

Анатичук Л.І., акад. НАН України^{1,2}, Максимук М.В.¹,

Прибила А.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2},

Розвер Ю.Ю.¹, Романюк І.Ф.²

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,

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

e-mail: anatych@gmail.com;

²Чернівецький національний університет

ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,

Чернівці, 58012, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ З ПОЛУМ'ЯНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА ЗМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ, ТА ТЕРМОСИФОНАМИ

У роботі виконано розрахунки динамічної потужності термоелектричного генератора з полум'яними джерелами тепла змінної потужності та термосифоном у якості стабілізатора температури. Наводяться результати розрахунків такого генератора, виготовленого із матеріалів на основі ВіТе. Бібл. 6, рис. 4, табл. 1.

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

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Полум'яні джерела тепла на твердому паливі, зокрема на дровах та пресованих брикетах, широко використовуються для обігріву приміщень і приготування їжі, особливо у сільській місцевості та віддалених районах. Це створює хороші можливості для застосування термоелектричних перетворювачів у якості автономних джерел електричної енергії спільно із такими печами [1 – 3].

Серійне виробництво термоелектричних генераторів із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі здійснюється багатьма виробниками [4, 5]. В них використовуються термоелектричні модулі з матеріалів на основі телуриду вісмуту з граничною «гарячою» температурою 300 °С. Проте температура поверхонь твердопаливних джерел тепла, на які встановлюється ТЕГ, досягає і 600 °С та постійно змінюється у часі. Це призводить до зменшення ресурсу роботи ТЕГ і, як наслідок, до швидкого виходу генератора з ладу. Для усунення цього в конструкції термогенератора передбачається наявність стабілізатора температури гарячої поверхні печі, що відсікає температури, які перевищують 300 °С.

Зрозуміло, що це призводить до зменшення електричної потужності ТЕГ, адже він використовує вже не всю теплову потужність печі.

В даній роботі пропонується використовувати у якості стабілізатора робочої поверхні термоелектричного генератора термосифони [6], що забезпечує оптимальні умови роботи ТЕГ.

Отже, метою даної роботи є розрахунок динамічних робочих характеристик термоелектричного генератора із джерелами тепла змінної потужності що використовує у якості стабілізатора температури термосифон.

Фізична модель

Для розрахунку основних енергетичних характеристик термогенератора на твердому паливі з тепловою стабілізацією температури термобатарей використано фізичну модель ТЕГ [3].

Схематичну конструкцію розробленого ТЕГ з тепловою трубою наведено на рис. 1.

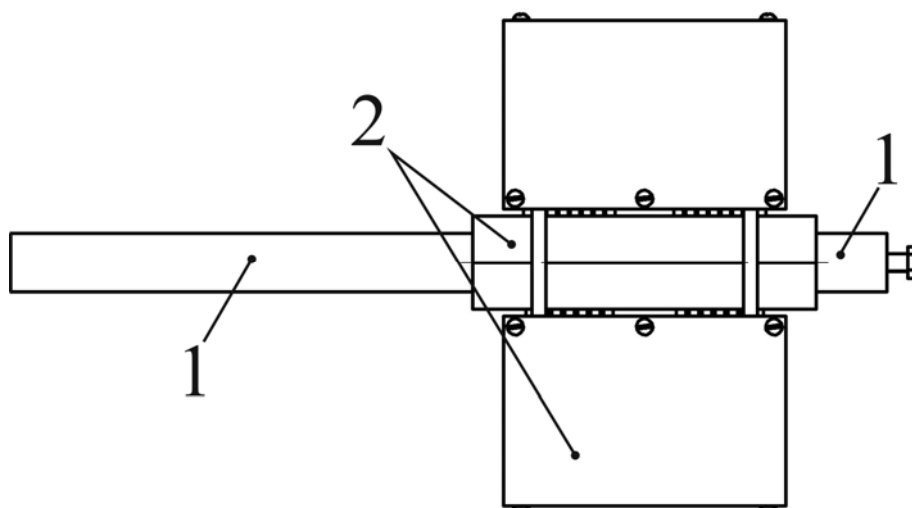


Рис. 1. Схематична конструкція ТЕГ на твердому паливі
з тепловою трубою: 1 – термосифон;
2 – термоелектричний перетворювач.

