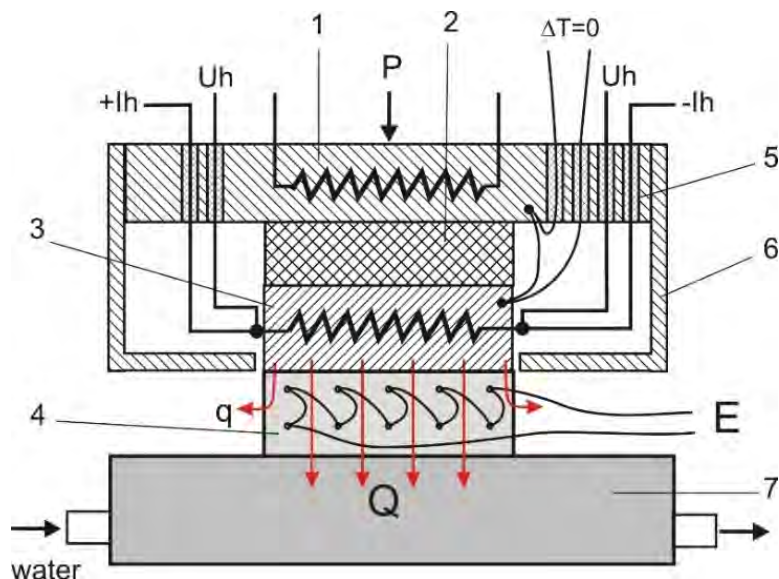


Рис. 6 – Схема калібрування тепломіра:

1 – захисний нагрівач; 2 – термоізоляція;

3 – основний нагрівач; 4 – тепломір; 5 – теплові замки;

6 – захисний екран; 7 – блок відведення тепла

На нижній основі алюмінієвої платформи та на підвісці верхньої основи вимірювального блоку закріплені два ідентичні теплообмінні вузли, які призначені для відводу тепла – холодні теплообмінники. Ці теплообмінники реверсні, оскільки створені на основі термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) з рідинним відведенням відпрацьованого тепла і можуть працювати як у режимі охолодження, так і у режимі нагріву в залежності від напрямку пропускання електричного струму. На робочій стороні ТЕО закріплені мідні тепловирівнюючі пластини з вмонтованими датчиками температури – платиновими термометрами опору. Ці пластини в центральній своїй частині мають відшліфовану з високим класом чистоти площинну поверхню – робочу площадку. На цій площадці розміщують досліджуваний тепломір. Інша сторона тепломіра контактує з гарячим теплообмінником – плоским нагрівником, що має дві (верхню і нижню) відшліфовані робочі поверхні. Плоский нагрівник виготовлений досить тонким, щоб його бічна поверхня була якомога меншою і він добре прогрівався по всьому своєму об'єму. В корпусі цього нагрівника вмонтовано також датчик температури – платиновий термометр опору. Використання платинових датчиків температури дає можливість вимірювати та підтримувати

температури робочих площадок теплообмінників за допомогою терморегуляторів з точністю, не меншою 0.1 °С. Під час калібрування нагрівач живиться від окремого стабілізованого джерела постійного струму. Вимірювання напруги на нагрівачі проводиться прецизійними вольтметрами з похибкою лише на рівні 0.05%. Струм через нагрівач також визначається падінням напруги на еталонному опорі, що знаходиться в колі живлення нагрівача. Похибка у визначенні струму становить близько 0.1%. Крім того, по електричних провідниках будуть мати місце втрати тепла в навколишнє середовище. Тому повинні вживатись заходи щодо мінімізації цих втрат, зокрема, використання теплових замків. Теплові замки – це ізолятори, виготовлені з берилієвої кераміки з високою теплопровідністю, що забезпечують локальне нагрівання ділянки провідника у місці його виходу із захисного корпусу нагрівача до температури нагрівача. Таким чином, втрати тепла по підвідних провідниках максимально усуваються. Аналогічно змонтовані вимірювальні термопари.

Оскільки на тепломірі створюється перепад температури по його висоті, матеріал тіла тепломіра (зазвичай метал – мідь, алюміній, латунь тощо) має температурну залежність коефіцієнта теплопровідності, а матеріал термопар – температурну залежність коефіцієнту термоЕРС, то тепломір повинен калібруватись у всьому діапазоні робочих холодних температур досліджуваного термоелектричного модуля.

