

УДК 537

**Анатичук Л.І.**, *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
**Микитюк П.Д.**, *канд. фіз.-мат. наук*<sup>1,2</sup>  
**Микитюк О.Ю.**, *канд. фіз.-мат. наук, доцент*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
*e-mail: anatysh@gmail.com;*

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна;

<sup>3</sup>Вищий державний навчальний заклад України  
«Буковинський державний медичний університет»,  
Театральна площа, 2, Чернівці, 58012, Україна

## ПРОЕКТУВАННЯ КІЛЬЦЕВОЇ ТЕРМОБАТАРЕЇ ДЛЯ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ ОДНОРАЗОВОЇ ДІЇ

---

*Приведені результати досліджень по створенню кільцевої термоелектричної батареї для джерела струму з піротехнічним джерелом тепла. Методом комп'ютерного моделювання підтверджена можливість створення кільцевої термобатареї із заданими геометричними розмірами, що забезпечує вихідну потужність 2Вт при напрузі 5В. Бібл. 2, рис. 4, табл. 3.*

**Ключові слова:** термоелектрична батарея, джерело струму, номінальна напруга, вихідна потужність.

### Вступ

У зв'язку з істотним розширенням сфери застосування систем автономного керування на об'єктах військового призначення актуальним стає питання розробки джерел електричної енергії, призначених для живлення різних електронних пристроїв.

До таких джерел живлення пред'являються підвищені вимоги щодо їх швидкодії та питомих енергетичних характеристик. Окрім своїх малих габаритно-масових параметрів вони повинні відповідати вимогам щодо імовірності безвідмовної роботи після тривалого(не менше 10 років) зберігання як в складських приміщеннях, так і в польових умовах. Окрім того, вони повинні зберігати свою працездатність в умовах підвищених кліматичних і механічних навантажень.

Сукупність цих вимог орієнтує розробників на створення джерел живлення, які працюють за принципом прямого перетворення одного з видів енергії (хімічної, механічної або теплової) на електричну. При цьому, до конструкції джерела струму пред'являються особливі вимоги, для реалізації яких потрібні нові технічні і технологічні рішення. З інформації, приведеної в [1], термоелектричні джерела струму (ТЕДС) найбільш відповідають вимогам, що висуваються до джерел живлення одноразової дії.

Основними частинами ТЕДС, що визначають їх ефективність є джерело тепла, в якості якого краще всього підходять суміші на основі цирконію та хромату барію [1], і термоелектричний перетворювач відповідної конструкції.

Проте, характер застосування вищезгаданих джерел живлення визначив їх специфіку, а оцінка сучасного стану розробок ТЕДС на основі аналізу науково-технічної інформації є проблемою. За інформацією, приведеною в [1], ТЕДС найбільш відповідають вимогам, які висуваються до джерел живлення одноразової дії.

Метою цієї роботи є дослідження по створенню високоефективної кільцевої термоелектричної батареї для ТЕДС одноразової дії.

### Кільцева термоелектрична батарея

У [2] приведені описи десятків термоелектричних генераторів (ТЕГ) з різними джерелами тепла на основі газоподібного, рідкого або твердого палива. Такі ТЕГ можуть тривалий час працювати в умовах кліматичних і механічних впливів, близьких до нормальних. Конструктивні виконання таких ТЕГ, як і їх питомі енергетичні характеристики не можуть бути застосовані в ТЕДС одноразової дії. В той же час, досвід створення термобатареї для таких ТЕГ є основою для створення оптимальної, як з точки зору конструктивного виконання, так і з точки зору технології виготовлення високоефективної термоелектричної батареї для ТЕДС. Найближчим аналогом з цієї точки зору є термоелектрична батарея, яка складається з 8 послідовно сполучених спіральних елементарних термобатареї, розташованих по колу на внутрішній поверхні циліндричного корпусу ТЕДС [1]. Простір між спіральними термобатареями заповнено термостійким компаундом для забезпечення механічної міцності термобатареї в ТЕДС.