Основними конструктивними елементами термогенератора є термосифон 1 та термоелектричний перетворювач 2, які перебувають у тепловому контакті.

Термоелектричний перетворювач складається з двох симетричних частин, що теплообмінники та термоелектричні генераторні модулі "Алтек-1061" з матеріалу на основі телуриду вісмуту.

Працює термогенератор наступним чином. Теплова енергія від поверхні твердопаливної пічки нагріває випарник термосифона, що спричинює випаровування робочої рідини і рух її парів до зони конденсації, де відбувається теплопередача між парами рідини та термоелектричним перетворювачем. Внаслідок відбору тепла пари рідини

конденсуються і під дією гравітаційних сил повертаються до зони випарника, де процес нагрівання повторюється.

Відібрана від парів рідини теплова енергія проходить через гарячі теплообмінники термоперетворювача ТЕГ, нагріває термоелектричні модулі та відводиться в оточуючий простір повітряними радіаторами. Для інтенсифікації відводу тепла на повітряних радіатор розміщені вентилятори.

Математичний і комп'ютерний описи моделі

Для розрахунку термоелектричного генератора 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:

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

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

де χ_1, χ_2 – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників; T_r, 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 α – 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 η :

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

Основні втрати тепла Q_3 відбуваються через теплову ізоляцію:

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

де χ_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

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

й електричного заряду

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

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, α , σ , κ – 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

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 $T_x = 30^\circ\text{C}$ (1 на рис. 2). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 2 на рис. 2.

Як видно із рис. 2, електрична потужність ТЕГ із термосифоном практично не залежить від часу і рівна ~ 26 Вт за умови використання 4 термоелектричних модулів АЛТЕК-22.

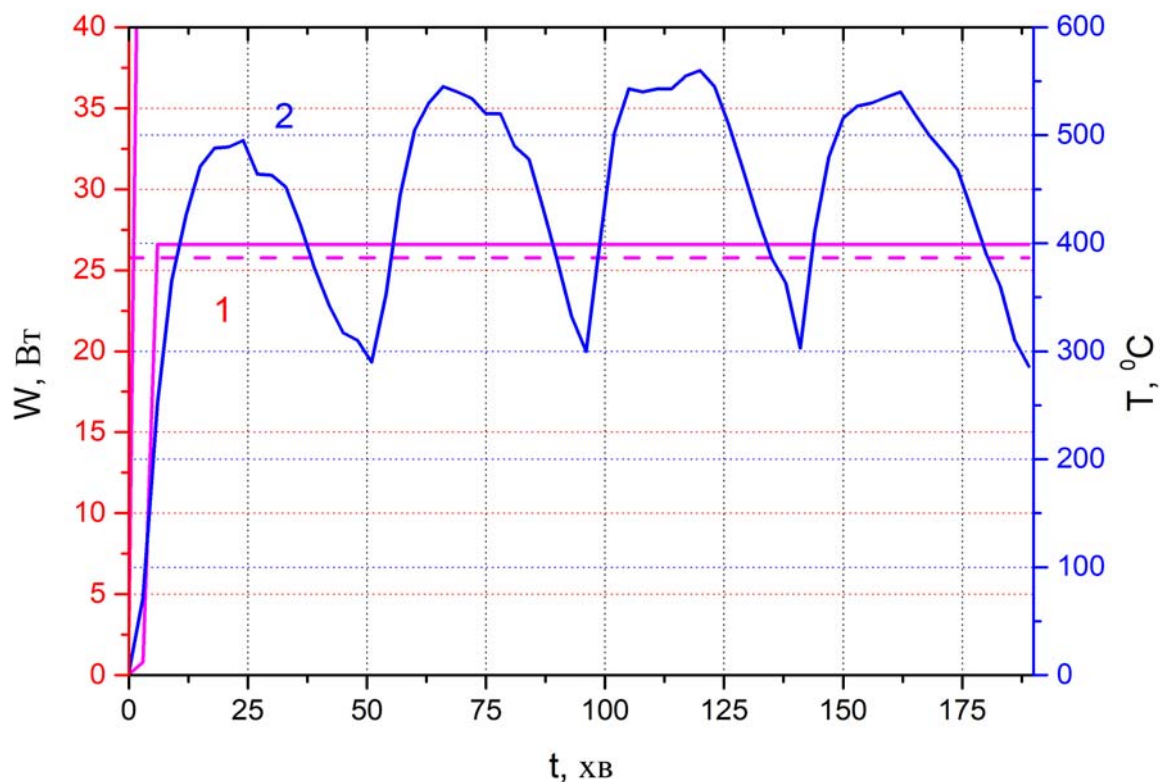


Рис. 2. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу: 1 – потужність ТЕГ при $T_x = 30^\circ$, 2 – температура поверхні пічки.

