



Лобунец Ю.Н.

Лобунец Ю.Н.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭГ С ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

Рассмотрена схема ТЭГ с источником теплоты постоянной мощности (излучающая поверхность с фиксированной температурой). На конкретном примере проведен анализ особенностей рассматриваемой схемы, обусловленных жесткими ограничениями на тепловой режим устройства. Предложено решение, обеспечивающее возможность радикального улучшения технико-экономических и массо-габаритных характеристик ТЭГ за счет трансформации тепловых потоков при подводе и отводе теплоты.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, тепловая схема ТЭГ, эффективность ТЭГ.

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.

Введение

Особенности используемого источника теплоты оказывают существенное влияние на характеристики термоэлектрических генераторов (ТЭГ), в значительной степени определяют выбор тепловой схемы устройства и его технико-экономические показатели. В классификации ТЭГ по типу источника тепла в качестве определяющего признака принято использовать способ подвода тепла к термобатареям – конвекцией, излучением или теплопроводностью [1, 2]. Одним из частных случаев задачи является использование источников тепла заданной тепловой мощности, таких как радиоизотопные источники тепловой энергии [3] или источники излучения [4]. В некоторых случаях задача усложняется введением дополнительных ограничений, таких как ограничения на температуру излучающей поверхности, [5], сужающих область определения задачи. В этом случае возникают дополнительные жесткие связи в системе источник тепла – ТЭГ – сток тепла, определяющие особенности решения задач оптимизации параметров ТЭГ. Анализ характеристик ТЭГ с источником тепла постоянной мощности при дополнительных ограничениях на температурный режим посвящено настоящее сообщение.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу расчета и оптимизации ТЭГ с источником тепла постоянной мощности при заданных ограничениях на температуру излучающей поверхности и температуру теплопринимающих спаев. Условия однозначности задачи: $T_o = \text{const}$ – температура излучателя; $q = \text{const}$ – тепловой поток на поверхности теплоприемника; $T_h = \text{const}$ – температура теплоприемника; $t_x = \text{const}$ – температура стока теплоты.

Такая постановка задачи жестко ограничивает условия теплопереноса в системе источник тепла – ТЭГ – сток тепла. В работе [5] подробно рассмотрена задача в подобной постановке и определены условия равновесия в системе источник тепла (поверхность цементной печи) – теплоприемник. В качестве исходных будем использовать данные и результаты, приведенные в этой работе:

$$\begin{aligned} q &= 4.5 \text{ кВт/м}^2; \\ T_o &= 300 \text{ }^\circ\text{C}; \\ T_h &= 80 \dots 170 \text{ }^\circ\text{C}; \\ t_x &= 30 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (1)$$

Особенностью рассматриваемой схемы является то, что для поддержания заданных граничных условий необходимо также обеспечивать строго определенное значение термического сопротивления на участке тепловоспринимающая поверхность – сток тепла, поскольку иначе невозможно выполнить условие постоянства температуры излучателя ($T_o = \text{const}$) и теплового потока

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

где

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x} + \frac{h}{\lambda} + \frac{2\delta}{\lambda k}} - \text{коэффициент теплопередачи; } \alpha_x - \text{коэффициент теплоотдачи при отводе}$$

тепла; h – высота термоэлемента; λ – коэффициент теплопроводности термоэлектрического материала; δ – толщина теплоперехода; λ_k – коэффициент теплопроводности теплоперехода.

Значения коэффициента теплопередачи K , удовлетворяющие условиям (1, 2), иллюстрирует рис. 1.

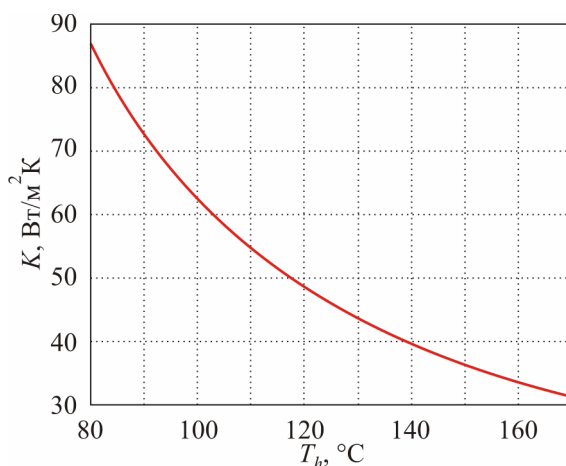


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопередачи K от температуры T_h .

