

УДК 621: 36.5

Ащеулов А.А. докт. техн. наук, професор¹,

Романюк І.С. канд. техн. наук²

Ащеулов А.А.

Романюк І.С.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,

вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

e-mail: anatysh@gmail.com;

²Завод «Кварц» ТДВ, вул. Головна, 246,

Чернівці, 58000, Україна

ПРИСТРІЙ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ АНІЗОТРОПНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Метод ґрунтується на визначенні втрат електричної потужності при протікання вихрових струмів Фуко у термоелектричному зразку, розміщеному в полі дії осердя котушки індуктивності, через яку послідовно протікають симетричний і асиметричний за характером електричні струми. Визначено вирази для коефіцієнтів електропровідності σ , термоЕРС α , теплопровідності κ та добротності Z . Запропонований метод дозволяє автоматизувати процеси контролю і розбракування термоелектричних злитків, заготовок і деталей. Бібл. 11, рис 2.

Ключові слова: вихровий струм Фуко, анізотропні термоелектричні матеріали, термоелектрична добротність, симетрична і асиметрична складові тензора електропровідності

Вступ

Основними параметрами термоелектричного матеріалу є коефіцієнти термоЕРС α , електропровідності σ і теплопровідності κ , а також його ефективність Z [1, 2]. На даний час розроблено достатню кількість методів їх визначення [3, 4], в тому числі і шляхом послідовного вимірювання електропровідності термоелектричного зразка в ізотермічних і адіабатичних умовах [5]. Однак наявність необхідних при таких вимірах електричних контактів з выводами на контрольованих зразках веде до певних незручностей і додаткових похибок.

В [6] показано перспективність вихрострумового методу для випадку безконтактного визначення електропровідності термоелектричних матеріалів при порівняно малій похибці, а пізніше було розроблено реальний пристрій для його реалізації [7].

У даній роботі наведено опис вихрострумового методу, що дозволяє визначати основні параметри анізотропних термоелектричних матеріалів, такі як добротність Z_{ii} , та електропровідності σ_{ii} , а також описано конструкцію пристрою для його реалізації.

Короткий опис методу

Фізичні ефекти взаємодії електромагнітного поля з досліджуваною речовиною, які лежать в основі реалізації вихрострумowego методу для вимірювання параметрів матеріалів, було розглянуто у працях [6-9]. Показано, що в разі розміщення контрольованого зразка в полі дії осердя котушки, через яку протікає змінний асиметричний струм, виникає магнітне поле з індукцією B , що складається із змінної синусоїдальної (B_1) і постійної (B_0) складових. Змінна складова індукує в зразку струм Фуко, кожен напівперіод якого характеризується наявністю власної магнітної індукції. Взаємодія цих складових веде до появи як радіальних, так і осьових складових сил Ампера. Акісальні складові викликають зміщення струмів Фуко протягом негативного і позитивного напівперіодів до верхньої і нижньої торцевих граней зразка відповідно, а радіальні складові призводять до зміни ефективного радіусу дії магнітного поля R_{ef} . Таке зонально-об'ємне розшарування індукованого струму веде до істотного об'ємного перерозподілу теплових потоків, викликаних ефектами як Джоуля q_{mJ} , так і Пельтьє q_{mP} . Запропонований метод реалізується шляхом визначення втрат електричної потужності у процесі протікання вихрових струмів Фуко в зразку.

Мінімізація інтегральної похибки цього методу проводилася шляхом комп'ютерного моделювання фізичних процесів, що відбуваються при вимірюванні, за допомогою пакета програм ComsolFemlab 3.3. В результаті цих досліджень встановлено, що для термоелектричних матеріалів на основі сполук $Cd-Sb$ [8] робоча частота вимірювального давача міститься в діапазоні 36 - 250 кГц, а струм, що протікає через нього повинен задовольняти умові $q_{mP}/q_{mJ} > 10$. Значення індукції магнітного поля та її складових вибирається з умови $B_0/B_1 > 8.6$, що також відповідає умовам мінімального впливу на параметри зразка внаслідок гальванотермомагнітних явищ [10].

