

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ВЕТВЬЮ В ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Снарский А.А.<sup>1,2</sup>, Безсуднов И.В.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «КПИ» Киев, Украина

<sup>2</sup>Инстит проблем регистрации информации НАН Украины, Киев, Украина

<sup>3</sup>ЗАО «НПП Наука-Сервис», Москва, Россия

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С-Петербург, Россия

E-mail: biv@akuan.ru

Основной проблемой эффективности термоэлектрических (ТЭ) устройств – генераторов, холодильников и т.п., является проблема увеличения безразмерной ТЭ добротности материала  $ZT = (\sigma\alpha^2 / \kappa)T$ , где  $\sigma$  – удельная электропроводность,  $\alpha$  – термоЭДС,  $\kappa$  – удельная теплопроводность,  $T$  – абсолютная температура.

В стационарном режиме энергетические характеристики ТЭ устройств зависят только от одной характеристики материала — ТЭ добротности  $ZT$ . Чем выше добротность, тем выше значение КПД (в режиме генерации) и тем ниже температура охлаждения (в режиме холодильника).

Нестационарные режимы работы ТЭ устройств постоянно привлекают внимание исследователей [1-3].

В нестационарном режиме на эффективность ТЭ устройства, наряду с ТЭ добротностью  $ZT$ , влияют такие параметры, как теплопроводность, длительность импульса тока в импульсном режиме, время релаксации тепловых процессов и др. Эти режимы имеют свои преимущества по сравнению со стационарными, так, например, при импульсном режиме подачи тока [4-11] можно получить в определенные моменты времени более глубокое охлаждение по сравнению со стационарным режимом. Оптимизация режима эксплуатации может позволить получить улучшенные, по сравнению со стационарным режимом характеристики ТЭ устройств.

Импульсный режим работы ТЭ устройства состоит из двух фаз. Первая фаза – функциональная, сильно нестационарная, созданная импульсом тока, вторая – релаксационная, более длительная, в этой фазе ТЭ устройство, как правило, уже не используется.

В данной работе рассмотрен нестационарный установившийся периодический режим работы ТЭ устройства. В отличие от импульсного

нестационарного режима в исследуемом режиме ТЭ устройство используется непрерывно. Исследован следующий принципиальный вопрос – возможно ли в таком режиме получить лучшие характеристики по сравнению со стационарным режимом, хотя бы в отдельные моменты времени.

Поскольку в этой работе нас интересует только этот принципиальный вопрос, то будут проигнорированы существенные для реального применения технические детали. Будет рассмотрено ТЭ устройство с термоэлементом из одной ветви постоянного сечения, а роль второй будут играть нагреватель и холодильник, у которых ТЭ свойства отсутствуют. Для такой модели, для двух типов нестационарных режимов (П-режим и С-режим), удастся получить ТЭ характеристики в аналитическом виде и явным образом выделить параметры, от которых они зависят и проанализировать предельные возможности.

ТЭ устройство, работающее в периодическом тепловом режиме с переключением П-режим, схематически представлено на Рис 1.а. Через равные промежутки времени термоэлемент поворачивается в плоскости рисунка и его горячий и холодный концы меняются местами.

ТЭ устройство, работающее в периодическом режиме с плавным синусоидальным изменением температуры С-режим, представлено на Рис 1.б.

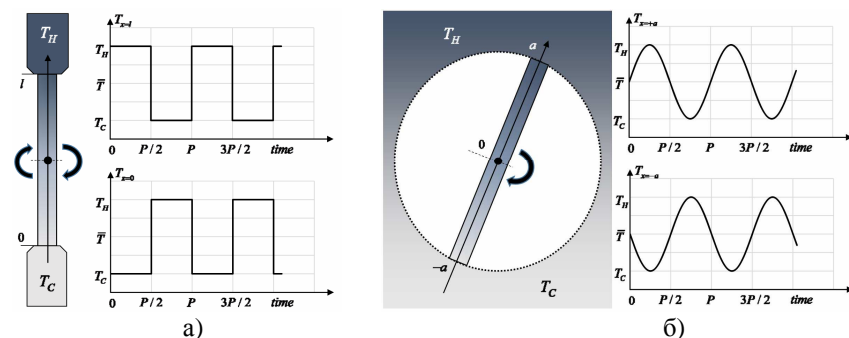


Рис.1. Схематическое изображение вращающихся термоэлектрических устройств, работающих в П-режиме (а) и С-режиме (б).

