

Лобунець Ю.М.



Лобунець Ю.М.

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

ПРО ОПТИМІЗАЦІЮ ТЕПЛОВИХ СХЕМ ТЕГ З ДЖЕРЕЛОМ ТЕПЛОТИ ПОСТІЙНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Розглянуто схему ТЕГ з джерелом теплоти постійної потужності (поверхня, що випромінює, з постійною температурою). Проведено аналіз особливостей схеми, які обумовлено жорсткими обмеженнями на тепловий режим пристрою. Показано можливості суттєвого покращення техніко-економічних характеристик таких ТЕГ за рахунок рішень, що забезпечують трансформацію теплових потоків в системі джерело теплоти – ТЕГ – теплоприймач.

Ключові слова: термоелектричний генератор, тепла схема ТЕГ, ефективність ТЕГ.

A scheme of thermoelectric generator (TEG) with constant-power heat source (radiating surface with fixed temperature) is considered. With specific reference, the peculiarities of scheme presented here caused by strict restrictions on device thermal conditions are analyzed. A solution is proposed assuring the possibility of drastic improvement of techno-economic and mass-dimensional characteristics of TEG due to transformation of heat fluxes at heat supply and removal.

Key words: thermoelectric generator, heat scheme of TEG, TEG efficiency..

Вступ

Особливості використовуваного джерела теплоти справляють істотний вплив на характеристики термоелектричних генераторів (ТЕГ), значною мірою зумовлюють вибір теплової схеми пристрою і його техніко-економічні показники. У класифікації ТЕГ за типом джерела теплоти як визначальну ознаку прийнято використовувати спосіб підведення теплоти до термобатареї - конвекцією, випромінюванням або теплопровідністю [1,2]. Одним з окремих випадків є використання джерел теплоти із постійною потужністю тепловиділення, таких як радіоізотопні джерела теплової енергії [3] або джерела випромінювання [4]. У деяких випадках задача проектування ТЕГ ускладнюється введенням додаткових обмежень, таких як обмеження на оптимізації. У цьому випадку виникають додаткові жорсткі зв'язки в системі джерело температури випромінюючої поверхні, [5], які звужують область визначення можливих рішень задачі теплоти – ТЕГ – стік теплоти, які спричиняють особливості вирішення задач оптимізації параметрів ТЕГ. Аналізу характеристик ТЕГ з джерелом теплоти постійної потужності за додаткових обмежень на температурний режим присвячено це повідомлення.

Постановка задачі

Розглянемо задачу розрахунку та оптимізації ТЕГ з джерелом теплоти постійної потужності з обмеженнями на температуру випромінюючої поверхні і температуру спаїв термоелементів. Умови однозначності задачі:

$T_o = \text{const}$ – температура випромінювача;

$q = \text{const}$ – тепловий потік на поверхні термобатареї;

$T_h = \text{const}$ – температура поверхні, що сприймає тепловий потік;

$t_x = \text{const}$ – температура стоку теплоти.

Така постановка завдання жорстко пов'язує умови теплопереносу в системі джерело теплоти – ТЕГ – стік теплоти. В роботі [5] детально розглянуто задачу в подібній постановці та визначено умови рівноваги в системі джерело теплоти (поверхня цементної печі) – поверхня нагрівання. Як вихідні будемо використовувати дані та результати, наведені в цій роботі:

$$\begin{aligned} q &= 4,5 \text{ кВт/м}^2; \\ T_o &= 300 \text{ }^\circ\text{C}; \\ T_h &= 80 \dots 170 \text{ }^\circ\text{C}; \\ t_x &= 30 \text{ }^\circ\text{C}; \end{aligned} \quad (1)$$

Особливістю розглянутої схеми є те, що для підтримки заданих граничних умов необхідно також забезпечувати певне значення термічного опору на ділянці поверхня нагрівання - стік теплоти, бо інакше неможливо виконати умови сталості температури випромінювача ($T_o = \text{const}$) та теплового потоку

$$q = K(T_h - t_x) = \text{const}, \quad (2)$$

де

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x} + \frac{h}{\lambda} + \frac{2\delta}{\lambda k}} - \text{коефіцієнт теплопередачі};$$

α_x – коефіцієнт тепловіддачі за відведення теплоти;

h – висота термоелемента;

λ – коефіцієнт теплопровідності термоелектричного матеріалу;

δ – товщина теплопереходу;

λk – коефіцієнт теплопровідності теплопереходу.

Значення коефіцієнта теплопередачі K , що задовольняють умови (1,2), ілюструє рис. 1.