У [8] було показано, що за наявності значень електричної добротності вимірювального контуру без зразка Q_1 і в разі протікання симетричного та асиметричного струмів через зразок (відповідно Q_2 та Q_3) можна визначити усереднені значення симетричної та асиметричної електропровідностей матеріалу σ^s та σ^a :

$$\sigma^{sa} = c \frac{Q_1 - Q_{2,3}}{Q_1 Q_{2,3} d \left(1 + 4 \ln \frac{R_0}{R_{ef}} \right)} \quad (1)$$

[3] термоелектрична добротність Z_{ef} представляється слідом вигляді:

$$Z_m = \frac{\sigma_c}{\sigma^a} \frac{1}{T} \quad (2)$$

де $c = \frac{\pi \omega \mu_0 (\mu'_n)^2 R_{ef} I_m}{8 \mu'_n S}$ d - ширина зазору;

R_0 – радіус кільцевого датчика;

T – температура;

ω – кругова частота вимірювального коливального контуру μ_0 , μ'_n – динамічні магнітні проникності зразка і феритового осердя контуру відповідно;

l_m – середня довжина магнітної силової лінії;

I_m – струм зміщення феритового датчика.

У разі анізотропного термоелектричного матеріалу, кристалографічні вісі якого збігаються з осями лабораторної системи координат [1, 2, 3], його тензор електропровідності має наступний вигляд:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (3)$$

Якщо ж кристалографічні осі 1, 2 кристала повернені навколо осі 3 відносно лабораторних осей 1 і 2 на деякий кут φ , то тензор електропровідності набуває вигляду

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi & (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \varphi \cos \varphi & 0 \\ (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \varphi \cos \varphi & \sigma_{11} \sin^2 \varphi + \sigma_{22} \cos^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (4)$$

і характеризується наявністю як поздовжньої $\sigma_{\parallel}$, так і поперечної $\sigma_{\perp}$ складової, де

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi \quad (5)$$

$$\sigma_{\perp} = (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \varphi \cos \varphi \quad (6)$$

Оптимізація цих величин за кутом φ показує, що їх максимум спостерігається для σ_{11} при $\varphi_1 = 45^\circ$, і $\varphi_2 = 135^\circ$, при цьому $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} = 0, \frac{\partial^2 \sigma}{\partial^2 \varphi} < 0\right)$

$$\sigma_{\parallel} = 0.5(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (7)$$

$$\sigma_{\perp} = 0.5(\sigma_{11} - \sigma_{22}). \quad (8)$$

Отже, безконтактне вимірювання величин $\sigma_{\parallel}$ і $\sigma_{\perp}$ при симетричному та асиметричному характерах електричних струмів вимірювального датчика, розміщеного відповідно під кутами $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 135^\circ$ дає можливість отримати наступні співвідношення:

$$\sigma_{11}^e = 0.5 (\sigma_{\parallel}^e + \sigma_{\perp}^e), \quad (9)$$

$$\sigma_{22}^e = 0.5 (\sigma_{\parallel}^e - \sigma_{\perp}^e), \quad (10)$$

$$\sigma_{11}^a = 0.5 (\sigma_1^a + \sigma_2^a), \quad (11)$$

$$\sigma_{22}^a = 0.5 (\sigma_1^a - \sigma_2^a). \quad (12)$$

Підставляючи (11-12) в формулу Харман [2], отримуємо вирази для термоелектричних добротностей Z_{11} та Z_{22} анізотропного термоелектричного матеріалу:

$$Z_{11} = \left(\frac{\sigma_{11}^c + \sigma_{22}^c}{\sigma_{11}^a + \sigma_{22}^a} \right) \cdot T^{-1} \quad (13)$$

$$Z_{22} = \left(\frac{\sigma_{11}^c - \sigma_{22}^c}{\sigma_{11}^a - \sigma_{22}^a} \right) \cdot T^{-1} \quad (14)$$

Таким чином, представлений метод дозволяє безконтактно визначити термоелектричні ефективності Z_{11} та Z_{22} у кристалографічних осях 1, 2 анізотропних термоелектричних матеріалів.

