

УДК 53.082

Гаврилук М.В.¹,
Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2},
Руснак О.С.¹

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

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatysh@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ У СКЛАДІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Наведено конструкцію обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних генераторних та холодильних модулів, а також опис методики 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. Представлено результати експериментальних досліджень параметрів термоелектричних модулів, проведених за допомогою розробленого обладнання.

Ключові слова: термоелектричний модуль, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, термоелектричний матеріал, вимірювання.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Контроль якості термоелектричних перетворювачів модулів відіграє важливу роль при їх розробці, а також 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], який дозволяє визначати параметри модулів у реальних умовах їх експлуатації, дає можливість інструментально мінімізувати основні джерела похибок вимірювань, а також отримати інформацію про властивості матеріалу у складі модуля – термоЕРС, електропровідності та теплопровідності пари термоелектричних віток [3 – 5].

В Інституті термоелектрики НАН та МОН України розроблено універсальну електронну систему керування та автоматизоване вимірювальне обладнання на її основі, що дозволяє проводити вимірювання параметрів термоелектричних модулів та термоелектричні властивості матеріалів у їх складі для широкого діапазону робочих температур: від – 50 до 100 °С – для модулів охолодження та від 30 до 600 °С – для генераторних модулів [6 – 8].

Мета цієї роботи – проведення експериментальних досліджень розробленого обладнання та підтвердження його очікуваних можливостей.

1. Опис методики та обладнання для визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі термоелектричних перетворювачів енергії

Зовнішній вигляд розробленого обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних модулів та визначення термоелектричних властивостей матеріалів у їх складі наведено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних модулів

Схеми абсолютного методу, взятого за основу при створенні цього обладнання для визначення параметрів генераторних та холодильних термоелектричних модулів, наведені на рис. 2 та рис. 3. відповідно.

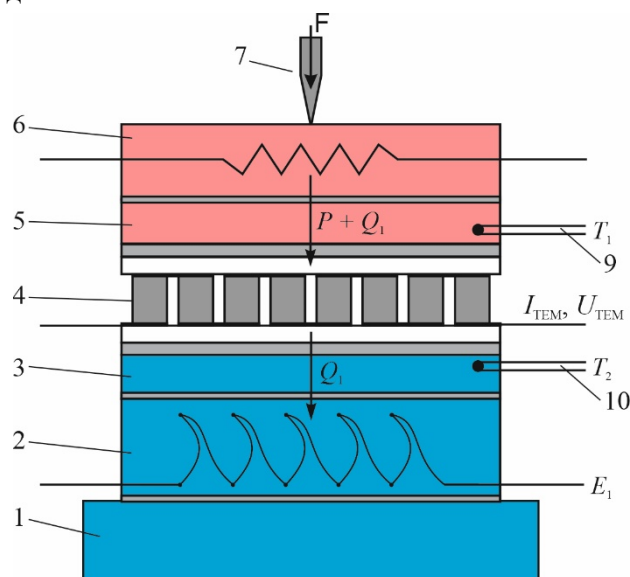


Рис. 2. Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів:

1 – термостат; 2 – термомір, 3, 5 – теплопровідні пластини; 4 – досліджуваний модуль;
6 – нагрівник; 8 – притиск; 10, 11 – термопари.