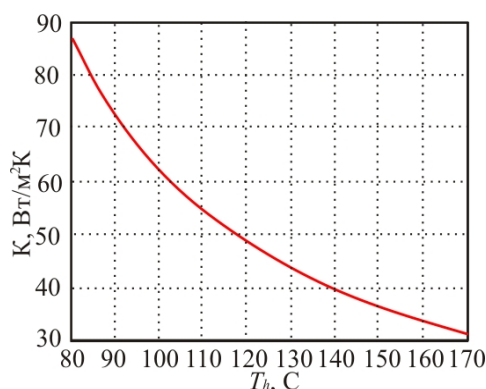


Рис. 1. Залежність коефіцієнта теплопередачі K від температури T_h .

Як видно з (2), співвідношення корисного перепаду температур на термоелементах, $\Delta T = (T_h - T_x)$ і наявного перепаду $(T_o - t_x)$ пропорційно співвідношенню термічного опору гілок термоелемента (h/λ) , і термічних опорів $1/\alpha_x$ і $2\delta/\lambda k$.

Висота термоелементів, що задовольняє умовам (2), дорівнює:

$$h_{opt} = \lambda / q[(T_h - t_x) - 1 / \alpha_x - 2\delta / k]; \quad (3)$$

Тобто за відомих умов охолодження (α_x) завжди існує тільки одне значення висоти термоелементів, що задовольняє умовам задачі. Допустимі значення h_{opt} залежно від α_x для вихідних даних (1) ілюструє рис.2.

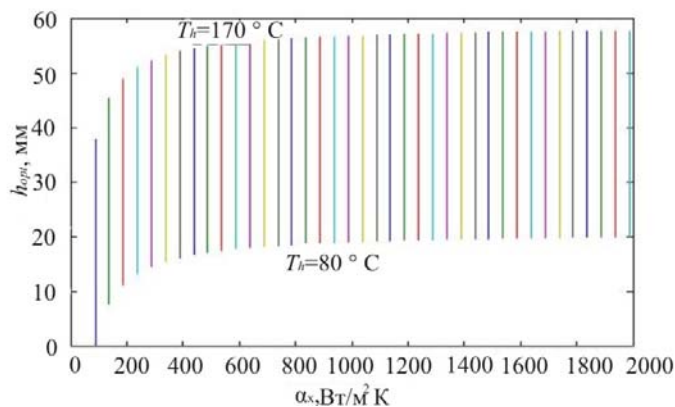


Рис. 2. Залежність допустимої висоти термоелементів h_{opt} , мм, від інтенсивності теплообміну α_x , Вт/м²К для $T_h = 80 \dots 170$ °С.

Як впливає з наведених на малюнку даних, область визначення задачі лежить в зоні неприйнятно високих значень h_{opt} . У випадку ж застосування термоелементів меншої висоти істотно знизиться корисний перепад температур і, відповідно, потужність ТЕГ. Наприклад, для термоелементів висотою 1.5 мм (типова висота для стандартних термоелектричних модулів) встановленим обмеженням відповідає коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_x = 35$ Вт/м²К. При цьому корисний перепад температур становитиме близько 3.5 К, а питома потужність ТЕГ не перевищить $N = 3$ Вт/м². У граничному випадку при $h \rightarrow 0$ рівновага в системі забезпечується за $\alpha_{xmin} = q / (T_h - t_x)$; $\Delta T = 0$, $N = 0$. Залежності питомої потужності ТЕГ від інтенсивності теплообміну і температури теплоприймальної поверхні T_h за оптимальної висоти термоелементів ілюструє рис. 3.

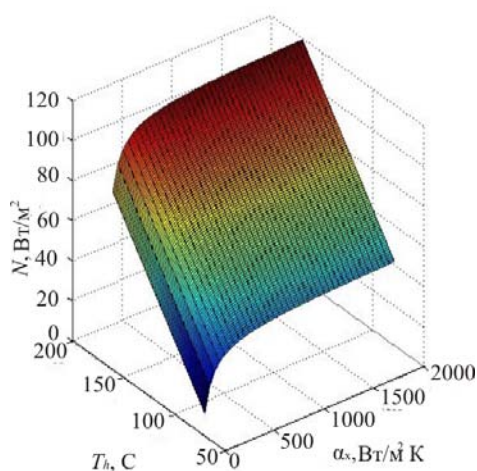


Рис. 3. Залежність питомої потужності ТЕГ N , Вт/м², від температури теплоприймаючої спая T_h і коефіцієнта тепловіддачі α_x , Вт/м²К.