У розробленому стенді процесом термостатування всіх теплообмінників керує спеціально створений електронний блок, що містить регульовані блоки живлення для ТЕО та нагрівників, два двоканальні мікропроцесорні терморегулятори РЕ-202, комутаційні елементи та контрольні клема вимірювань. Усі виводи електричних компонентів з вимірювального блоку сходяться на клемній колодці і за допомогою кабелю підключаються до блоку керування. До блоку керування підключений також вимірювальний прилад – високоточний цифровий мультиметр М3500 з можливістю передачі результатів вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі. Таким чином, розроблений стенд дає можливість проводити градування тепломірів та досліджувати в динаміці їх метрологічні характеристики.

Приклад залежності вольт-ватної чутливості тепломіра розмірами 40x40 мм від температури наведено на рис. 6.

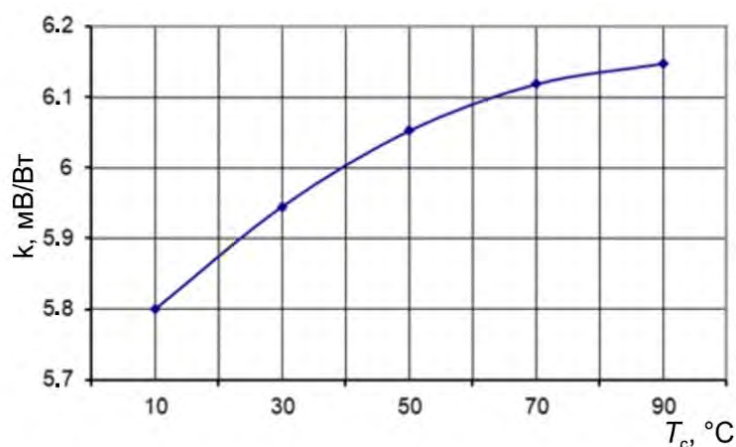


Рис. 6. Температурна залежність вольт-ватної чутливості тепломіра розмірами 40 × 40 мм

Висновки

1. Розроблено та виготовлено стенд для градування тепломірів для визначення теплового потоку через генераторний термоелектричний модуль при вимірюваннях його параметрів абсолютним методом. Стенд дає можливість досліджувати метрологічні характеристики тепломірів та передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі.
2. Реалізовано вдосконалений метод градування тепломірів з використанням допоміжного високочутливого перетворювача теплового потоку, що дає можливість підвищити точність експериментального визначення вольт-ватної чутливості тепломірів.

Література

1. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Симонов В.А. Методы измерения характеристики термоэлектрических материалов и преобразователей, М.: Наука, 167с., 1974.
2. 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.
3. 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. Technolog. 16, 2005, 1054-1060.
4. 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.
5. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів // Термоелектрика. – 2020, №3. – С. 70-80.
6. 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.

Надійшли до редакції: 07.07.2021

Гаврылюк Н.В., Руснак О.С.

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

СТЕНД ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ТЕПЛОМЕРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Представлены результаты разработки стенда для градуировки тепломеров для определения теплового потока через генераторный термоэлектрический модуль при измерениях его параметров абсолютным методом. Стенд позволяет исследовать метрологические характеристики тепломеров в необходимом интервале температур и в реальном времени передавать результаты измерений на персональный компьютер. Библ. 6, рис. 6.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, тепломер, градуировка, точность.

Havryliuk M.V., Rusnak O.S.

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatyach@gmail.com

A BENCH FOR CALIBRATING HEAT METERS FOR DETERMINATION OF PARAMETERS OF GENERATOR THERMOELECTRIC MODULES

The results of the development of a bench for calibrating heat meters to determine the heat flux through the generator thermoelectric module when measuring its parameters by the absolute method are presented. The bench allows one to study the metrological characteristics of heat meters in the required temperature range and transfer the measurement results to a personal computer in real time. Bibl. 6, Fig. 6.

Key words: thermoelectric module, heat meter, calibration, accuracy.

References

1. Okhotin A.S., Pushkarsky A.S., Borovikova R.P., Simonov V.A. (1974). *Metody izmereniia kharakteristik termoelectricheskikh materialov preobrazovatelei [Methods for measuring characteristics of thermoelectric materials of converters]*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. 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).

3. 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. Technol.* 16, 1054-1060.
4. Anatychuk L.I., Havrylyuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *J.Electronic Materials*, 40(5), 1292-1297.
5. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2021) Determination of the thermoelectric parameters of materials forming part of generator thermoelectric modules. *J.Thermoelectricity*, 1
6. Anatychuk L.I.I., Lysko V.V. (2021) Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *J.Thermoelectricity*, 2, 53-57.

Submitted: 07.07.2021