Как видно из (2), соотношение полезного перепада температур на термоэлементах, $\Delta T = (T_h - T_x)$, и располагаемого перепада $(T_o - t_x)$ пропорционально соотношению термического сопротивления ветвей термоэлемента (h/λ) и термических сопротивлений.

Высота термоэлементов, удовлетворяющая условиям (2), равна:

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

Таким образом, при известных условиях охлаждения (α_x) всегда существует только одно значение высоты термоэлементов, удовлетворяющее условиям задачи. Допустимые значения h_{opt} в зависимости от α_x для исходных данных (1) иллюстрирует рис. 2.

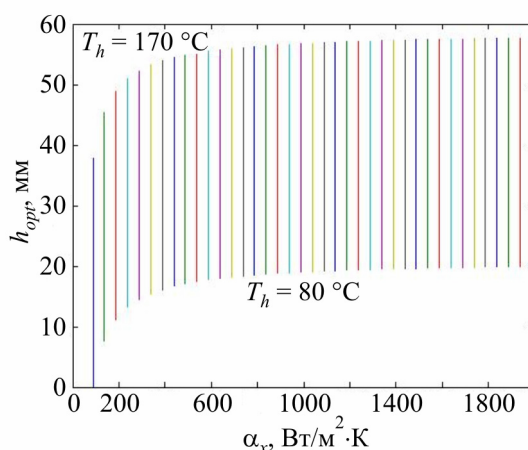


Рис. 2. Зависимость допустимой высоты термоэлементов h_{opt} , мм, от интенсивности теплообмена α_x , Вт/м²·К для $T_h = 80...170$ °С.

Как следует из приведенных на рисунке данных, область определения задачи лежит в зоне неприемлемо высоких значений h_{opt} . В случае же применения термоэлементов стандартной высоты существенно снизится полезный перепад температур и, соответственно, мощность ТЭГ. Например, для термоэлементов высотой 1.5 мм (типичная высота для стандартных термоэлектрических модулей) установленным ограничениям соответствует коэффициент теплоотдачи $\alpha_x = 35$ Вт/м²·К. При этом полезный перепад температур составит порядка 3.5 К, а удельная мощность ТЭГ не превысит $N = 3$ Вт/м². В предельном случае, при $h \rightarrow 0$, равновесие в системе обеспечивается при $\alpha_{x\ min} = q/(T_h - t_x)$; $\Delta T = 0$, $N = 0$. Зависимости удельной мощности ТЭГ от интенсивности теплообмена и температуры тепловоспринимающей поверхности T_h при оптимальной высоте термоэлементов иллюстрирует рис. 3.

Важной характеристикой, в значительной степени определяющей стоимость ТЭГ, является удельный расход термоэлектрического материала на единицу мощности g , кг/Вт. В первом приближении этот параметр можно определить из известных соотношений

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

В предельном случае

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

откуда получим

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

где λ , ν и z – теплопроводность, плотность и добротность термоэлектрического материала, соответственно.

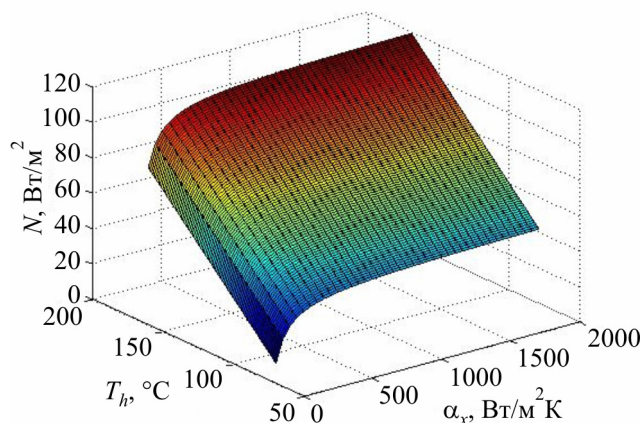


Рис. 3. Зависимость удельной мощности ТЭГ N , Вт/м², от температуры тепловоспринимающего спая T_h и коэффициента теплоотдачи α_x , Вт/м²К.