Важливою характеристикою, яка значною мірою визначає вартість ТЕГ, є питома витрата термоелектричного матеріалу на одиницю потужності g , кг/Вт. У першому наближенні цей параметр можна визначити з відомих співвідношень

$$N = \frac{E^2}{4R} = \frac{(e\Delta T)^2}{4\rho h},$$

У граничному випадку

$$\Delta T \rightarrow (T_h - t_x) \rightarrow \frac{qh}{\alpha},$$

звідки отримаємо

$$g = \frac{4\lambda\nu}{zq^2}, \quad (4)$$

де λ , ν і z – теплопровідність, щільність і добротність термоелектричного матеріалу, відповідно.

Тобто у розглянутій постановці задачі питома витрата термоелектричного матеріалу g залежить тільки від щільності теплового потоку q . Для прийнятих вихідних даних цей параметр, розрахований за (4), дорівнює 1.2 кг/Вт. Насправді вираз (4) дає мінімально можливе значення g , бо не враховує незворотних втрат через відведення теплоти. Реально це значення для заданих умов (1) у широкому інтервалі α_x дорівнює близько 4.7 кг/Вт. Зрозуміло, що, незважаючи на можливість досягнення прийнятних значень питомої потужності і ККД, подібний ТЕГ не зможе знайти практичного застосування через занадто велику витрату термоелектричного матеріалу.

Для зменшення матеріалоемності ТЕГ необхідно вживати заходів з підвищення щільності теплових потоків під час підводу теплоти до термоелементів. З цією метою може бути використаний контур проміжного теплоносія, що, з одного боку, дасть можливість забезпечити відведення теплоти від джерела за заданих обмежень, а з іншого – інтенсифікацію підведення теплоти до ТЕГ. Наприклад, конструкцію, яку описано в [5], доцільно використовувати водяну сорочку – парогенератор, температура якої легко стабілізується на заданому рівні шляхом підтримки необхідного тиску насичуючих парів в контурі. Пара, що утворюється, направляється в теплообмінник – термоелектричний генератор [6]. Це дає можливість розв'язати жорсткий взаємозв'язок між характеристиками джерела теплоти, ТЕГ і стоком теплоти. Завдяки високій інтенсивності теплообміну за конденсації пари щільність теплових потоків при підводі теплоти до ТЕГ зростає на кілька порядків, що робить можливим радикально знизити масо-габаритні та вартісні характеристики ТЕГ. Попередня оцінка характеристик такого пристрою за сформульованих вище обмежень показує, що з $T_h = 170^\circ\text{C}$ питома потужність ТЕГ становитиме близько 12 кВт/м², а матеріаломісткість – не більше 0.33 г/Вт. Генеруюча частина такого ТЕГ потужністю 200 кВт буде являти собою компактний пристрій з розмірами близько 500x1000x500 мм, що цілком прийнятно для розглянутого застосування.

Висновки

Розглянуто схему термоелектричного генератора з джерелом теплоти постійної потужності та обмеженнями на температурний режим. Проведено аналіз схеми, показано, що визначальний вплив на техніко-економічні характеристики подібних ТЕГ складають обмеження на щільність теплового потоку. Запропоновано рішення, що забезпечує можливість

радикального поліпшення техніко-економічних і масо-габаритних характеристик ТЕГ за рахунок трансформації теплових потоків під час підводу і відводу теплоти.

Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. Л.И. Анатичук // – К.: Наук. Думка, 1979. – 768 с.
2. Котырло Г.К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов. / Г.К. Котырло, Ю.Н. Лобунец // Справочник. – К.: Наук. Думка, 1980. – 328 с.
3. Радиоизотопные источники электрической энергии/ Под ред. Г.М. Фрадкина. – М.: Атомиздат, 1978.- 304 с.
4. Анатичук Л.І. Про сонячні термоелектричні перетворювачі енергії / Л.І. Анатичук, Ю.М. Мочернюк, А.В. Прибила // Термоелектрика.-2013, № 4. - С.72 – 79.
5. Анатичук Л.І. Термоелектричні рекуператори тепла для цементних печей / Л.І. Анатичук, Жен-Донг-Хванг, В.В. Лисько, А.В. Прибила // Термоелектрика.- 2013, № 5.- С. 39-45.
6. Лобунець Ю.М. Термоелектричний генератор // Патент України № 8357 від 27.08.2013р.

Надійшла до редакції 06.02.2014