За наявності ряду очевидних переваг перед конструкціями відомих ТЕДС конструкції термобатареї, опис якої наведено в [1], властивий ряд недоліків. Зокрема, це дуже складна технологія виготовлення спіральних термобатареї, яка є фінансово витратною, якщо ТЕДС випускаються серійно. Окрім того, спіральні термобатареї виготовляються з екструдованого термоелектричного матеріалу з низькою термоелектричною ефективністю ( $Z \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ). Тому було створено кільцеву термоелектричну батарею, гілки термоелементів якої виготовлено з високоефективного  $Bi_2Te_3$ .

### Комп'ютерне проектування кільцевої термобатареї для ІТ

Термоелектричний перетворювач для ТЕДС має бути спроектований з внутрішнім діаметром 39 мм і зовнішнім діаметром 50 мм у вигляді кільцевої термоелектричної батареї, що складається з розрахункової кількості елементарних однорядних термобатареї (ТЕБ), що забезпечують вихідну напругу 5В і електричну потужність 2Вт при робочому перепаді температури, який не перевищує 300К. У свою чергу ТЕБ повинні складатися із заданої кількості послідовно сполучених термоелементів з оптимальним поєднанням масо-габаритних характеристик і термоелектричних властивостей. Тому для комп'ютерного проектування використовувалася модель структурної одиниці ТЕБ - термоелемента який складається з гілок  $n$  - і  $p$ - типу провідності, комутаційних матеріалів та тепловирівнюючих електроізоляційних керамічних пластин (рис. 1).

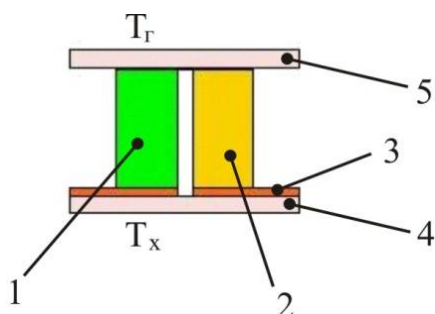


Рис. 1 Фізична модель структурного елемента ТЕБ.  
1, 2 – гілки термоелемента  $n$  - і  $p$ - типів провідності;  
3 – мідні комутаційні пластини; 4 - нижня керамічна пластина; 5 - верхня керамічна пластина.

Температури на тепловиділяючій і теплопоглинальній поверхнях  $T_h$  і  $T_c$  термоелемента фіксовані, бічна поверхня – адіабатично ізольована. Параметри термоелектричних матеріалів є функціями температури. Для визначення максимального ККД і максимальної електричної потужності необхідно знайти розподіл температур і щільності струму в гілках термоелемента.

Розв'язання поставленої задачі реалізується чисельним методом послідовних наближень з використанням програмного середовища «Comsol Multiphysics».

### Математичний опис моделі

Для опису потоків тепла і електрики в такому термоелементі використовувалися закони збереження енергії :

$$\operatorname{div}\vec{W} = 0, \quad (1)$$

і електричного заряду:

$$\operatorname{div}\vec{j} = 0, \quad (2)$$

де:

$$\vec{W} = \vec{q} + U\vec{j} \quad (3)$$

$$\vec{q} = \kappa\nabla T + \alpha T\vec{j}, \quad (4)$$

$$\vec{j} = -\sigma\nabla U - \sigma\alpha\nabla T, \quad (5)$$

У цих рівняннях  $\vec{W}$  – щільність потоку енергії,  $\vec{q}$  – щільність потоку тепла,  $\vec{j}$  – щільність електричного струму,  $U$  – електричний потенціал,  $T$  – температура,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності і теплопровідності матеріалів.

Враховуючи (3) – (5), отримаємо:

$$\vec{W} = -(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T - (\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U. \quad (6)$$

Тоді закони збереження (1),(2) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T] - \nabla[(\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U] = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla(\sigma\alpha\nabla T) - \nabla(\sigma\nabla U) = 0. \quad (8)$$

Цими нелінійними диференціальними рівняннями другого порядку в частинних похідних (7) і (8) визначаються розподіли температури  $T$  і потенціалу  $U$  в матеріалах гілок термоелементів, контактних, комутаційних і ізоляційних шарах термоелемента.