Таким образом, в рассматриваемой постановке задачи удельный расход термоэлектрического материала g зависит только от плотности теплового потока q . Для принятых исходных данных этот параметр, рассчитанный по (4), равен 1.2 кг/Вт. В действительности выражение (4) дает минимально возможное значение g , так как, не учитывая необратимых потерь при отводе тепла. Реально это значение для заданных условий (1) в широком интервале изменения α_x составляет порядка 4.7 кг/Вт. Понятно, что несмотря на возможность достижения приемлемых значений удельной мощности и КПД, подобный ТЭГ не сможет найти практического применения из-за слишком большого расхода термоэлектрического материала.

Для уменьшения материалоемкости ТЭГ необходимо предпринимать меры по повышению плотности тепловых потоков при подводе тепла к термоэлементам. С этой целью может быть использован контур промежуточного теплоносителя, что с одной стороны позволит обеспечить отвод тепла от источника при заданных ограничениях, а с другой – интенсификацию подвода тепла к ТЭГ. Например, для описанной в [5] конструкции целесообразно использовать водяную рубашку – парогенератор, заданная температура которой легко стабилизируется путем поддержания необходимого давления насыщающих паров в контуре. Образующийся пар направляется в теплообменник-термоэлектрический генератор [6]. Это позволяет развязать жесткую взаимосвязь между характеристиками источника теплоты, ТЭГ и стоком тепла. Благодаря высокой интенсивности теплообмена при конденсации паров плотность тепловых потоков при подводе тепла к ТЭГ возрастает на несколько порядков, что позволяет радикально снизить массо-габаритные и стоимостные характеристики ТЭГ. Предварительная оценка характеристик такого устройства при сформулированных выше ограничениях показывает, что при $T_h = 170$ °С удельная мощность ТЭГ составит порядка 12 кВт/м², а материалоемкость – не более 0.33 г/Вт. Собственно генерирующая часть такого ТЭГ мощностью 200 кВт будет представлять собой компактное устройство размерами порядка $500 \times 1000 \times 500$ мм³, что вполне приемлемо для рассматриваемого приложения.

Выводы

Рассмотрена схема термоэлектрического генератора с источником тепла постоянной мощности и ограничениями на температурный режим. Проведен анализ схемы, показано, что определяющее влияние на технико-экономические характеристики подобных ТЭГ оказывают ограничения на плотность теплового потока. Предложено решение, обеспечивающее возможность радикального улучшения технико-экономических и массо-габаритных характеристик ТЭГ за счет трансформации тепловых потоков при подводе и отводе теплоты.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: [справочник] / Л.И. Анатычук. – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
2. Котырло Г.К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов: [справочник] / Г.К. Котырло, Ю.Н. Лобунец. – К.: Наук. думка, 1980. – 328 с.
3. Радиоизотопные источники электрической энергии / [под ред. Г.М. Фрадкина]. – М.: Атомиздат, 1978. – 304 с.
4. Анатычук Л.И. О солнечных термоэлектрических преобразователях энергии / Л.И. Анатычук, Ю.Н. Мочернюк, А.В. Прибыла // Термоэлектричество. – 2013. – № 4. – С. 75 – 82.
5. Анатычук Л.И. Термоэлектрические рекуператоры тепла для цементных печей / Л.И. Анатычук, Жен-Донг Хванг, В.В. Лысько, А.В. Прибыла // Термоэлектричество. – 2013. – № 5. – С. 41 – 48.
6. Патент Украины №8357. Термоэлектрический генератор / Лобунец Ю.Н. – от 27.08.2013.

Поступила в редакцию 06.02.2014.