

3. Исследованы режимы работы, а также получена упрощенная зависимость для определения вольт-амперной характеристики разработанного плазмотрона, которая удовлетворительно коррелирует с экспериментальными данными.

Литература

1. Chen, F. F. Principles of plasma processing [Text] / F. F. Chen, J. P. Chang. — Los Angeles: Plenum/Kluwer Publishers, 2002. — 249 p.
2. Дресвин, С. В. Физика и техника низкотемпературной плазмы [Текст] / С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб, В. С. Клубникин; под общ. ред. С. В. Дресвина. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
3. Дзюба, В. Л. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы [Текст]: монография / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов. — Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. — 448 с.
4. Fridman, A. Plasma Chemistry [Text] / A. Fridman. — Cambridge: Cambridge University Press, 2008. — 1022 p. — ISBN-13 978-0-511-39857-5.
5. Способ плазменного напыления покрытий [Электронный ресурс]: Патент РФ № 2283364, МПК С 23 С 4/12 / Бекренев Н. В., Лясников В. Н., Трофимов Д. В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный технический университет. — № 200413266602; заявл. 09.11.2004; опубл. 10.09.2006. — Режим доступа: \www/URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2283364>
6. Тополянский, П. А. Плазменное нанесение токопроводящих покрытий на инструмент и технологическую оснастку при атмосферном давлении [Текст] / П. А. Тополянский // Сварка в Сибири. — 2005. — № 1(13). — С. 63–66.
7. Тополянский, П. А. Исследование ионно-плазменных износостойких покрытий на инструментальных сталях [Текст] / П. А. Тополянский // Металлообработка. — 2004. — № 1(19). — С. 24–30.
8. Крохин, В. П. Декорирование стекла и изделий из него методом плазменного напыления [Текст] / В. П. Крохин, В. С. Бессмертный, В. А. Панасенко и др. // Стекло и керамика. — 1999. — № 3. — С. 12–14.
9. Авдеев, И. В. Модификация поверхности силикатного стекла ионно-плазменной обработкой [Текст] / И. В. Авдеев, С. П. Лушин, А. А. Шрам // Физика и химия обработки материалов. — Москва, 2009. — № 2. — С. 54–57.
10. Способ поверхностной модификации стекла и стеклоизделий: Декларационный патент на полезную модель № 11329, С 03 С 17/06 / Авдеев И. В., Шрам А. А., Малышко С. Е., Выхованец В. В. — Бюл. № 12. — 2005.

ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМОВОЙ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ СКЛА ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ

Запропоновано конструкцію і досліджені режими роботи електродугового плазмотрона постійного струму, який усуває необхідність у використанні порошкового матеріалу покриття певного гранулометричного складу, дозволяє використовувати в якості вихідного матеріалу впровадження водні розчини солей і підвищує ефективний коефіцієнт використання матеріалу впровадження при поверхневій обробці скла.

Ключові слова: плазмотрон, скло, матеріал впровадження, модифікація поверхні, покриття.

Шрам Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Запорожский национальный технический университет, Украина, e-mail: alexshrum@yahoo.com.

Шрам Олександр Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електропостачання промислових підприємств, Запорізький національний технічний університет, Україна.

Shram Alexander, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: alexshrum@yahoo.com

УДК 621.362.192

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44212

**Зайков В. П.,
Мещеряков В. И.,
Журавлев Ю. И.**

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДВУХКАСКАДНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Проведен сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности двухкаскадных термоэлектрических устройств (ТЭУ) при использовании различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов, отличающихся коэффициентами термоЭДС $\bar{\epsilon}$ и электропроводности $\bar{\sigma}$, для перепадов температуры ΔT от $\Delta T = 60$ К до $\Delta T = 90$ К и режимов работы от Q_{0max} до λ_{min} , и показана возможность уменьшения суммарной интенсивности отказов двухкаскадных ТЭУ.

Ключевые слова: надежность, термоэлектрические устройства, материалы, температура, интенсивность отказов.

1. Введение

Термоэлектрические охлаждающие устройства относятся к перспективным системам обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры, которые имеют преимущество по сравнению с воздушными и жид-

костными системами по массогабаритным параметрам, динамическим характеристикам и показателям надежности, что обусловлено отсутствием подвижных частей и твердотельной природе генерации холода.

Основными параметрами и показателями термоэлектрических охладителей являются: перепад температур,

холодопроизводительность, холодильный коэффициент, необходимое число термоэлементов, интенсивность отказов, которые в основном определяются параметрами исходными термоэлектрических материалов, в частности, коэффициентом термоЭДС, теплопроводностью, электрическим сопротивлением и эффективностью.