Граничні умови для розв'язання рівнянь (7) і (8) вибиралися таким чином. Фіксувалися температури теплопоглинальної і тепловиділяючої поверхні термоелемента  $T_h$  і  $T_c$ . Задавалося

нульове значення потенціалу на комутаційній пластині гілки n-типу провідності. На іншій комутаційній пластині гілки p-типу провідності задавалося значення  $U$ , яке складає половину термоЕРС, яку генерує термоелемент. У свою чергу значення генерованої термоЕРС визначалося системою рівнянь (7) і (8) за відсутності протікання струму через термоелемент.

На межах гілок термоелементів і комутаційних пластин, комутаційних пластин та керамічних пластин враховувалися умови рівності температур і теплових потоків.

Загальне рівняння програми «ComsolMyltiphysics» виглядає таким чином:

$$\nabla(-C\nabla M + \alpha M + \gamma) + \delta M + \beta \nabla M = f, \quad (9)$$

де

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}, \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{bmatrix},$$
$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} T \\ U \end{bmatrix}. \quad (10)$$

З аналізу виразів (7) - (10) випливає, що рівняння (9) можна спростити до наступного виду:

$$\nabla(-C\nabla M) = 0. \quad (11)$$

Диференціальне рівняння для компонент матриці має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \nabla(-C_{11}\nabla T) + \nabla(-C_{12}\nabla U) &= 0 \\ \nabla(-C_{21}\nabla T) + \nabla(-C_{22}\nabla U) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Співставляючи закони збереження у вигляді (7), (8) з рівняннями (12) отримаємо матрицю для комп'ютерної моделі:

$$C = \begin{pmatrix} \kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma & \alpha \sigma T + U \sigma \\ \sigma \alpha & \sigma \end{pmatrix}. \quad (13)$$

### Результати комп'ютерних досліджень

Із застосуванням вказаного методу розраховано енергетичні характеристики елементарних ТЕБ для ТЕДС. Як вхідні дані використовувалися експериментально виміряні температурні залежності термоелектричних параметрів матеріалів на основі телуриду вісмуту  $n$  - і  $p$ - типів провідності ( $n$  -  $Bi_2Te_3$  та  $p$  -  $Bi_2Te_3$ ), рис. 2.