Необхідно зазначити, що вимірюваний зразок повинен бути відповідним чином кристалографічно орієнтованим щодо заданого напрямку вектора магнітної індукції $\vec{B}$, яка виникає в зазорі вихрострумowego датчика [10, 11]. Його необхідно розташовувати так, щоб вибрані кристалографічні осі накладалися в площині торцевої грані. Вимірювання термоелектричних неоднорідних матеріалів проводиться на площині з максимальною неоднорідністю. Вимірювання параметрів термоелектричних однорідних матеріалів проводиться на зразках, виконаних у вигляді двох геометрично однакових зразків, один з яких є еталонним з відомими параметрами, а другий - з контрольованого матеріалу.

Особливості конструкції пристрою для безконтактного визначення ефективності Z_{ii} анізотропних термоелектричних матеріалів

З метою реалізації запропонованого вихрострумowego безконтактного методу було проведено модернізацію пристрою, описаного в [1, 7]. Цей пристрій дозволяє безконтактно вимірювати усереднене значення не лише симетричної електропровідності σ^s , але і асиметричної σ^a , необхідні для подальшого визначення параметрів анізотропних термоелектричних матеріалів. З цією метою у вимірювальний давач пристрою накладного типу введено додаткову індуктивність. Сталий струм, який протікає через неї, створює в робочому зазорі давача стає підмагнічуюче поле, яке зумовлює необхідні фізичні процеси в об'ємі контрольованого зразка. Однак, в той же час, це поле впливає і на характеристики матеріалу феромагнітного осердя вимірювального давача, змінюючи його індуктивність та величину електромагнітного зв'язку з контрольованим зразком. Відповідно змінюється і резонансна (робоча) частота давача, а також його чутливість в порівнянні з цими ж параметрами за нульового струму підмагнічування. Ці зміни обумовлюють істотне

спотворення результатів вимірювання основних параметрів термоелектричних матеріалів.

Використання вимірювального давача, схему якого наведено на рис. 1, дозволило усунути залежність його індуктивності від струму підмагнічування.