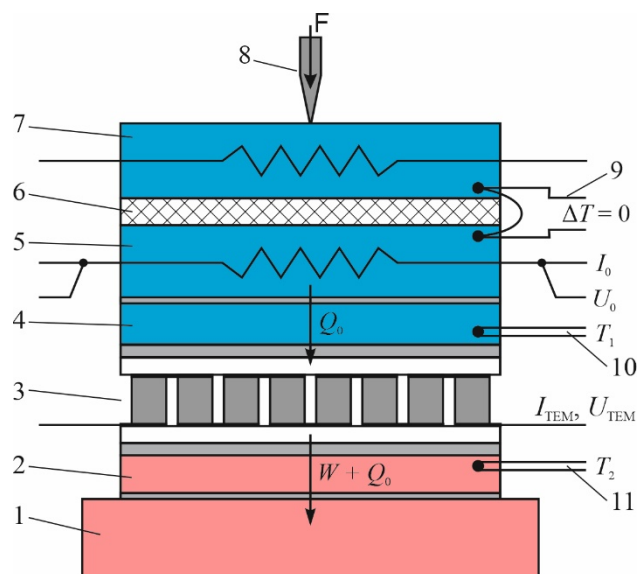


Рис. 3. Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження:
1 – термостат; 2, 4 – тепловирівнюючі пластини; 3 – досліджуваний модуль; 5 – еталонний нагрівник;
6 – теплоізоляція; 7 – захисний нагрівник; 8 – притиск; 9 – нуль-термопара; 10, 11 – термопари.

Для визначення параметрів генераторного термоелектричного модуля, останній розміщується між двома тепловирівнюючими пластинами, які у свою чергу розташовані між електричним нагрівником та тепломіром (рис. 2). Тепломір другою стороною контактує з термостатом. За допомогою електричного нагрівника на модулі створюється заданий перепад температур та вимірюється ЕРС $E_{\text{ТЕМ}}$, що виникає на виводах модуля. Після цього до виводів модуля підключається узгоджене електричне навантаження, при якому напруга на виводах модуля стане рівною половині ЕРС. Вимірюються величини електричного струму $I_{\text{ТЕМ}}$, що проходить через модуль, напруги на його виводах $U_{\text{ТЕМ}}$ 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

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

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

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.

При визначенні параметрів модулів охолодження додатково використовується захисний нагрівник, що запобігає втратам тепла з нагрівника через притискний механізм (рис. 3). 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 [3, 5]

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 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. Результати експериментальних досліджень

На рис. 4, 5 наведено приклад результатів вимірювання параметрів термоелектричного модуля типу Altec-22 на розробленому обладнанні, а саме – залежності холодопродуктивності (рис. 4) та холодильного коефіцієнту (рис. 5) від потужності живлення та перепаду температур при $T_c = 20^\circ\text{C}$.

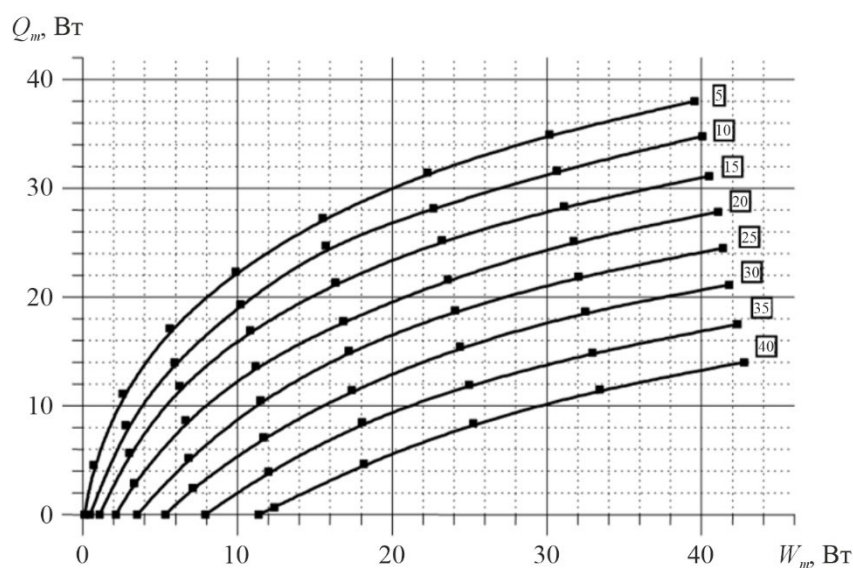


Рис. 4. Залежність холодопродуктивності Q_m термоелектричного модуля типу Altec-22 від потужності живлення модуля W_m та перепаду температур на ньому при $T_c = 20^\circ\text{C}$.