Повышение холодильного коэффициента термоэлектрических охладителей является значимой проблемой холодильной техники, поскольку именно по этому показателю термоэлектрические охладители уступают компрессионным, поэтому усилия, направленные на повышение эффективности термоэлектрических материалов, либо подходы, способствующие росту холодопроизводительности и надежности термоэлектрических охладителей, являются актуальными.

2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Разработке концептуальных основ [1], технологии изготовления материалов [2, 3], созданию новых материалов с повышенной эффективностью [4–6], повышению электрической проводимости при сохранении теплопроводности [7], которые напрямую связаны с показателями надежности, уделяется значительное внимание. Показано, что требования к параметрам материалов и технологии изготовления термоэлектрических модулей для объемных и планарных модулей различаются [8, 9], как и системам, их основе [10, 11].

При всем этом усредненная эффективность термоэлектрического материала для серийного производства в настоящее время не превышает: $\bar{Z}_M = 2,4\text{--}2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1/\text{K}$ [12], что представляет существенную проблему для развития термоэлектрических охладителей и расширения области их использования.

3. Объект, цель и задачи исследования

Целью работы является повышение показателей надежности термоэлектрических охладителей при использовании исходных термоэлектрических материалов в существующем диапазоне эффективности.

Объект исследования — сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности двухкаскадных термоэлектрических охладительных устройств при использовании различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов.

Предмет исследования — связь показателей надежности с основными значимыми параметрами термоэлементов.

Приведенные в работе [12] данные расчетов основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ для различных режимов работы от $Q_{0\max}$ до λ_{\min} позволяют провести сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности и выбрать такие варианты сочетаний параметров исходных материалов, обеспечивающие повышение показателей надежности двухкаскадных ТЭУ, что является задачами настоящей работы, для следующих исходных данных:

- тепловая нагрузка $Q_0 = 2,0$ Вт;
- перепад температур $\Delta T = 60$ К; 70 К; 80 К; 90 К;
- температура тепловыделяющего спая $T = 300$ К;
- отношение высоты l к площади поперечного сечения s ветви термоэлемента $l/s = 10$;
- номинальная интенсивность отказов $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \times 1/\text{час}$;
- назначенный ресурс $t = 10^4$ час.

4. Модели различных вариантов сочетаний усредненных параметров исходных материалов

В рассматриваемом случае используются одни и те же исходные материалы в каскадах, отличающиеся коэффициентом термоЭДС \bar{e} и электропроводности $\bar{\sigma}$.

Для построения двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности воспользуемся, как и в [1], различными вариантами сочетаний усредненных параметров исходных материалов, приведенных в табл. 1 при $T = 300$ К; $\bar{Z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}$; $l/s = 10$; $\Delta T = 0$.

Вариант (3) — это традиционный вариант сочетания параметров исходного материала в модуле, широко используемого в условиях серийного производства. Варианты (4) и (5) отличаются повышенной электропроводностью и большей термоэлектрической мощностью охлаждения γ .

4.1. Модель отношения количества термоэлементов в каскадах. Используя соотношение для холодопроизводительности первого каскада [1], можно записать выражение для определения количества термоэлементов n_{13} в первом каскаде КТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5). Так, для традиционного варианта (3) можно записать в общем виде:

$$n_{13} = \frac{Q_{03}}{\gamma_{13}(2B_{13} - B_{13}^2 - \Theta_{13})}, \quad (1)$$

где Q_{03} — тепловая нагрузка, B_{13} — относительный рабочий ток, Θ_{13} — относительный перепад температуры первого каскада варианта (3), γ_{13} — термоэлектрическая мощность охлаждения.

Таблица 1

Диапазоны параметров вариантов сочетаний термоэлектрических материалов

Вариант сочетания	$\bar{e}, \frac{\text{мкВ}}{\text{К}}$	$\bar{\sigma}, \frac{\text{См}}{\text{см}}$	$\approx \lambda \cdot 10^3, \frac{\text{Вт}}{\text{См} \cdot \text{К}}$	$\bar{e}^2 \bar{\sigma} \cdot 10^4, \frac{\text{Вт}}{\text{К}^2 \text{см}}$	$\gamma = \bar{e}^2 \bar{\sigma} \bar{l}_0 \cdot l/s, \text{ Вт}$
1	250	550	14,3	0,344	0,310
2	210	800	14,7	0,353	0,318
3	200	900	15,0	0,360	0,325
4	180	1200	16,0	0,390	0,351
5	165	1500	17,0	0,410	0,370

Для i -го варианта:

$$n_{1i} = \frac{Q_{0i}}{\gamma_{1i}(2B_{1i} - B_{1i}^2 - \Theta_{1i})}. \quad (2)$$

