

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ¹, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ², Ю. И. ЖУРАВЛЕВ³

Украина, г. Одесса, ¹НИИ «Шторм», ²Одесский государственный экологический университет,

³Одесская национальная морская академия

E-mail: gradan@ua.fm

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ. ЧАСТЬ 2: ДВУХКАСКАДНЫЕ ТЭУ

В продолжение исследований однокаскадных термоэлектрических устройств (ТЭУ) рассмотрено влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов модулей на показатели надежности двухкаскадных ТЭУ. Показано, что с ее ростом уменьшается интенсивность отказов и увеличивается вероятность безотказной работы двухкаскадного ТЭУ для различных значений перепада температуры (от 60 до 90 К) и условий функционирования.

Ключевые слова: термоэлектрические устройства, надежность, интенсивность отказов, эффективность, температура, рабочий ток.

Базовым требованием к любым радиотехническим системам с теплонагруженными элементами является обеспечение повышенного уровня их надежности, которое связано с надежностью входящих в состав таких систем охлаждающих устройств. В настоящее время в радиоэлектронике, квантовой оптике, СВЧ-технике, информационных системах и др. широко применяются термоэлектрические устройства (ТЭУ). Они отличаются высокой надежностью, малыми габаритами, простотой управления и быстродействием, а проблема расширения температурного диапазона эксплуатации элементов и составных частей радиоэлектронной аппаратуры может быть решена применением каскадных термоэлектрических охлаждающих устройств [1].

Одним из основных способов повышения показателей надежности при проектировании термоэлектрического устройства является конструктивный, основанный на выборе режима его работы в зависимости от условий функционирования [2–5]. В то же время, как было показано в [6] для однокаскадных устройств, надежность ТЭУ можно повышать параметрическими методами, основанными на улучшении качества исходных термоэлектрических материалов, в первую очередь — на повышении их эффективности.

Целью настоящей работы является анализ влияния термоэлектрической эффективности исходных материалов Z_M на такие показатели надежности двухкаскадных термоэлектрических устройств, как интенсивность отказов λ_Σ и вероятность их безотказной работы P для различных значений перепада температуры (от 60 до 90 К) и условий функционирования.

Для определения основных параметров и показателей надежности каскадных ТЭУ воспользуемся моделью взаимосвязи их показателей надежности и основных значимых параметров [2].

Относительную величину интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде

$$\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_0} = \sum_{i=1}^2 \frac{n_i B_i^2 (\theta_i + C_i) \left(B_i + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \theta_i \right)^2} K_{T_i}, \quad (1)$$

где λ_0 — номинальная интенсивность отказов, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч;

i — номер каскада (далее i в обозначении означает принадлежность параметра к соответствующему каскаду);

n_i — количество термоэлементов;

B_i — относительный рабочий ток, $B_i = I / I_{\max i}$;

θ_i — относительный перепад температуры, $\theta_i = \Delta T_i / \Delta T_{\max i}$;

C_i — относительная тепловая нагрузка, $C_1 = Q_0 / (n_1 I_{\max 1}^2 R_1)$, $C_2 = (Q_0 + W_1) / (n_2 I_{\max 2}^2 R_2)$;

T_0 — температура теплопоглощающего (холодного) спая первого каскада (К);

T — температура тепловыделяющего (горячего) спая второго каскада (К);

T_1 — промежуточная температура (К);

ΔT_i — перепад температуры (К), $\Delta T_1 = T_1 - T_0$, $\Delta T_2 = T - T_1$;

$\Delta T_{\max i}$ — максимальный перепад температуры (К), $\Delta T_{\max i} = 0,5 Z_i T_{i-1}^2$;

$I_{\max i}$ — максимальный рабочий ток (А), $I_{\max i} = e_i T_0 / R_i$;

I — рабочий ток (А);

e_i, R_i, Z_i — соответственно, коэффициент термоэдс (В/К), электрическое сопротивление (Ом) и усредненная термоэлектрическая эффективность материала (1/К) ветви термоэлемента;

Q_0 — тепловая нагрузка (Вт);

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

K_{T_i} — коэффициент значимости, учитывающий влияние пониженных температур [2];

W_1 — мощность потребления первого каскада (Вт),

$$W_1 = 2n_1 I_{\max 1}^2 R_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \theta_1 \right). \quad (2)$$

Вероятность безотказной работы N -каскадного ТЭУ можно представить в следующем виде:

$$P = \exp \left(- \sum_{i=1}^N \lambda_i t \right), \quad (3)$$

где t — назначенный ресурс, $t=10^4$ ч.