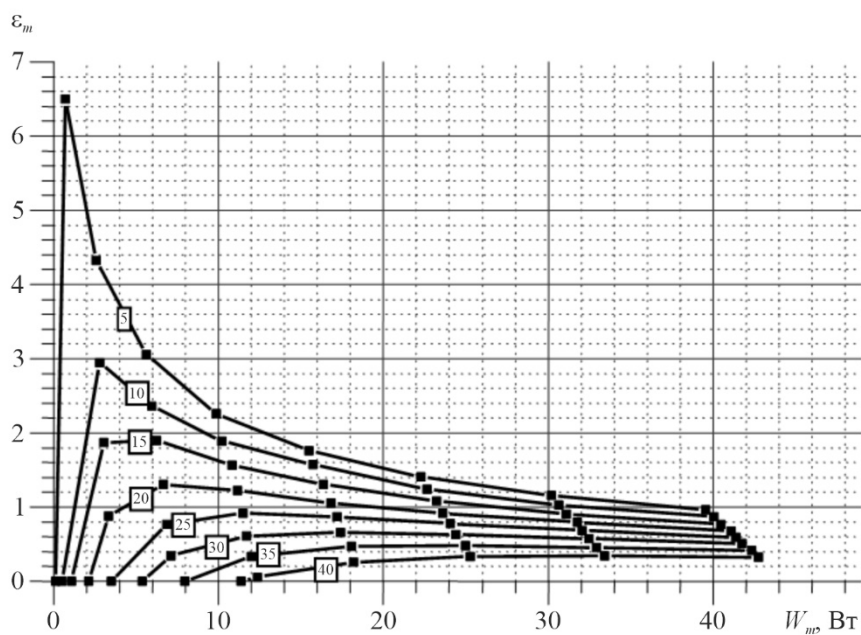


Рис. 5. Залежність холодильного коефіцієнту ε_m термоелектричного модуля типу Altec-22 від потужності живлення модуля W_m та перепаду температур на ньому при $T_z = 20^\circ\text{C}$.

На рис. 6, 7 наведено приклад результатів вимірювання параметрів термоелектричного модуля типу Altec-1061 на розробленому обладнанні, а саме – залежності ККД та максимальної корисної електричної потужності модуля від температур гарячої T_z та холодної T_x сторін модуля.

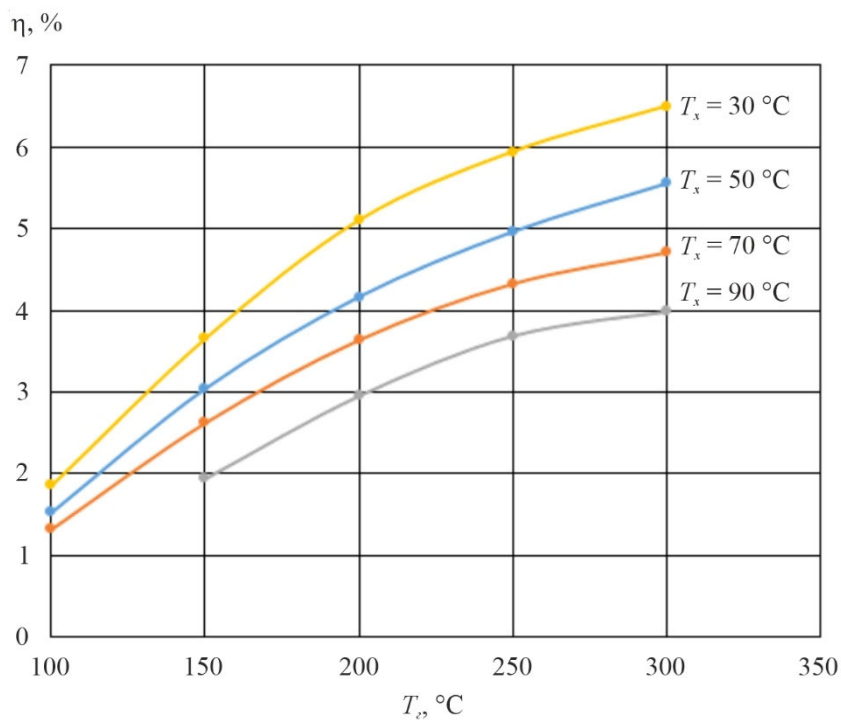


Рис. 6. Залежність ККД η термоелектричного модуля типу Altec-1061 від температур гарячої T_z та холодної T_x сторін модуля.