Распределение температуры в пластине с отверстием, где функционирует ТЭ устройство линейно изменяется, например, справа налево (см. Рис 1.б), соответственно на концах термопары, вращающейся в

отверстии (см. Рис 1.б), температура будет изменяться непрерывно по синусоидальному закону.

Термоэлемент (Рис. 1а,б) постоянного сечения состоит из одной ТЭ ветви размером  $l = 2a$ . Вторая ветвь термопары, тепло- и токоподводящие контакты не обладают ТЭ свойствами, период изменения температуры -  $P$  постоянен.

Для обоих режимов при выполнении дальнейших расчетов удобнее считать термоэлемент неподвижным, а температуру на его концах изменяющейся по заданному периодическому закону.

Уравнение теплопроводности для ТЭ ветви имеет стандартный вид

$$c_v \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho j^2, \quad (1)$$

где  $t$  - время,  $x$  - координата,  $T(x,t)$  - температура,  $j(t)$  - плотность электрического тока,  $\rho$  - удельное сопротивление,  $\kappa$  - удельная теплопроводность,  $c_v$  - удельная теплоёмкость,  $\rho_0$  - объёмная плотность, также обозначим  $\chi = \kappa / c_v \rho_0$  - температуропроводность.

Для П-режима граничные условия на концах ветви термоэлемента можно записать в виде (Рис. 1.а)

$$T(x,t)|_{x=0} = \bar{T} - T_0 \theta(t) \quad (2)$$

$$T(x,t)|_{x=l} = \bar{T} + T_0 \theta(t),$$

где  $\bar{T}$  - средняя температура,  $2T_0 = \Delta T$  - максимальный перепад температур между холодным и горячим контактами, а функция  $\theta(t)$  на четных полупериодах принимает значение 1, а на нечетных -1

$$\theta(t) = \begin{cases} +1, & nP < t < (n+1/2)P \\ -1, & (n+1/2)P < t < (n+1)P \end{cases} \quad (3)$$

С-режим соответствует случаю, когда на концах термопары температура меняется по непрерывному периодическому синусоидальному закону, при этом граничные условия на концах ветви задаются в виде

$$T(x,t)|_{x=\pm a} = \bar{T} \pm T_0 \sin(\omega t), \quad (4)$$

где  $\omega$  - циклическая частота изменения температуры.

Таким образом, во всех рассмотренных случаях максимальное значение температуры нагретого спая равно  $T_H = \bar{T} + T_0$ , а охлажденного  $T_H = \bar{T} - T_0$ .

В режиме охлаждения по ветви термоэлемента идет ток, для рассмотренных режимов ток определяется следующим образом

$$j = j_0 \theta(t), \quad (\text{П-режим})$$

$$j = j_0 \sin\left(\frac{2\pi}{P}t\right). \quad (\text{С-режим}) \quad (5)$$

В режиме генерации ток ветви термоэлемента определяется согласно закону Зеебека  $j \sim \alpha \Delta T$ , где  $\alpha$  - коэффициент термоэдс, который мы будем считать независимым от температуры

$$\Delta T = 2T_0, \quad (\text{П-режим})$$

$$\Delta T = 2T_0 \sin\left(\frac{2\pi}{P}t\right). \quad (\text{С-режим}) \quad (6)$$

Уравнение (1) с граничными условиями (2) или (4) и соотношениями для протекающего по термоэлементу тока (5) или (6) образуют систему уравнений, которая допускает аналитическое решение.

На следующем рисунке представлено распределение температур в ветви термоэлемента в С-режиме, рассчитанное аналитически для нескольких моментов времени, отсчитываемых от начала очередного периода.

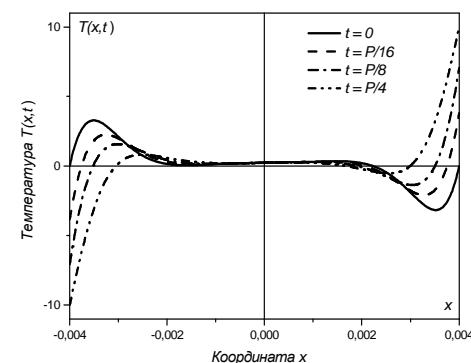


Рис.2. Распределение температуры вдоль ветви термоэлемента  $T(x,t)$  для различных моментов времени от начала периода, указанных на рисунке. Температура  $\bar{T} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 10^\circ\text{C}$ , длина ветви  $a = 0.04\text{m}$ , теплопроводность  $\kappa = 1.7\text{W/mK}$ , температуропроводность  $\chi = 1.2 \cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ , плотность тока  $j = 0.1 \cdot 10^6\text{A/m}^2$ , период  $P = 1\text{s}$ .

