

УДК 536.24

Анатичук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>  
Прибила А.В., канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>



Анатичук Л.І.

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна



Прибила А.В.

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ З  
ПОЛУМ'ЯНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА ЗМІННОЇ  
ПОТУЖНОСТІ, ДВОКАСКАДНИМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ ТА  
АКУМУЛЯТОРАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

*У роботі виконано розрахунки динамічної потужності двокаскадного термоелектричного генератора з полум'яними джерелами тепла змінної потужності. Наводяться результати розрахунків такого генератора із каскадами, виготовленими із матеріалів на основі  $BiTe$  та  $SiGe$ . Бібл. 6, рис. 2.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, комп'ютерне проектування, фізична модель.

**Вступ**

*Загальна характеристика проблеми.* Одним із чинників, що обмежують широке практичне застосування термоелектричних генераторів (ТЕГ), є низька ефективність перетворення теплової енергії в електричну, зумовлена використанням в конструкції ТEG однокаскадних модулів з низьким значенням безрозмірної добротності термоелектричних матеріалів,  $ZT = 1.0 - 1.6$  [1–3]. Один із способів підвищення ККД термоелектричного перетворення полягає в розширенні діапазону робочих температур модуля шляхом каскадування [4]. Для створення генераторних модулів, оптимізованих на рівень робочих температур 30-600 °C раціонально використовувати двокаскадну схему з термоелементами на основі  $Bi-Te$  *n*- та *p*- типів провідності в низькотемпературному каскаді (до 300 °C) і, відповідно, термоелементами на основі  $Si-Ge$ , що забезпечують високу ефективність у високотемпературному каскаді (300 - 600 °C).

В Інституті термоелектрики НАН і МОН України розроблені спеціалізовані термоелектричні модулі із таких матеріалів для кожного із каскадів ТEG. Проте досі не проведені розрахунки параметрів ТEG, що використовує схему з термоелементами на основі  $Bi-Te$  в низькотемпературному каскаді і  $Si-Ge$  – у високотемпературному, в режимі, наближеному до його реальної експлуатації. Важливим залишається також питання правильного узгодження каскадів ТEG.

Отже, метою даної роботи є розрахунок динамічних робочих характеристик двокаскадного термоелектричного генератора із джерелами тепла змінної потужності у діапазоні температур 30-600 °C.

### Фізична модель

У розрахунках використано фізичну модель блока термоелектричного генератора (рис. 1), яка містить нагріту поверхню джерела тепла змінної потужності 1, теплообмінники для підведення 2 теплого потоку до модуля високотемпературного каскаду ТЕГ (виготовленого із термоелектричного матеріалу на основі Si-Ge [5]) 3 та теплообмінників 7 для відведення теплого потоку від двох модулів високотемпературного каскаду ТЕГ (виготовлених із стандартного термоелектричного матеріалу на основі Bi-Te [5]) 5, тепловирівнюючу пластину 4, теплову ізоляцію 6, стабілізатор електричної напруги 8 та акумулятор електричної енергії 9.