Разделив (2) на (1) получим:

$$\frac{n_{1i}}{n_{13}} = \frac{Q_{0i}\gamma_{13}(2B_{13} - B_{13}^2 - \Theta_{13})}{Q_{03}\gamma_{1i}(2B_{1i} - B_{1i}^2 - \Theta_{1i})}. \quad (3)$$

Если принять условие, что тепловая нагрузка одна и та же $Q_{0i} = Q_{03} = Q_0$, режим работы один и тот же $B_{1i} = B_{13} = B_1$ и относительные перепады равны $\Theta_{1i} = \Theta_{13} = \Theta_1$. Тогда выражение (3) можно представить в виде:

$$\frac{n_{1i}}{n_{13}} = \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}}, \text{ т. е. } n_{1i}\gamma_{1i} = n_{13}\gamma_{13} = \text{const}. \quad (4)$$

Таким образом, получено соотношение, позволяющее определить количество термоэлементов в первом каскаде КТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) по сравнению с традиционным (3).

Используя соотношение, приведенное в [1], можно записать выражение для определения отношения количества термоэлементов в смежных каскадах n_2/n_1 для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5).

Так, для традиционного варианта (3) можно записать:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)_3 = \frac{\gamma_{13} \left[2B_{13} \left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_{03}} \Theta_{13} \right) + B_{13}^2 - \Theta_{13} \right]}{\gamma_{23} (2B_{23} - B_{23}^2 - \Theta_{23})}, \quad (5)$$

для i -го варианта:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)_i = \frac{\gamma_{1i} \left[2B_{1i} \left(1 + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \Theta_{1i} \right) + B_{1i}^2 - \Theta_{1i} \right]}{\gamma_{2i} (2B_{2i} - B_{2i}^2 - \Theta_{2i})}. \quad (6)$$

Разделив (6) на (5) получим:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)_i = \frac{\gamma_{1i} \left[2B_{1i} \left(1 + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \Theta_{1i} \right) + B_{1i}^2 - \Theta_{1i} \right] \gamma_{23} (2B_{23} - B_{23}^2 - \Theta_{23})}{\gamma_{2i} (2B_{2i} - B_{2i}^2 - \Theta_{2i}) \gamma_{13} \left[2B_{13} \left(1 + \frac{\Delta T_{\max 13}}{T_{03}} \Theta_{13} \right) + B_{13}^2 - \Theta_{13} \right]}. \quad (7)$$

Приняв условие:

$$B_{1i} = B_{13} = B_1; \quad \Theta_{1i} = \Theta_{13} = \Theta_1; \quad B_{2i} = B_{23} = B_2;$$

$$\Theta_{2i} = \Theta_{23} = \Theta_2; \quad \frac{\Delta T_{\max 13}}{T_{03}} = \frac{\Delta T_{\max 1i}}{T_{i-1}}.$$

Тогда выражение (7) примет вид:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)_i = \frac{\gamma_{1i}\gamma_{23}}{\gamma_{2i}\gamma_{13}}. \quad (8)$$

Таким образом, получено соотношение, позволяющее определить отношение количества термоэлементов в смежных каскадах КТЭУ $(n_2/n_1)_i$ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) по сравнению с традиционным (3).

4.2. Модель относительной интенсивности отказов в каскадах. Используя соотношение, приведенное в [1], можно записать выражение для определения относительной интенсивности отказов λ_1/λ_0 первого каскада КТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5).

Так, для традиционного варианта (3) можно записать:

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)_3 = \frac{n_{13} B_{13}^2 (\Theta_{13} + C_{13}) \left(B_{13} + \frac{\Delta T_{\max 13}}{T_{03}} \Theta_{13} \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 13}}{T_{03}} \Theta_{13} \right)^2} K_{T13}, \quad (9)$$

где K_{T13} — коэффициент значимости, зависящий от температуры для варианта (3).

Для i -го варианта:

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)_i = \frac{n_{1i} B_{1i}^2 (\Theta_{1i} + C_{1i}) \left(B_{1i} + \frac{\Delta T_{\max 1i}}{T_{i-1}} \Theta_{1i} \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1i}}{T_{i-1}} \Theta_{1i} \right)^2} K_{T1i}. \quad (10)$$

Разделив (10) на (9) получим:

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)_i = \frac{n_{1i} B_{1i}^2 (\Theta_{1i} + C_{1i}) \left(B_{1i} + \frac{\Delta T_{\max 1i}}{T_{i-1}} \Theta_{1i} \right)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max 13}}{T_{03}} \Theta_{13} \right)^2 K_{T1i}}{n_{13} B_{13}^2 (\Theta_{13} + C_{13}) \left(B_{13} + \frac{\Delta T_{\max 13}}{T_{03}} \Theta_{13} \right)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1i}}{T_{i-1}} \Theta_{1i} \right)^2 K_{T13}}. \quad (11)$$

При условии:

$$B_{1i} = B_{13} = B_1; \quad \Theta_{1i} = \Theta_{13} = \Theta_1;$$

$$C_{1i} = C_{13} = C_1; \quad \frac{\Delta T_{\max 1i}}{T_{i-1}} = \frac{\Delta T_{\max 13}}{T_{03}};$$

и $K_{T1i} = K_{T13} = K_{T1}$.