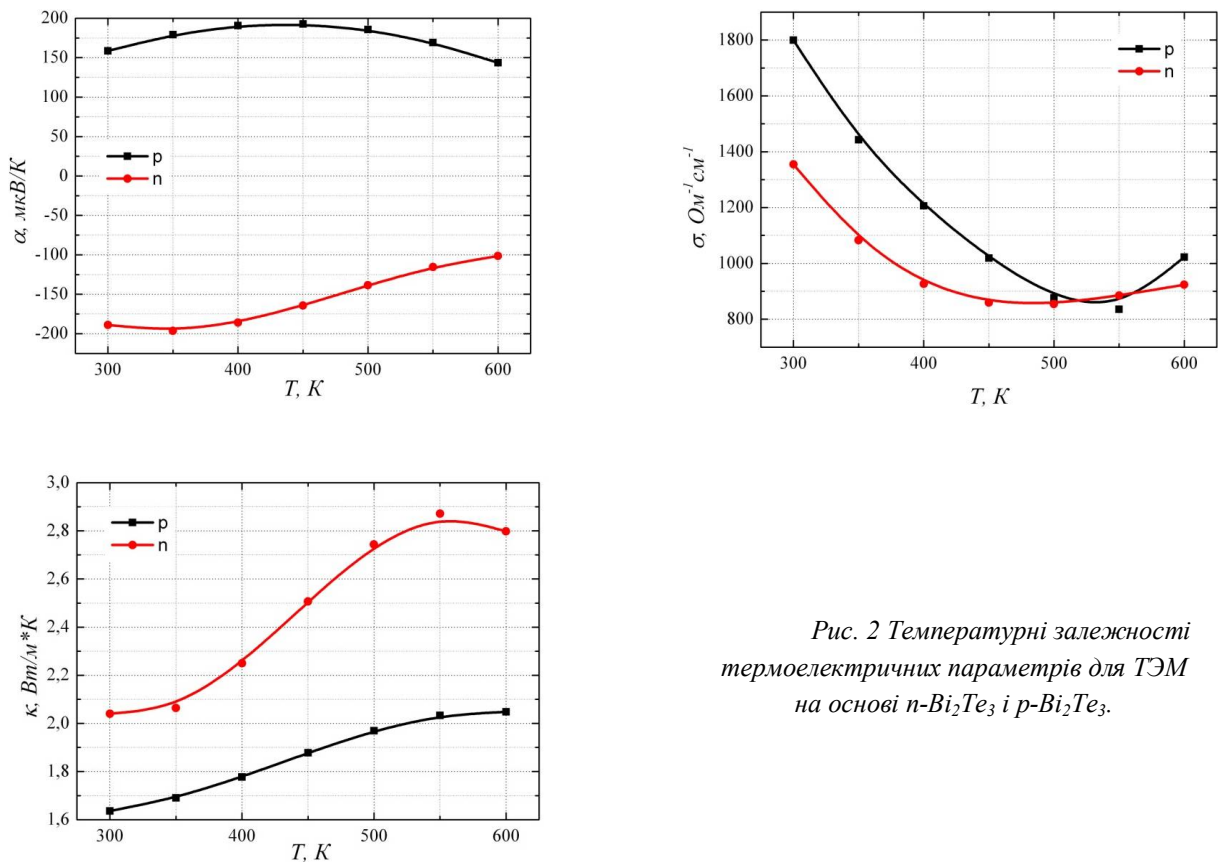


Рис. 2 Температурні залежності термоелектричних параметрів для ТЕМ на основі  $n\text{-Bi}_2\text{Te}_3$  і  $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3$ .

Температурні залежності (рис. 2) апроксимувалися одновимірними поліномами у вигляді  $\alpha^{n,p} = \alpha^{n,p}(T)$ ,  $\sigma^{n,p} = \sigma^{n,p}(T)$ ,  $\kappa^{n,p} = \kappa^{n,p}(T)$ , коефіцієнти яких вводилися в комп'ютерну програму.

В результаті моделювання отримано розподіли температури і електричного потенціалу для одного термоелемента, з яких складаються елементарні ТЭБ (мал. 3).

Розраховані енергетичні параметри термоелемента (напруга  $U$ , потужність  $P$ , ККД  $\eta$  за робочих перепадів температури  $\Delta T = 200 \text{ K}$ ,  $250 \text{ K}$  та  $300 \text{ K}$  на його поверхнях представлено в таблиці 1.