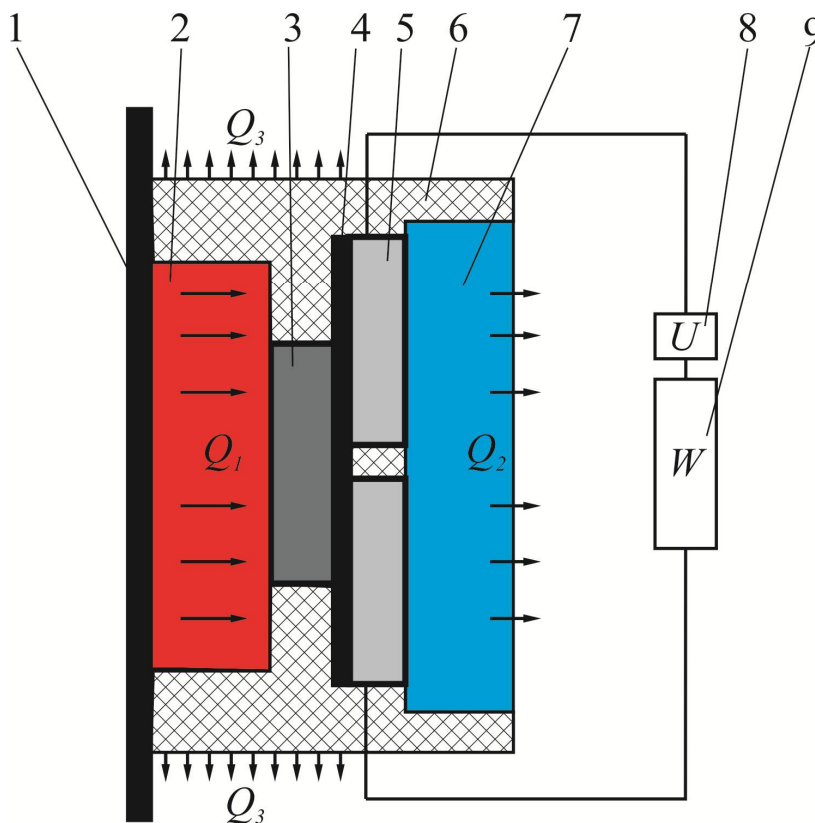


Рис. 1. Фізична модель блока термоелектричного генератора:

1 – нагріта поверхня; 2 – гарячий теплообмінник; 3 – модуль низькотемпературного каскаду ТЕГ; 4 – тепловирівнююча пластина; 5 – модулі високотемпературного каскаду ТЕГ; 6 – тепла ізоляція; 7 – холодний теплообмінник; 8 – стабілізатор напруги; 9 – акумулятор електричної енергії.

Оскільки генератор встановлений на нагріту поверхню, у моделі не розглядаються процеси теплопереносу від реального джерела горіння палива до цієї поверхні. Замість цього, для визначення температури нагрітої поверхні 1, використовуються експериментальні залежності її температури від часу при реальному циклі використання джерела тепла на твердому паливі [2].

### Математичний і комп'ютерний описи моделі

Таким чином, для розрахунку термоелектричного генератора відповідно до фізичної моделі (рис. 1) використано рівняння балансу теплот.

На гарячій стороні міститься джерело тепла змінної потужності  $Q_1[T_1(t)]$ . Його теплова потужність залежить від температури цієї поверхні  $T_1$ , яка, в свою чергу, змінюється із часом  $t$  [3], та подається у вигляді деякої функції  $f[T_1(t)]$ .

$$Q_1 = f[T_1(t)], \quad (1)$$

Підведення тепла від нагрітої поверхні до гарячої сторони термоелектричного модуля та відведення тепла до холодного теплообмінника описується рівняннями:

$$Q_1 = \chi_1[T_1(t) - T_T], \quad (2)$$

$$Q_2 = \chi_2[T_X - T_2], \quad (3)$$

де  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників;  $T_T$ ,  $T_X$  – температури гарячої та холодної сторони термоелектричного модуля відповідно;  $T_2$  – температура зовнішньої поверхні холодного теплообмінника.

Теплова потужність  $Q_2$  відводиться від холодного теплообмінника шляхом примусової конвекції повітря у навколишнє середовище:

$$Q_2 = \alpha(T_2 - T_0)S_m, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвективного теплообміну між поверхнею теплообмінника і навколишнім середовищем;  $S_m$  – площа поверхні теплообміну;  $T_0$  – температура навколишнього середовища.

Електрична потужність, яка генерується термоелектричним модулем пропорційна  $Q_1[T_1(t)]$  та його ККД  $\eta$ :

$$W = Q_1[T_1(t)] \cdot \eta, \quad (5)$$

Основні втрати тепла  $Q_3$  відбуваються через теплову ізоляцію:

$$Q_3 = \chi_4(T_M - T_0), \quad (6)$$

де  $\chi_4$  – тепловий опір ізоляції,  $T_M$  – температура внутрішньої поверхні теплової ізоляції.