Тогда выражение (11) примет вид:

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)_i = \frac{n_{1i}}{n_{13}}, \text{ либо } \frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{13}} = \frac{n_{1i}}{n_{13}}. \quad (12)$$

Используя соотношение (4), получим:

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)_i = \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}}, \text{ либо } \frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{13}} = \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}}. \quad (13)$$

Используя выражения, приведенные в [1], можно записать выражение для определения относительной интенсивности отказов λ_2/λ_0 второго каскада КТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5). Опустив промежуточные действия, подробно описанные выше, получим:

$$\frac{\lambda_{2i}}{\lambda_{23}} = \frac{n_{2i}}{n_{23}} = \frac{\gamma_{23}}{\gamma_{2i}}. \quad (14)$$

4.3. Модель относительной мощности потребления в каскадах. Мощность потребления первого каскада двухкаскадного ТЭУ можно представить в виде:

$$W_1 = 2n_1\gamma_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_0} \Theta_1 \right). \quad (15)$$

Тогда отношение мощности потребления i -го W_{1i} варианта сочетания к традиционному W_{13} можно представить в виде:

$$\frac{W_{1i}}{W_{13}} = \frac{2n_{1i}\gamma_{1i} B_{1i} \left(B_{1i} + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i1}} \Theta_{1i} \right)}{2n_{13}\gamma_{13} B_{13} \left(B_{13} + \frac{\Delta T_{\max 3}}{T_{03}} \Theta_{13} \right)}. \quad (16)$$

Если принять, что режим работы один и тот же, т. е. $B_{1i} = B_{13} = B_1$, и перепад температур один и тот же, т. е. $\Theta_{1i} = \Theta_{13} = \Theta_1$, а так же $\frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} = \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_{02}} = \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0}$.

Тогда выражение (16) примет вид:

$$\frac{W_{1i}}{W_{13}} = \frac{n_{1i}}{n_{13}} \cdot \frac{\gamma_{1i}}{\gamma_{13}}, \text{ с учетом (4) } \frac{W_{1i}}{W_{13}} = \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}} \cdot \frac{\gamma_{1i}}{\gamma_{13}} = 1. \quad (17)$$

Мощность потребления первого каскада $W_{1i} = W_{13} = \text{const}$ — величина постоянная для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) при одном и том же режиме работы и перепаде температуры ΔT .

Мощность потребления второго каскада двухкаскадного ТЭУ можно представить в виде:

$$W_2 = 2n_2\gamma_2 B_2 \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right). \quad (18)$$

Тогда отношение мощности потребления i -го W_{2i} варианта сочетания к традиционному W_{23} можно записать в виде:

$$\frac{W_{2i}}{W_{23}} = \frac{2n_{2i}\gamma_{2i} B_{2i} \left(B_{2i} + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_{2i} \right)}{2n_{23}\gamma_{23} B_{23} \left(B_{23} + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_{23} \right)}. \quad (19)$$

При условии, что режим работы один и тот же, т. е. $B_{2i} = B_{23} = B_2$ и перепады температуры одинаковы, т. е.

$\Theta_{2i} = \Theta_{23} = \Theta_2$ и $\frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} = \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1}$. Тогда выражение (19)

примет вид:

$$\frac{W_{2i}}{W_{23}} = \frac{n_{2i}}{n_{23}} \cdot \frac{\gamma_{2i}}{\gamma_{23}}, \text{ с учетом, что } \frac{n_{2i}}{n_{23}} = \frac{\gamma_{23}}{\gamma_{2i}}. \quad (20)$$

Можно принять $\frac{W_{2i}}{W_{23}} = 1$, т. е. $W_{2i} = W_{23} = \text{const}$ с по-

грешностью не более 1–2 % для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) при одном и том же режиме работы и перепаде температуры ΔT .