Експериментальні дослідження ТЕГ

Зовнішній вигляд розробленого ТЕГ на твердому паливі наведено на рис. 3.

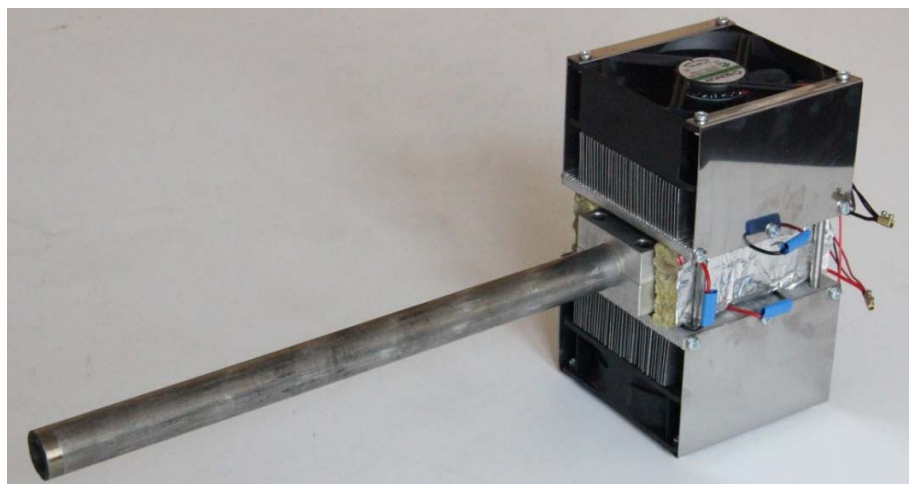


Рис. 3. Зовнішній вигляд ТЕГ із термосифоном

Для дослідження теплових характеристик теплової труби розроблено експериментальний стенд, наведений на рис. 4.

В ході стендових досліджень визначався температурний градієнт між зонами нагріву та конденсації при теплових потоках потужністю 560-200 Вт. Відвід тепла від термосифона здійснювався теплообміном з оточуючим середовищем, кут нахилу до горизонталі регулювався від 4 до 10 градусів.

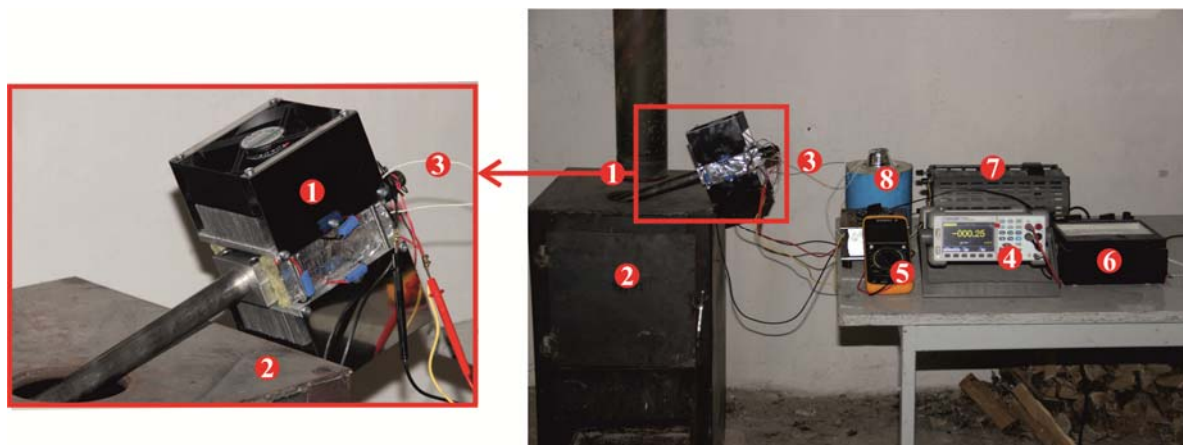


Рис. 4. Експериментальний стенд для дослідження енергетичних характеристик ТЕГ з термосифоном: 1 – твердопаливна пічка; 2 – ТЕГ; 3 – термопари; 4 – мультиметр; 5 – цифровий вольтметр; 6 – амперметр; 7 – реостат; 8 – дюар з льодом.