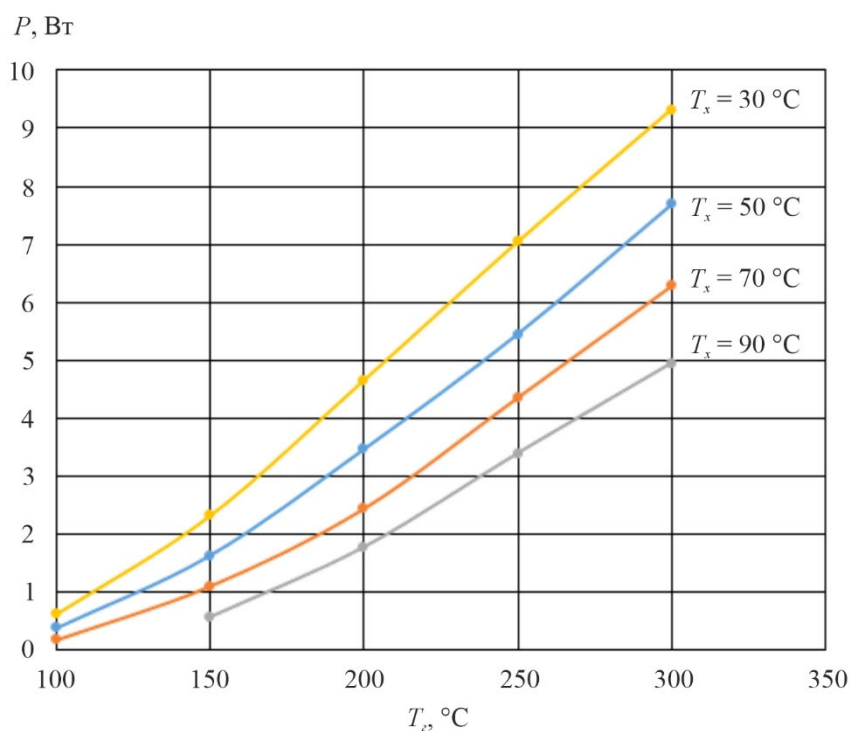


Рис. 7. Залежність максимальної корисної електричної потужності P термоелектричного модуля типу Altec-1061 від температур гарячої T_h та холодної T_c сторін модуля.

За методикою, детально описаною у п. 1, було визначено термоелектричні властивості матеріалів у складі модуля охолодження типу Altec-22 та генераторного модуля типу Altec-1061. Результати досліджень наведено у табл. 1 та табл. 2 відповідно.

Таблиця 1

Результати визначення властивостей термоелектричних матеріалів
у складі модуля охолодження типу Altec-22

$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{сер}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$	$\alpha, \text{мкВ}/^\circ\text{C}$	$\kappa, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$Z\cdot 10^3, 1/^\circ\text{C}$
100	90	95	661	222.0	1.62	2.02
80	70	75	687	222.5	1.59	2.14
60	50	55	780	220.4	1.54	2.45
40	30	35	854	216.0	1.55	2.57
20	10	15	937	209.3	1.58	2.60
0	-10	-5	1028	200.3	1.64	2.52
-20	-30	-25	1078	194.9	1.68	2.44

Таблиця 2

Результати визначення властивостей термоелектричних матеріалів
у складі генераторного модуля типу Altec-1061

$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$	$\alpha, \text{мк}^\circ\text{C}$	$\kappa, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$Z\cdot 10^3, 1/^\circ\text{C}$
40	30	35	1674	141.0	1.99	1.67
80	30	55	1550	147.3	1.92	1.75
120	30	75	1435	152.7	1.89	1.77
160	30	95	1328	157.2	1.89	1.74
200	30	115	1231	160.7	1.93	1.64
240	30	135	1142	163.3	2.01	1.51
280	30	155	1062	165.0	2.13	1.36
320	30	175	991	165.8	2.28	1.19

Похибки використаної методики (з врахуванням поправок) складають: при визначенні електропровідності – 2 – 3 %, термоЕРС – 3 – 5 %, теплопровідності – 5 – 7 %.