4.4. Модель относительного холодильного коэффициента КТЭУ. Холодильный коэффициент E двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде:

$$E = \frac{Q_0}{W_1 + W_2}. \quad (21)$$

Тогда отношение холодильных коэффициентов i -го варианта сочетания E_i к традиционному E_3 можно представить в виде:

$$\frac{E_i}{E_3} = \frac{Q_{0i}(W_{13} + W_{23})}{(W_{1i} + W_{2i})Q_{03}}. \quad (22)$$

При условии равенства тепловой нагрузки $Q_{0i} = Q_{03} = Q_0$, одного и того же режима работы $B_{1i} = B_{13} = B_1$ и $B_{2i} = B_{23} = B_2$, и при равенстве перепадов температуры, $\Theta_{1i} = \Theta_{13} = \Theta_1$; $\Theta_{2i} = \Theta_{23} = \Theta_2$, с учетом $W_{1i} = W_{13}$ и $W_{2i} = W_{23}$. Тогда выражение (22) примет вид:

$$\frac{E_i}{E_3} = 1, \text{ т. е. } E_i = E_3 = \text{const}.$$

Таким образом, холодильный коэффициент E двухкаскадного ТЭУ не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1–5), а зависит от режима работы B и перепада температуры ΔT .

Тогда, используя выражения (13) и (14) суммарную интенсивность отказов λ_{Σ} КТЭУ можно представить в виде:

$$\lambda_{\Sigma i} = \lambda_{1i} + \lambda_{2i} = \lambda_{13} \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}} + \lambda_{23} \frac{\gamma_{23}}{\gamma_{2i}} = \lambda_{13} \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}} \left[1 + \frac{\lambda_{23} \gamma_{23} \gamma_{1i}}{\lambda_{13} \gamma_{13} \gamma_{2i}} \right]. \quad (23)$$

Таким образом, получены простые функциональные зависимости, связывающие следующие величины КТЭУ: количество термоэлементов в каскадах n_1 и n_2 , термоэлектрическая мощность охлаждения в каскадах γ_1 и γ_2 , интенсивность отказов λ_1 и λ_2 , мощность потребления W_1 и W_2 и холодильный коэффициент E_1 и E_2 для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) по сравнению с традиционным (3).

Полученные соотношения справедливы для любого режима работы B , перепада температуры ΔT , тепловой нагрузке Q_0 .

5. Обсуждение результатов сравнительного анализа

Сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности будем приводить в относительных величинах для любых вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) в сравнении с вариантом (3).

С ростом перепада температуры ΔT :

- функциональная зависимость относительной величины максимальной термоэлектрической мощности охлаждения

$\frac{\gamma_{15} - \gamma_{13}}{\gamma_{13}} \%$ первого каскада имеет экстремум (максимум в точке $\Delta T = 75$ К) (рис. 1, п. 1) и не зависит от режима работы;

- относительная величина максимальной термоэлектрической мощности охлаждения второго каскада уменьшается (рис. 1, п. 2) и не зависит от режима работы;

- функциональная зависимость относительной величины количества термоэлементов $\frac{n_{13} - n_{15}}{n_{13}} \%$ в первом каскаде имеет экстремум (максимум при $\Delta T = 75$ К) (рис. 2, п. 1) и не зависит от режима работы;

- функциональная зависимость относительной величины

$\frac{\Delta n}{n} = \frac{(n_2/n_1)_3 - (n_2/n_1)_5}{(n_2/n_1)_3} \%$ отношения количества термоэлементов в смежных каскадах от перепада температуры ΔT имеет экстремум (минимум при $\Delta T = 75$ К) (рис. 3) и практически не зависит от режима работы;

- относительная величина суммарного количества термоэлементов $\frac{\Delta n}{n_{\Sigma}} = \frac{(n_1 + n_2)_3 - (n_1 + n_2)_5}{(n_1 + n_2)_3} \%$ уменьшается (рис. 4) и практически не зависит от режима работы;

относительная величина рабочего тока $\frac{I_5 - I_3}{I_3} \%$ уменьшается (рис. 5) и практически не зависит от режима работы;

относительная величина интенсивности отказов $\frac{\lambda_3 - \lambda_5}{\lambda_3} \%$ увеличивается (рис. 6) для различных режимов работы.

относительная величина рабочего тока $\frac{I_5 - I_3}{I_3} \%$ уменьшается (рис. 5) и практически не зависит от режима работы;

относительная величина интенсивности отказов $\frac{\lambda_3 - \lambda_5}{\lambda_3} \%$ увеличивается (рис. 6) для различных режимов работы.