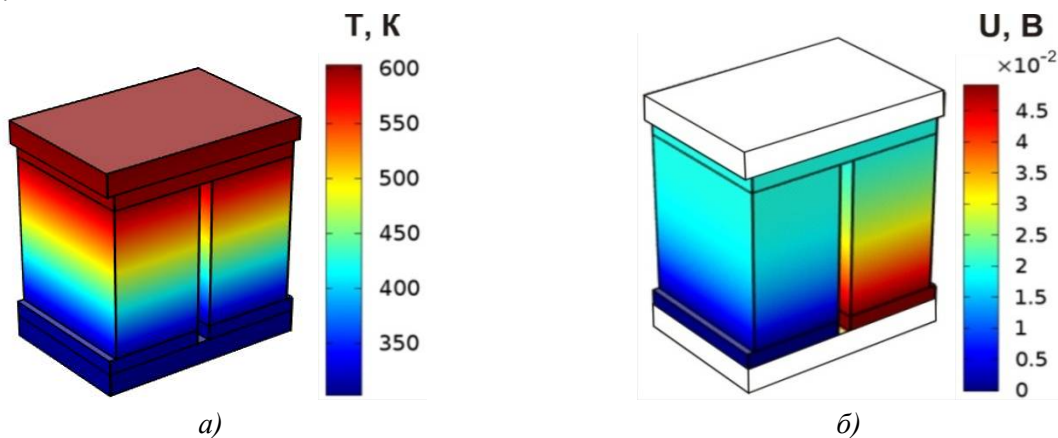


Рис. 3 Розподіл температур (а) та електричного потенціалу (б) в термоелементі.

Таблиця 1

Енергетичні параметри термоелемента

$\Delta T$ , К	$U$ , В	$P$ , Вт	$\eta$ , %
200	0.035	0.1	5.8
250	0.045	0.16	6.7
300	0.05	0.18	6.9

З урахуванням наведених даних знайдено розподіли температури та електричного потенціалу (рис. 4), а також енергетичні характеристики елементарної ТЕБ для ТЕДС (табл. 2).

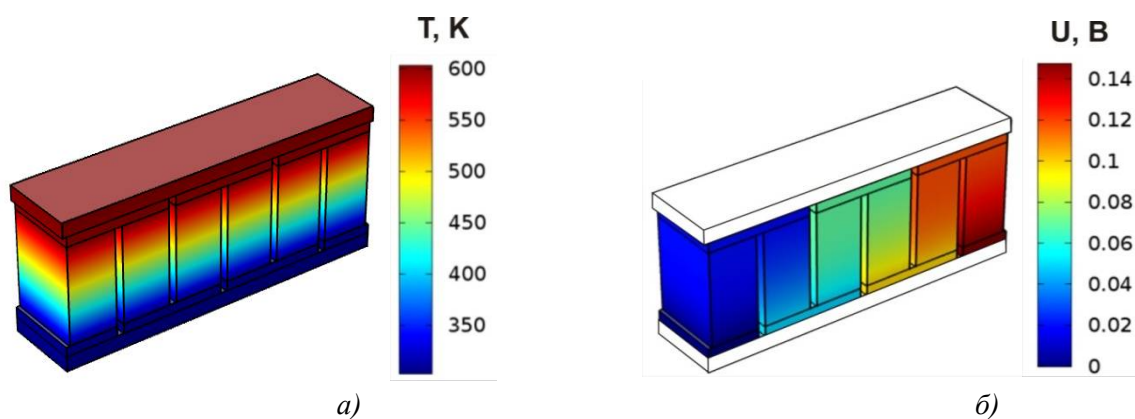


Рис. 4 Розподіл температур(а) і електричного потенціалу (б) елементарною ТЕБ.

Таблиця 2

Енергетичні характеристики елементарної ТЕБ для ТЕДС.

$\Delta T$ , К	ТЕДС		
	$U$ , В	$P$ , Вт	$\eta$ , %
200	0.105	0.31	6.0
250	0.135	0.48	6.7
300	0.145	0.56	7.0

На основі приведених в табл. 2 даних розраховано електричні характеристики кільцевої термобатареї для ТЕДС за робочих перепадів температури  $\Delta T = 200$  К, 250 К та 300 К (табл. 3).

Таблиця 3

Розрахункові електричні характеристики кільцевої термобатареї

$\Delta T, K$	ТЕДС	
	$U, B$	$P, Bт$
200	3.78	11.16
250	4.86	17.28
300	5.22	20.16

Таким чином, з даних, наведених у табл. 2 та 3 випливає, що для досягнення заданої електричної потужності та напруги ТЕДС кільцева термоелектрична батарея кожного зразка повинна складатися з 36 послідовно сполучених елементарних термобатареї. Для ТЕДС- 1 оптимальна кількість термоелементів в одній елементарній ТЕБ складає 3 штуки (6 гілок).