Как оказалось, в С-режиме в режиме холодильника возможно подобрать такие параметры материала и процесса, что минимальная температура охлаждения будет ниже таковой для стационарного режима

$$\frac{T_c^{\min}}{T_c^{st}} = \frac{1 + \sqrt{1 + Z_e \bar{T}}}{1 + \sqrt{1 + Z \bar{T}}}, \quad (7)$$

где  $T_c^{\min}$  - минимальная температура охлаждения в С-режиме,  $T_c^{st}$  - в стационарном режиме, а  $Z_e \bar{T} = Z \bar{T} / \beta(\mu)$  - перенормированная добротность и

$$\beta(\mu) = \frac{\mu}{2\sqrt{2}} \left( 1 + \frac{1}{2\mu} \frac{sh(\mu)ch(\mu) + \cos(\mu)\sin(\mu)}{ch^2(\mu) - \sin^2(\mu)} \right) \times \frac{sh(\mu/\sqrt{2})ch(\mu/\sqrt{2}) + \sin(\mu/\sqrt{2})\cos(\mu/\sqrt{2})}{sh^2(\mu/\sqrt{2}) + \sin^2(\mu/\sqrt{2})} \quad (8)$$

и

$$\mu^2 = a^2 \frac{\omega}{\chi}. \quad (9)$$

Подбор оптимального, с точки зрения эффективности охлаждения, значения параметра  $\mu$  (см. рис.3) дает значение  $\mu_{\min} = 1.53$ .

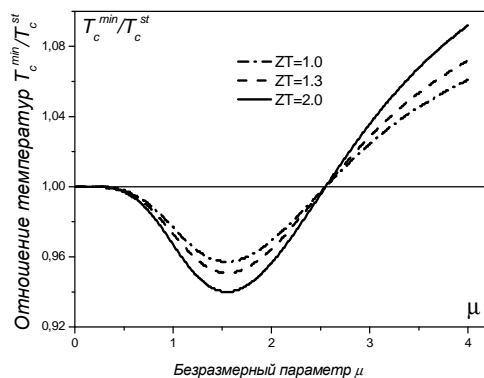


Рис.3. Отношение минимальных температур для С-режима  $T_c^{\min}$  и стационарного режима  $T_c^{st}$ .

Оптимальное значение для  $T_c^{\min}$  параметра  $\beta(\mu) \approx 0.76$  дает

$$T_c^{\min} \approx \frac{2\bar{T}}{1 + \sqrt{1 + 1.3Z\bar{T}}}. \quad (9)$$

Таким образом, при использовании материала с добротностью  $ZT = 1$  в С-режиме достигается такое охлаждение, для достижения которого в стационарном режиме необходимо иметь материал с добротностью 1.3, а в случае  $ZT = 1.3$  материал с добротностью 1.7.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tritt T. M., Thermoelectric Phenomena, Materials, and Applications, Annual Review of Materials Research, Vol. 41, No. 1, 2011, pp. 433-448.
2. Snyder G. J., Toberer E. S., Complex thermoelectric materials, Nature Materials Vol. 7, 2008, pp. 105 – 114.
3. Nolas G.S., Poon J., Kanatzidis M., Recent developments in bulk thermoelectric materials, Materials Research Society Bulletin, Vol. 31, 2006, pp. 199-205.
4. Стильбанс Л. С., Федорович Н. А., ЖТФ, Т. 28, № 3, 1958б с. 489-492.
5. Parrott J. E., Solid State Electron. Vol.1, 1960, pp. 135.
6. Naer V. A., Journal of engineering physics, Vol. 8, 1965, pp. 340.
7. Иорданишвили Е.К. Термоэлектрические источники питания, М.: Советское радио, 1968. – 184 с.
8. Snyder G. J., Fleurial J. P., Caillat T., Yang R., Chen G., J. Appl. Phys. Vol. 92, 2002, pp 1564-1569.
9. Chakraborty A., Ng K. C., International Journal of Heat and Mass Transfer, 49, 1845 (2006).
10. Zhou Q., Bian Z., Shakouri A., J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.40, 2007, p.4376.
11. Mao J. N., Chen H. X., Jia H., Qian X.L., Journal of Applied Physics, Vol. 112, 2012, p. 014514.