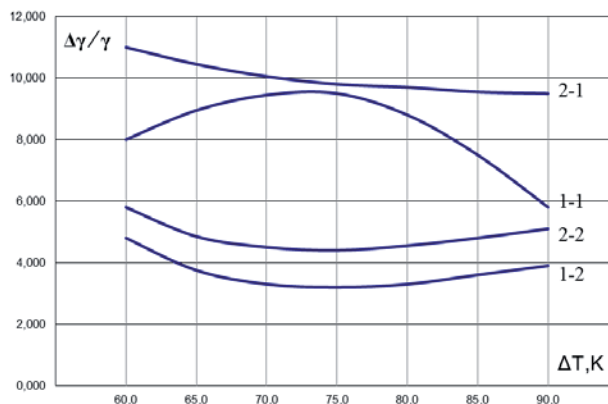


Рис. 1. Зависимость относительной величины термоэлектрической

мощности охлаждения первого каскада $\frac{\Delta \gamma_1}{\gamma_1} = \frac{\gamma_{15} - \gamma_{13}}{\gamma_{13}} 100 \%$

и второго каскада $\frac{\Delta \gamma_2}{\gamma_2} = \frac{\gamma_{25} - \gamma_{23}}{\gamma_{23}} 100 \%$ двухкаскадного ТЭУ

от общего перепада температуры ΔT для различных режимов работы от Q_{0max} до λ_{min} при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт; $(I/s)_1 = (I/s)_2 = 10$.

1-1 — $\frac{\gamma_{15} - \gamma_{13}}{\gamma_{13}} \%$; 1-2 — $\frac{\gamma_{14} - \gamma_{13}}{\gamma_{13}} \%$; 2-1 — $\frac{\gamma_{25} - \gamma_{23}}{\gamma_{23}} \%$;

2-2 — $\frac{\gamma_{24} - \gamma_{23}}{\gamma_{23}} \%$

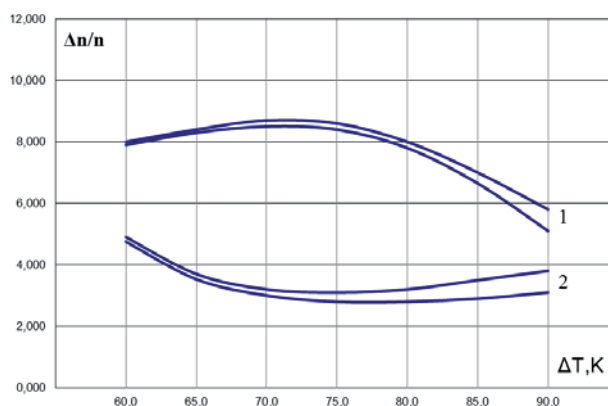


Рис. 2. Зависимость относительной величины $\Delta n = \frac{n_{13} - n_{14}}{n_{13}} 100 \%$

в первом каскаде от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт; $(I/s)_1 = (I/s)_2 = 10$ для различных режимов

работы от Q_{0max} до λ_{min} . 1 — $\frac{n_{13} - n_{15}}{n_{13}} \%$; 2 — $\frac{n_{13} - n_{14}}{n_{13}} \%$

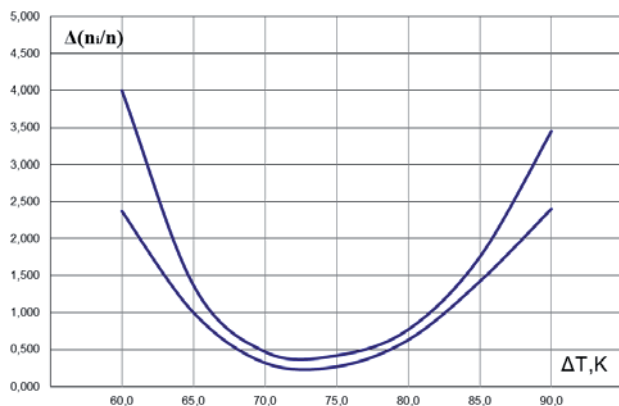


Рис. 3. Зависимость относительной величины

$\Delta\left(\frac{n_1}{n}\right) = \frac{(n_2/n_1)_3 - (n_2/n_1)_5}{(n_2/n_1)_3}$ от общего перепада температуры ΔT для различных режимов работы двухкаскадного ТЭУ при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт; $(I/s)_1 = (I/s)_2 = 10$