Співставлення отриманих результатів з властивостями вихідних матеріалів, що використовувались для виготовлення цих модулів, визначеними на високоточному обладнанні «АЛТЕК-10001» дозволяє отримати інформацію про такі важливі параметри модуля як вплив контактного та комутаційного на його ефективність. Ця інформація є надзвичайно важливою для проектування модулів та вдосконалення конструкції їх виготовлення.

Висновки

1. Описано конструкцію автоматизованого обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних генераторних та холодильних модулів, а також методику визначення термоелектричних властивостей матеріалів у складі цих модулів. Обладнання створено на основі абсолютного методу, що дозволяє проводити вимірювання параметрів термоелектричних модулів та термоелектричні властивості матеріалів у їх складі для широкого діапазону робочих температур: від – 50 до 100 °C – для модулів охолодження та від 30 до 600 °C – для генераторних модулів.
2. За допомогою розробленого обладнання проведено дослідження параметрів серійних термоелектричних модулів охолодження типу Altec-22 та генераторних модулів типу Altec-1061. Експериментально підтверджено можливість визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі цих модулів.

Література

1. Kolodner P. (2014). High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules. *Review of Scientific Instruments*, 85 (5), 054901/1-054901/11.
2. Anatyshuk L.I., Havrylyuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *J. Electronic Materials*, 40 (5), 1292 – 1297.
3. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження // Термоелектрика. – 2021, №1. – С. 49 – 54.
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., Гаврилюк М.В., Лисько В.В. Комп'ютеризація процесів вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних та холодильних термоелектричних модулів // Термоелектрика. – 2021, №2. – С. 62 – 66.
7. Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В. Автоматизація та комп'ютеризація процесів вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних та холодильних термоелектричних модулів // Термоелектрика. – 2021, №3. – С. 63 – 72.
8. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження // Термоелектрика. – 2021, №3. – С. 73 – 85.

Надійшла до редакції: 26.01.2022.

Havryliuk M.V. ¹

Lysko V.V., *Cand. Sc (Phys & Math)* ^{1,2}

Rusnak O.S. ¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatysh@gmail.com

EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS FORMING PART OF THERMOELECTRIC MODULES

The design of equipment for measuring the parameters of thermoelectric generator and cooling modules is presented, as well as a description of the method for determining the thermoelectric properties of materials used in these modules. 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 results of experimental studies of the parameters of thermoelectric modules carried out using the developed equipment are presented. Bibl. 8, Fig. 7, Table. 2.

Key words: thermoelectric module, electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, thermoelectric material, measurement.

References

1. Kolodner P. (2014). High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules. *Review of Scientific Instruments*, 85 (5), 054901/1-054901/11.
2. Anatychuk L.I., Havrylyuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *J. Electronic Materials*, 40 (5), 1292 – 1297.
3. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2021). Method for determination of thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *J. Thermoelectricity*, 1, 49 – 54.
4. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2020). Determination of thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric generator modules. *J. Thermoelectricity*, 3, 70 – 80.
5. Anatychuk L.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.
6. Anatychuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2021). Computerization of processes of measuring thermoelectric parameters of materials forming part of generator and cooling thermoelectric modules. *J. Thermoelectricity*, 2, 62 – 66.
7. Anatychuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2021). Automation and computerization of processes of measuring thermoelectric parameters of materials forming part of generator and cooling thermoelectric modules. *J. Thermoelectricity*, 3, 60 – 70.
8. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *J. Thermoelectricity*, 3, 71 – 82.

Submitted: 26.01.2022.