Слід зазначити, що комп'ютерне проектування термоелектричних перетворювачів проведене для режиму максимальної потужності, коли опір термобатареї дорівнює значенню зовнішнього навантаження. Насправді режим роботи ТЕДС буде іншим і істотний запас потужності ДС дозволить забезпечити необхідні у відповідності з ТЗ величини напруги.

Крім того, при комп'ютерному проектуванні не було враховано ряд чинників, що істотно впливають на вихідні характеристики ТЕДС. Зокрема, не враховано вплив контактних опорів на межах гілок термоелементів з комутаційними пластинами, на межах комутаційних пластин з керамікою. Окрім цього, не враховано втрати тепла з бічних поверхонь гілок ТЕБ та на шарі теплопровідного клею К- 400.

Попри це розрахунки підтвердили можливість досягнення вихідних характеристик ТЕДС за заданого робочого перепаду температури, який не перевищує 300К.

## Висновки

Методом комп'ютерного моделювання підтверджено можливість створення кільцевої термоелектричної батареї із зовнішнім діаметром 50мм і внутрішнім діаметром 39 мм для ТЕДС, яке забезпечує вихідну потужність не менше 20 Вт за напруги 5В.

## Література

1. Анатичук Л.И., Микитюк П.Д. «Малогабаритне термоелектричне джерело струму одноразової дії»// Термоелектричество- 2012, №1, с.56-62.
2. Анатичук Л.И. «Термоелементи і термоелектричні пристрої». Справочник.- К.: Наукова думка, 1979.-с.768.

Надійшла до редакції 11.02.2019

**Анатичук Л.І.**, *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
**Микитюк П.Д.**, *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>  
**Микитюк О.Ю.**, *канд. физ.-мат. наук, доцент*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектричества НАН і МОН України,  
ул. Науки, 1, Черновці, 58029, Україна, *e-mail: anatysh@gmail.com*;

<sup>2</sup>Черновицький національний університет  
імені Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського,  
2, Черновці, 58012, Україна;

<sup>3</sup>Вищеє державне навчальне закладення України  
«Буковинський державний медичний університет»,  
Театральна площа, 2, Черновці, 58002, Україна

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОЙ ТЕРМОБАТАРЕИ ДЛЯ ИСТОЧНИКА ТОКА ОДНОРАЗОВОГО ДЕЙСТВИЯ**

*Приведены результаты исследований по созданию кольцевой термоэлектрической батареи для источника тока с пиротехническим источником тепла. Методом компьютерного моделирования подтверждена возможность создания кольцевой термобатареи с заданными геометрическими размерами, обеспечивающая выходную мощность 2 Вт при напряжении 5 В. Библ. 2, рис. 4, табл. 3.*

**Ключевые слова:** термоэлектрическая батарея, источник тока, номинальное напряжение, выходная мощность.

**L.I Anatychuk.**, *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*<sup>1,2</sup>  
**P.D. Mykytiuk**, *cand. phys.-math. sciences*<sup>1,2</sup>  
**O.Yu. Mykytiuk**, *cand. phys.-math. sciences, docent*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine,  
*e-mail: anatysh@gmail.com*;

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

<sup>3</sup>Higher State Educational Institution of Ukraine “Bukovinian State Medical University”, 2, Theatre Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

## **DESIGN OF AN ANNULAR THERMOPILE FOR A SINGLE ACTING CURRENT SOURCE**



*The results of studies on the creation of an annular thermopile for a current source with a pyrotechnic heat source are presented. The method of computer simulation confirmed the possibility of creating an annular thermopile with predetermined geometric dimensions, providing an output power of 2W at a voltage of 5V. Bibl. 2, Fig. 4, Tabl. 3.*

**Key words:** thermoelectric battery, current source, rated voltage, output power.

## References

1. Anatychuk L.I., Mykytiuk P.D. (2012). Small-size thermoelectric current source of single action. *J. Thermoelectricity*, 1, 56-62.
2. Anatychuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva. Spravochnik.* [Thermoelements and thermoelectric devices. Handbook]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].

Submitted 11.02.2019