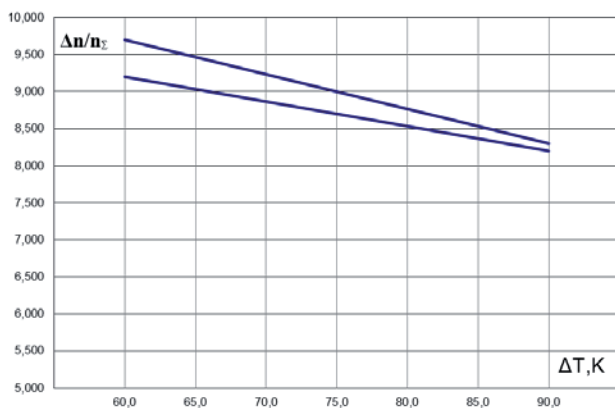


Рис. 4. Зависимость относительной величины суммарного

количества термоэлементов $\Delta_{\Sigma}\left(\frac{n_1}{n}\right) = \frac{(n_1 + n_2)_3 - (n_1 + n_2)_5}{(n_1 + n_2)_3} 100\%$ двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных режимов работы от $Q_{0\max}$ до λ_{\min} при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт; $(I/s)_1 = (I/s)_2 = 10$

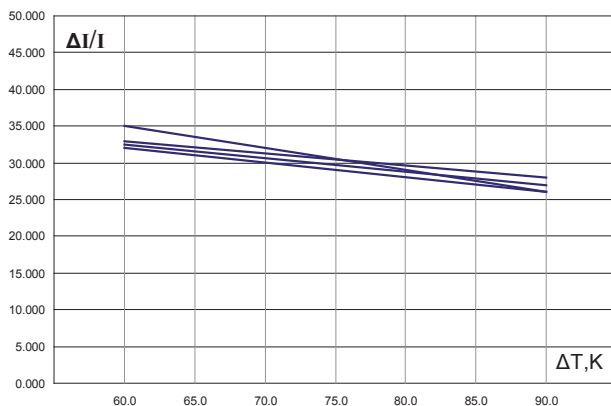


Рис. 5. Зависимость относительной величины рабочего

тока $\frac{\Delta I}{I} = \frac{I_5 - I_3}{I_3} 100\%$ двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных режимов работы от $Q_{0\max}$ до λ_{\min} при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт; $(I/s)_1 = (I/s)_2 = 10$

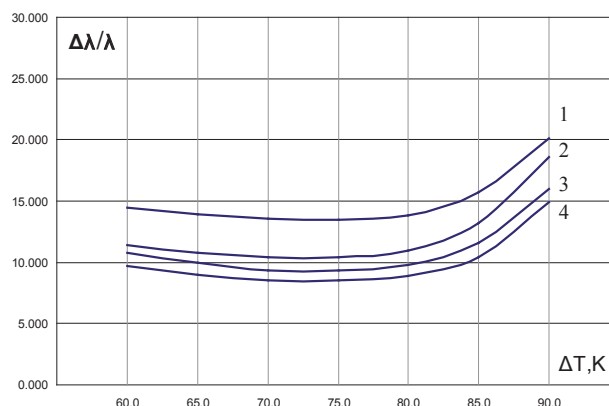


Рис. 6. Зависимость относительной величины интенсивности

отказов $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_3 - \lambda_5}{\lambda_3} 100\%$ двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных режимов работы при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт; $(I/s)_1 = (I/s)_2 = 10$. 1 — режим $Q_{0\max}$; 2 — режим $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$; 3 — режим $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$; 4 — режим λ_{\min}

Таким образом, использование варианта сочетания параметров исходного материала (5) по сравнению с (3) в двухкаскадном ТЭУ позволяет:

- увеличить термоэлектрическую мощность охлаждения первого каскада на 6–8 %, второго каскада на 9,5–11 % (рис. 1, п. 1, 2);
- уменьшить количество термоэлементов в первом каскаде, либо увеличить холодопроизводительность на 5–8 % (рис. 2, п. 1);
- отношение количества термоэлементов в смежных каскадах практически не изменяется (в пределах 0,5–4 %) (рис. 3);
- суммарное количество термоэлементов уменьшить на 8–10 % (рис. 4);
- увеличить рабочий ток на 25–35 % (рис. 5);
- уменьшить интенсивность отказов λ на 15–20 % для режима $Q_{0\max}$ (рис. 6, п. 1), на 10–15 % для режима λ_{\min} (рис. 6, п. 4).

6. Выводы

Сравнительный анализ результатов расчетов основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ, собранных из различных исходных материалов (1–5) показал возможность уменьшения интенсивности отказов λ для варианта сочетания (5) по сравнению с вариантом сочетания (3) на 10–20 % в зависимости от режима работы и перепада температуры ΔT при одинаковой эффективности исходных материалов.

Использование вариантов сочетаний (1) и (2) исходных материалов нецелесообразно, так как приводит к увеличению интенсивности отказов по сравнению с вариантом (3).

По результатам сравнительного анализа основных параметров и показателей надежности для различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов получены простые аналитические зависимости, позволяющие найти ряд простых закономерностей, используемых при построении двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности.