Таким чином, рівняння теплового балансу для обраної моделі термоелектричного генератора можна записати у вигляді:

$$Q_1 = W + Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Для комп'ютерного представлення математичної моделі ТЕГ використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [6]. Для цього необхідно представити наші рівняння у наступному вигляді.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (8)$$

й електричного заряду

$$\text{div} \vec{j} = 0, \quad (9)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (11)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (12)$$

Тут  $\vec{E}$  – щільність потоку енергії,  $\vec{q}$  – щільність теплового потоку,  $\vec{j}$  – щільність електричного струму,  $U$  – електричний потенціал,  $T$  – температура,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (10) – (12), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (13)$$

Тоді закони збереження (8), (9) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla[(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (14)$$

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (15)$$

З розв'язку рівняння (14) - (15) ми одержимо розподіли фізичних полів, а також інтегральні значення ефективності та потужності ТЕГ.

### Опис динамічних потужностей ТЕГ

Для визначення реальних температурних умов на нагрітих поверхнях пічок із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі (дровах) проведено експериментальні дослідження та визначено залежності температур нагрітих поверхонь пічки від часу, протягом якого із рівними інтервалами відбувалося додавання однакової кількості дров [2].

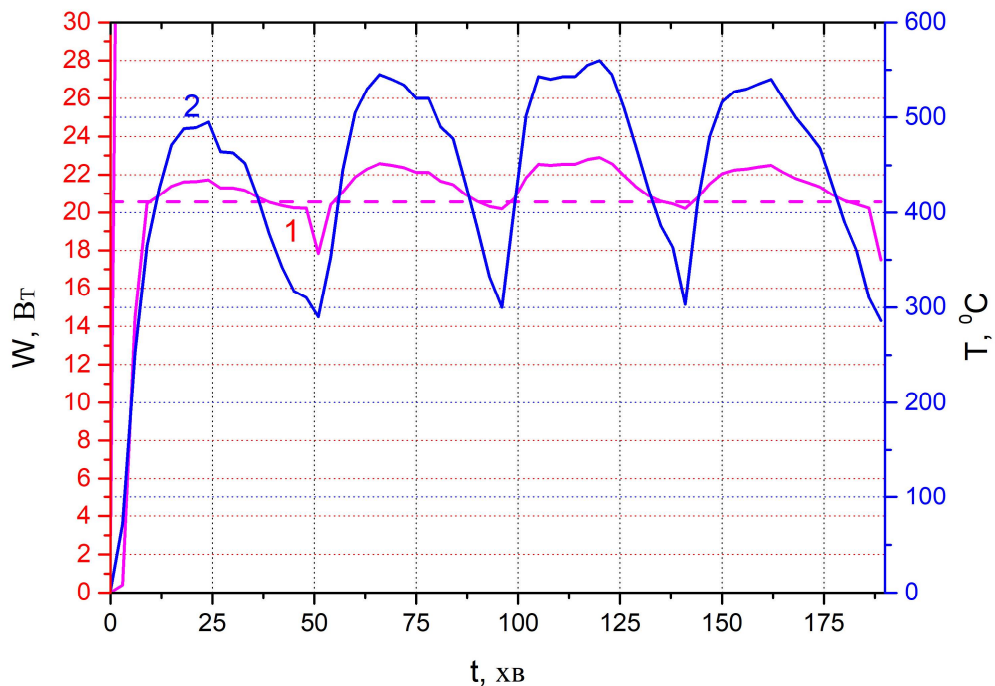


Рис. 2. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу:  
 1 – потужність ТЕГ при  $T_{\text{х}}=30^\circ$ , 2 – температура поверхні пічки.

Отримані дані оброблені у вигляді функціональних залежностей температур нагрітих поверхонь пічки від часу і використані при розрахунках характеристик термоелектричного генератора із полум'яними джерелами тепла змінної потужності на твердому паливі.

Таким чином, використовуючи комп'ютерні методи, проведено розрахунок динамічних потужностей ТЕГ за умов його встановлення на поверхні пічки (рис. 2).

Таким чином, на рис.2 наведено залежність потужності ТЕГ, розміщеного на задній поверхні пічки, від часу для температури холодної сторони ТЕГ  $T_{\text{х}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1 на рис.2). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 2 на рис. 2.