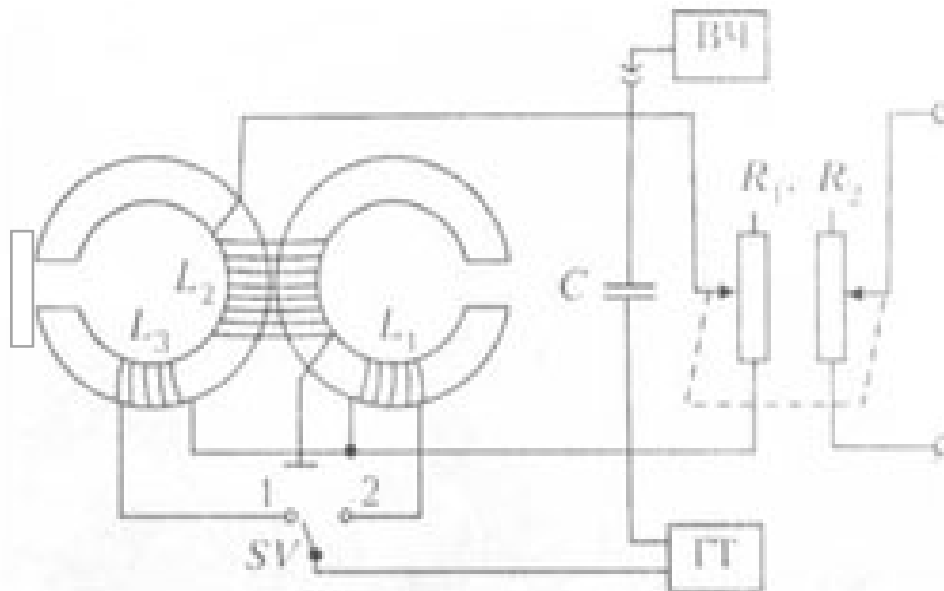


Рис. 1. Схема включення вимірювального давача з підмагнічуванням

Конструктивно цей давач складається з двох ідентичних феритових кілець з котушками подмагнічування L_3 та L_4 , електрично ввімкнених послідовно-зустрічно, а також робочої котушки L_1 , намотаної одночасно на обидва феритових кільця. Індуктивності L_3 і L_4 через перемикач SV під'єднано до генератора сталого струму $ГТ$, а індуктивність L_1 , спільно з конденсатором C утворює паралельний коливальний контур, підключений до генератора високочастотного струму $ВЧ$, робоча частота f_p якого дорівнює резонансній частоті f_0 LC-контур. Спарені змінні резистори R_1 і R_2 забезпечують контроль теплових втрат, що вносяться до LC-контур при розміщенні контрольованого зразка в робочому зазорі давача.

Якщо перемикач SV знаходиться в положенні 1, то вимірюється асиметрична електропровідність σ_a , а підмагнічуюче поле впливає на параметри і зразка, і феритового кільця з індуктивністю L_3 . Коли перемикач SV знаходиться в положенні 2, вимірюється симетрична електропровідність σ_s (підмагнічуюче поле в робочому зазорі відсутнє, в цьому випадку змінюються параметри феритового кільця з індуктивністю L_4 , через яку протікає відповідний струм підмагнічування). Оскільки феритові кільця з індуктивностями L_3 і L_4 ідентичні, а струми через них в обох випадках однакові, зміна параметрів феритових кілець за будь-якого положення перемикача SV не впливає на величину індуктивності L_1 , а відповідно, і на резонансну частоту LC-контур.

Повна блок-схему модернізованого пристрою наведено на рис. 2.

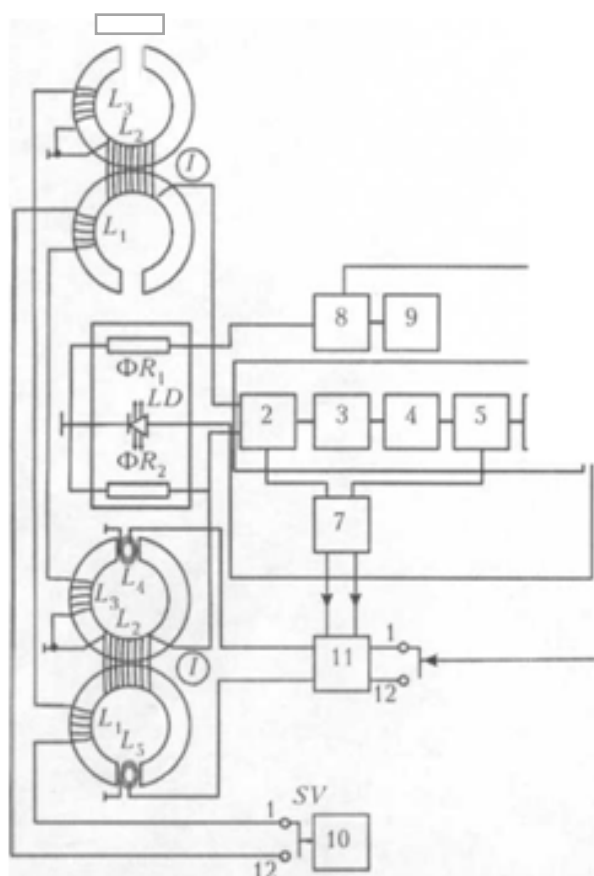


Рис. 2. Структурна схема пристрою для безконтактного вимірювання симетричною σ_s та асиметричною σ_a електропровідності термоелектричних матеріалів:

1, 12 - положення перемикача SV; 2 - електронний комутатор; 3 - автогенератор; 4 - підсилювач змінного струму; 5 - синхронний детектор; 6 - підсилювач постійного струму; 7 - генератор імпульсів; 8 - блок обробки сигналу; 9 - індикаторний пристрій; 10 - індикатор сталого струму; 11 - вузол корекції; ΦR_1 , ΦR_2 - фоторезистори