Для вимірювання та регулювання підведеного теплового потоку використовувався ватметр Д5088 з класом точності 0.2 та лабораторний автотрансформатор ЛАТР. В якості джерела тепла для теплової труби використовувався резистивний нагрівник. Для зменшення контактного опору між поверхнями теплової труби та нагрівника

застосовувалась графітна плівка, а для зниження теплових втрат з поверхні зони нагріву – базальтова теплоізоляція.

Розподіл температур вздовж труби контролювався термопарами типу ТХА. Система вимірювання температур відкалібрована в температурному діапазоні від -10°C до 700 °C з абсолютною похибкою ± 1.5 °C.

Таблиця

Енергетичні характеристики ТЕГ на твердому паливі з термосифоном

№	Найменування, одиниці вимірювання	Значення
1	Максимальна електрична потужність, Вт	21
2	Вихідна електрична напруга (без електронного блоку стабілізації), В	6
3	Сила струму, А	3,5
4	Зовнішній опір узгодженого навантаження, Ом	1.75
5	Температура гарячої сторони термобатарей, °C	250
6	Температура холодної сторони термобатарей, °C	50

Таким чином, експериментальні дослідження ТЕГ із тепловою трубою підтвердили основні результати проектування та створюють хороші передумови для подальшого практичного використання таких генераторів.

Висновки

1. На основі експериментальних даних, розраховано динамічну потужність ТЕГ із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі та термосифоном у якості стабілізатора температури
2. Розраховано електричну потужність для досліджуваного варіанту ТЕГ, що становить ~ 26 Вт за умови використання 4 термоелектричних модулів АЛТЕК-22.
3. В результаті експериментальних досліджень підтверджено, що використання термосифона в конструкції термогенераторів на твердому паливі є ефективним методом стабілізації температури гарячої сторони термоелектричних модулів.
4. Встановлено, що номінальна електрична потужність ТЕГ з термосифоном складає ~21 Вт. При цьому використання термосифона в конструкції розробленого ТЕГ дозволяє отримати стабільні значення температури гарячої сторони термобатарей на рівні 250 °C.

Література

1. Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М., Гаврилюк 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. –С. 22-30
 3. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності, однокаскадними термобатареями та акумуляторами електричної енергії // Термоелектрика. – 2018. – №6. – С. 17-26
 4. <http://www.energopech.ru>
 5. <http://kryothermtec.com/ru>
 6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%BE%D0%BD>.

Надійшла до редакції 25.12.2018

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}

Прибыла А.В., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatych@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА СМЕННОЙ МОЩНОСТИ, И ТЕРМОСИФОНАМИ

В работе выполнены расчеты динамической мощности термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла сменной мощности и термосифоном в качестве стабилизатора температуры. Приводятся результаты расчетов такого генератора, изготовленного из материалов на основе BiTe. Библ. 6, рис. 4, табл. 1.

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

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 HEAT SOURCES AND THERMOSIPHONS

In this work, the dynamic power of a thermoelectric generator with variable power flame heat sources and a thermosiphon as a temperature stabilizer is calculated. The results of calculations of such a generator made of BiTe based materials are presented. Bibl. 6, Fig. 4, table. 1.

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

References

1. Anatychuk L.I., Mocherniuk R.M., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J.Thermoelectricity*, 2, P. 84 – 95.
2. Anatychuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksymuk M.V. (2018). Thermoelectric generators with variable power flame heat sources and temperature stabilizers for thermopiles. *J.Thermoelectricity*, 2, P. 23-30
3. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2018). Thermoelectric genertaors with variable power heat sources, single-stage thermopiles and electric energy batteries. *J.Thermoelectricity*, 6, P. 14-22
4. <http://www.energopech.ru>
5. <http://kryothermtec.com/ru>
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%BE%D0%BD>.

Submitted 25.12.2018