Як видно із рис. 2, характер залежності динамічної потужності від часу хоча й відтворює залежності температури поверхні пічки, проте ця залежність від температури є не такою різкою як в однокаскадному варіанті ТЕГ [3]. Для температури холодної сторони  $T_{\text{х}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля на високотемпературному каскаді (із *Si-Ge*) та двох на низькотемпературному (з *Bi-Te*), за вибраний відрізок часу становить 20.56 Вт. При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить  $\sim 70$  кДж.

Отже, досліджуваний варіант двокаскадного ТЕГ із спеціалізованих матеріалів на основі *BiTe - SiGe* дозволяє підвищити його питому потужність на  $\sim 12.5\%$  у порівнянні із однокаскадним варіантом [2].

## Висновки

1. На основі експериментальних даних, розраховано динамічну потужність двокаскадного ТЕГ із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі, що використовують термоелементи на основі *Bi-Te* в низькотемпературному каскаді і *Si-Ge* – у високотемпературному.
2. Усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля на високотемпературному каскаді (із *Si-Ge*) та двох на низькотемпературному (з *Bi-Te*), у заданому часовому відрізку становить 20.56 Вт (за температури його холодної сторони  $T_{\text{х}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить  $\sim 70$  кДж.
3. Встановлено, що досліджуваний варіант двокаскадного ТЕГ із спеціалізованих матеріалів на основі *BiTe - SiGe* дозволяє підвищити його питому потужність на  $\sim 12.5\%$  у порівнянні із однокаскадним варіантом.

## Література

1. Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М., Гаврилук М.В., Андрусак І.С. Термоелектричний генератор, що використовує тепло нагрітих поверхонь // Термоелектрика. – 2017. № 2. – С 84 – 95.
2. Анатичук Л.І., Розвер Ю.Ю., Прибила А.В., Максимук М.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності і стабілізаторами температури термобатарей // Термоелектрика. – 2018. № 2.
3. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності, однокаскадними термобатареями та акумуляторами електричної енергії // Термоелектрика. – 2018. № 3.
4. Михайловський В.Я. Термоелектричні каскадні модулі із матеріалів на основі *Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-PbTe*-TAGS. / Михайловський В.Я., Білінський-Слотило В.Р. // Термоелектрика, 2012, № 4, С. 67-74.
5. <http://www.ite.inst.cv.ua>
6. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції 22.10.2018

Анатичук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>  
Прибыла А.В., канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</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  
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,  
Черновці, 58012, Україна

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ, ДВУХКАСКАДНЫМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ И АККУМУЛЯТОРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*В работе выполнены расчеты динамической мощности двухкаскадного термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла переменной мощности. Приводятся результаты расчетов такого генератора с каскадами, изготовленными из материалов на основе систем Bi-Te и Si-Ge. Библиография, рис. 2.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, компьютерное проектирование, физическая модель.

Anatyshuk L.I., acad. National Academy of Sciences of Ukraine<sup>1,2</sup>  
Prybyla A.V., cand. Phys.-math. Sciences<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

## THERMOELECTRIC GENERATORS WITH FLAME HEAT SOURCES, TWO-STAGE THERMOPILES AND ELECTRIC ENERGY BATTERIES

*This paper presents calculations of the dynamic power of a two-stage thermoelectric generator with flame heat sources of variable power. The results of calculations of such a generator with its stages made of materials based on BiTe and SiGe are given. Bibliography, Fig. 2.*

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

### References

1. Anatyshuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, С 84 – 95.
2. Anatyshuk L.I., Rozver Yu. Yu., Prybyla A.V., Maksimuk M.V. (2018). Thermoelectric generators

with flame heat sources of variable power and temperature stabilizers for thermopiles. *J. Thermoelectricity*, 2.

3. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power, single-stage thermopiles and electric energy batteries. *J. Thermoelectricity*, 3.
4. Mykhailovsky V. Ya., Bilinsky-Slotylo V.R. (2012). Thermoelectric staged modules of materials based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-PbTe-TAGS. *J. Thermoelectricity*, 4, 67-74.
5. <http://www.ite.inst.cv.ua>
6. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB, 804 p.

Submitted 22.10.2018