У зазорі другого давача з індуктивністю L_2 розміщені мікродавач змінного магнітного поля (у вигляді спеціальних мікроіндуктивностей L'_5 і L''_5). Пристрій містить перемикач SV і генератор постійного струму 10, аналогічний пристрою, представленого на рис. 1, а також вузол порівняння 11, аналогічний використаному в [6, 7]. Вихідний сигнал цього вузла пропорційний зміні чутливості індуктивного датчика при впливі струму підмагнічування, який далі за допомогою блоку 8 використовується для автоматичної корекції показань вихідного приладу. Блок 2 зібраний за схемою амплітудних детекторів, а блок 3 - за схемою суматора.

Реальну роботу створеного пристрою ілюструють наведені на рис.3 часові діаграми напруги на індуктивності Б датчиків, а також індукції магнітного поля в робочому зазорі датчика з індуктивністю Б, за наявності підмагнічування і за його відсутності, що відповідає положенням 1 і 12 перемикача SV, тобто режимам вимірювання асиметричній (σ_a) та симетричній (σ_s) електропровідності.

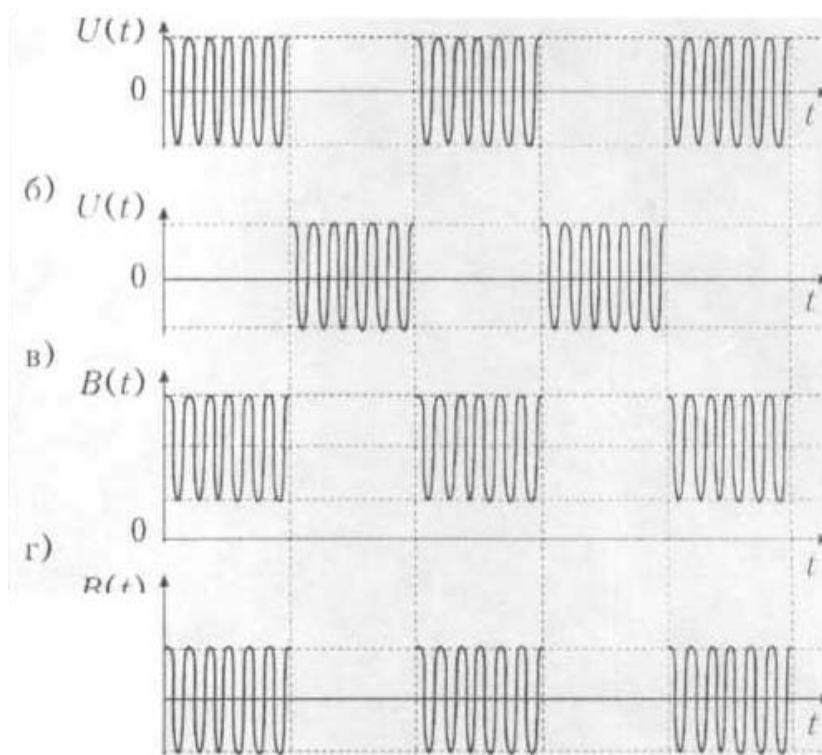


Рис. 3. Тимчасові діаграми напруг (а, б), а також індукції магнітного поля в робочому зазорі датчика (а, г) при відсутності підмагнічування (а, в) і при його наявності (б, г)

При вимірюванні σ_s вихідний сигнал блоку 11 через перемикач SV надходить на блок 8, що вимірює опір фоторезистора ФР1 і коригує його значення відповідно до зміни чутливості вимірювального датчика. Його застосування дозволить автоматизувати процеси контролю і розбракування анізотропних зливків, заготовок та деталей.

Висновки

Вимірювання параметрів зразків $CdSb$ засвідчили, що реальна похибка вимірювань становить 2%. Пропонований вихрострумний метод може успішно використовуватись для безконтактного вимірювання анізотропії добротності Z термоелектричних матеріалів. Його застосування дозволить автоматизувати процеси контролю та розбракування анізотропних зливків, заготовок та деталей.