Применение принципа суперпозиции при построении двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности за счет совмещения конструктивных и параметрических методов позволяет дополнительно уменьшить интенсивность отказов на 10–13 %, а, следовательно, увеличить вероятность безотказной работы.

Литература

1. Sootsman, J. R. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials [Text] / J. R. Sootsman, D. Y. Chung, M. G. Kanatzidis // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2009. — Vol. 48, № 46. — P. 8616–8639. doi:10.1002/anie.200900598
2. Шевелев, А. В. Наноструктурированные термоэлектрические материалы [Текст] / А. В. Шевелев. — М.: Научно-образовательный центр по нанотехнологиям МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010. — 58 с.
3. Кожемякин, Г. Н. Наноструктурированные теллуриды висмута и сурьмы для термоэлектрического теплового насоса [Текст] / Г. Н. Кожемякин, С. Я. Скипидаров, Ю. М. Крутов, А. Н. Парашенко, О. Н. Иванов, О. Н. Сохлакова // *Термоэлектричество*. — 2014. — № 1. — С. 37–47.
4. Brown, S. R. Yb₁₄MnSb₁₁: New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation [Text] / S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin, G. J. Snyder // *Chemistry of Materials*. — 2006. — Vol. 18, № 7. — P. 1873–1877. doi:10.1021/cm060261t
5. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability [Text] / A. A. Wereszczak, H. Wang // *Vehicle Technologies Annual Merit Reviewand Peer Evaluation Meeting*. — Arlington, 11 May 2011. — P. 18.
6. Iversen, B. B. Why are Clathrates Good Candidates for Thermoelectric Materials? [Text] / B. B. Iversen, A. E. C. Palmqvist, D. E. Cox, G. S. Nolas, G. D. Stucky, N. P. Blake, H. Metiu // *Journal of Solid State Chemistry*. — 2000. — Vol. 149, № 2. — P. 455–458. doi:10.1006/jssc.1999.8534
7. Нестеров, С. Б. Оценка возможности увеличения термоэлектрической добротности наноструктурированных полупроводниковых материалов для холодильной техники [Текст] / С. Б. Нестеров, А. И. Холопкин // *Холодильная техника*. — 2014. — № 5. — С. 40–43.
8. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxy [Text] / R. Singh. — Santa Cruz: University of California, 2008. — 158 p.
9. Громов, Г. Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули [Текст] / Г. Громов // *Компоненты и технологии*. — 2014. — № 9. — С. 38–43.
10. Riffat, S. B. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review [Text] / S. B. Riffat, X. Ma // *International Journal of Energy Research*. — 2004. — Vol. 28, № 9. — P. 753–768. doi:10.1002/er.991

11. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques [Text] / A. L. Jurgensmeyer. — Colorado State University, 2011. — 59 p.
12. Зайков, В. П. Влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 1: Однокаскадные ТЭУ [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская, Ю. И. Журавлев // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. — 2015. — № 1. — С. 44–48.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ДВОКАСКАДНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИСТРОЇВ

Наведено порівняльний аналіз основних параметрів і показників надійності двокаскадних термоелектричних пристроїв (ТЕП) при використанні різних варіантів сполучення параметрів первинних матеріалів, що відрізняються коефіцієнтами термоЕДС ϵ і електропровідності σ , для перепадів температури ΔT від $\Delta T = 60$ К до $\Delta T = 90$ К, і режимів роботи від Q_{0max} до λ_{min} , і показана можливість зменшення сумарної інтенсивності відмов двокаскадних ТЕП.

Ключові слова: надійність, термоелектричні пристрої, матеріали, температура, інтенсивність відмов.

Зайков Володимир Петрович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник сектора, Научно-дослідницький інститут «Шторм», Одеса, Україна, e-mail: gradan@i.ua.
Мещеряков Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики, Одеський державний екологічний університет, Україна, e-mail: gradan@ua.fm.
Журавлев Юрій Іванович, аспірант, кафедра інформатики, Одеський державний екологічний університет, Україна, e-mail: zhuravlov.y@ua.ru.

Зайков Володимир Петрович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник сектору, Науково-дослідницький інститут «Шторм», Одеса, Україна.
Мещеряков Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики, Одеський державний екологічний університет, Україна.
Журавлев Юрій Іванович, аспірант, кафедра інформатики, Одеський державний екологічний університет, Україна.

Zaikov Vladimir, Research Institute «Storm», Odessa, Ukraine, e-mail: gradan@i.ua.
Mescheryakov Vladimir, Odessa State Environmental University, Ukraine, e-mail: gradan@ua.fm.
Zhuravlov Yuri, Odessa State Environmental University, Ukraine, e-mail: zhuravlov.y@ua.ru