Література

1. Іоффе А.Ф. Напівпровідникові термоелементи. - М. - Л. : Изд. АН СРСР, 1960.
2. Анатичук Л.І. «Термоелементи і термоелектричні пристрої». Справочник.-К. : Наукова думка, 1979. - 768 с.

3. Harman TC, Cahn JH, Logan MJ Measurement of thermal conductivity by utilization of Peltier effect // J. Appl. Phys.- 1959. - Vol. 30, N 9. - P. 1351 - 1359. - DOI: 10.1063 / 1.1735334.
4. Павлов Л.П. Методи вимірювання параметрів напівпровідникових матеріалів. Москва: Вища школа, 1987.
5. Вайнер А.Л. Термоелектричні параметри і їх вимірювання. - Одеса: Негоціант, 1998..
6. Сурін Ю.В., Шимко В.І., Матвеев В.В. Безконтактний метод вимірювання питомого опору пластин напівпровідників і епітаксійних шарів. / Заводська лабораторія. - 1966. - Т. 32. - №9. - С. 1086-1088.
7. Ащеулов А.А., Бучковський І.А., Романюк І.С. Установка для безконтактного вимірювання електропровідності напівпровідників // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. - 2007. - № 2. - С. 55-57.
8. Ащеулов А.А., Величук Д.Д., Романюк І.С., Черкез Р.Г. Модернізований безконтактний вимірювач параметрів термоелектричних мікромодулів Пельтье // Термоелектрика. - 2008. - №3. - С. 58 - 65.
9. Ащеулов А.А. Безконтактний метод визначення ефективності термоелектричних матеріалів / Технологія та конструювання в електронній апаратурі. - 2009.- №2. - С.43 - 45.
10. Самойлович А.Г. Термоелектричні і термомагнітні методи перетворення енергії. - Чернівці: Рута. - 2006.
11. Пат. 29213 України. Процес визначення добротності и термоелектричних матеріалів. Ащеулов А. А., Бучковський І.А., Величук Д.Д. - 2008. Бюл. №1.

Надійшла до редакції

Ащеулов А.А. докт. техн. наук, професор¹,
Романюк І.С. канд. техн. наук²

¹Институт 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

УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭКСПРЕСС- КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Метод основан на определении потерь электрической мощности при протекании вихревых токов Фуко термоэлектрического образца, размещенного в поле действия сердечника катушки индуктивности, через которой последовательно протекают симметричный и асимметричный по характеру электрические токи. Определены выражения для коэффициентов электропроводности σ , термо-ЭДС α , теплопроводности κ и эффективности Z . Предложенный метод позволяет автоматизировать процессы контроля и разбраковки термоэлектрических слитков, заготовок и деталей. Библ. 11, рис 2.

Ключевые слова: вихревой ток Фуко, анизотропные термоэлектрические материалы термоэлектрическая эффективность, симметричная и асимметричная составляющие тензора электропроводности

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

Prybyla A.V., cand. Phys.- math. Sciences^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,

2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

THERMOELECTRIC GENERATORS WITH VARIABLE POWER FLAME HEAT SOURCES, SINGLE-STAGE THERMOPILES AND ELECTRIC ENERGY BATTERIES

In this paper, calculations of the dynamic power of a thermoelectric generator with variable power flame heat sources are made. The results of calculations of such a generator made of thermoelectric material based on PbTe – TAGS are presented. Bibl. 5, Fig. 3.

Key words: thermoelectric generator, computer design, physical model.

References

1. Anatychuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, 84 – 95.
2. Vikhor L.M., Maksymuk M.V. (2017). Design of thermoelectric cascade modules for solid fuel TEG. *J. Thermoelectricity*, 4, 40– 48.

3. Anatychuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksymuk M.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power and temperature stabilizers for thermopiles. *J. Thermoelectricity*, 2.
4. Mykhailovsky V.Ya., Bilinskyi-Slotylo V.R. (2012). Thermoelectric cascade modules of materials based on Bi₂Te₃-PbTe-TAGS. *J. Thermoelectricity*, 4, 67-74.
5. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB, 804p.

Submitted 11.12.2018