Отношение количества термоэлементов в смежных каскадах можно представить в виде

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{I_{\max 1}^2 R_1}{I_{\max 2}^2 R_2} \frac{2B_1 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \theta_1 \right) + B_1^2 - \theta_1}{2B_2 - B_2^2 - \theta_2}. \quad (4)$$

Холодопроизводительность каскадного ТЭУ определяется первым каскадом и может быть представлена в виде

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \theta_1). \quad (5)$$

Холодильный коэффициент двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде

$$E = Q_0 / (W_1 + W_2), \quad (6)$$

где W_2 — мощность потребления второго каскада,

$$W_2 = 2n_2 I_{\max 2}^2 R_2 B_2 \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \theta_2 \right). \quad (7)$$

В таблице приведены результаты расчетов основных значимых параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при различных значениях термоэлектрической эффективности материала модуля Z_M , общего температурного

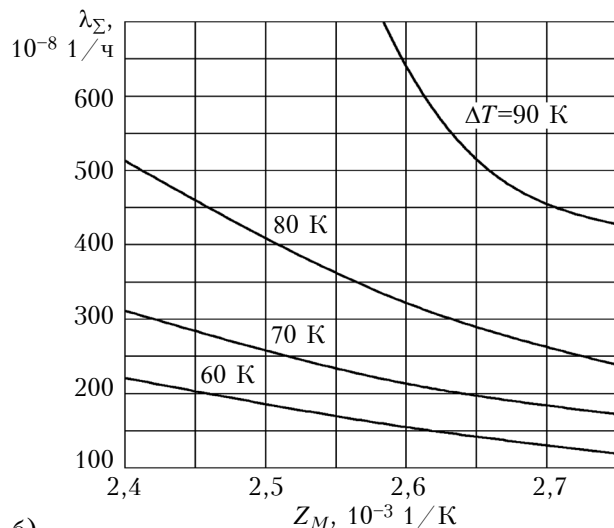
Основные значимые параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ в режимах $Q_{0\max}$ и $\lambda_{\min}$ для различных значений Z_M , T_1 и ΔT при $Q_0 = 2,0$ Вт; $T = 300$ К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч; $l/S = 10$ см⁻¹

Z_M , 10 ⁻³ 1/К	Режим	B_1	B_2	Θ_1	Θ_2	n_1	n_2	n_2 / n_1	E	I , А	λ_{Σ} , 10 ⁻⁸ 1/ч	P
$\Delta T=60$ К; $T_1=267$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,96	0,42	0,39	17,0	62,4	3,66	0,049	4,6	221,0	0,9780
	$\lambda_{\min}$	0,34	0,325	0,42	0,39	68,5	159,6	2,33	0,120	1,57	7,3	0,9993
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,95	0,38	0,36	12,4	44,8	3,61	0,053	5,7	155,0	0,9847
	$\lambda_{\min}$	0,30	0,29	0,38	0,36	59,2	138,5	2,34	0,140	1,71	3,2	0,9997
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,93	0,36	0,34	11,0	37,0	3,36	0,059	6,2	119,6	0,9881
	$\lambda_{\min}$	0,28	0,26	0,36	0,34	57,3	136,1	2,38	0,148	1,72	2,25	0,9998
$\Delta T=70$ К; $T_1=262$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,95	0,55	0,47	23,9	93,5	3,92	0,0345	4,5	311,6	0,9693
	$\lambda_{\min}$	0,46	0,44	0,55	0,47	67,8	168,2	2,48	0,710	2,1	26,5	0,9974
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,946	0,50	0,43	17,2	64,0	3,71	0,040	5,5	213,5	0,9789
	$\lambda_{\min}$	0,41	0,39	0,50	0,43	56,5	133,2	2,35	0,0872	2,25	13,0	0,9987
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,956	0,465	0,40	13,6	50,2	3,69	0,044	6,2	172,4	0,983
	$\lambda_{\min}$	0,38	0,36	0,465	0,40	48,4	108,8	2,25	0,105	2,35	7,75	0,9992
$\Delta T=80$ К; $T_1=256$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,92	0,70	0,57	39,9	172,8	4,33	0,020	4,4	513,1	0,9500
	$\lambda_{\min}$	0,62	0,57	0,70	0,57	77,0	247,0	3,20	0,032	2,74	116,0	0,9885
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,92	0,64	0,52	26,2	106,7	4,07	0,0262	5,35	322,1	0,9683
	$\lambda_{\min}$	0,56	0,51	0,64	0,52	56,9	165,6	2,91	0,0457	3,0	51,7	0,9948
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,91	0,59	0,49	20,8	80,5	3,87	0,0314	5,7	238,6	0,9764
	$\lambda_{\min}$	0,50	0,45	0,59	0,49	53,3	150,3	2,82	0,0554	2,9	28,7	0,9971
$\Delta T=90$ К; $T_1=250$ К												
2,40	$Q_{0\max}$	1,00	0,92	0,89	0,68	122,7	644,5	5,25	0,0065	4,25	1841,4	0,8320
	$\lambda_{\min}$	0,83	0,76	0,89	0,68	166,5	744,2	4,47	0,007	3,53	1058,0	0,8996
2,60	$Q_{0\max}$	1,00	0,88	0,79	0,64	51,5	248,6	4,83	0,0128	5,0	640,4	0,9380
	$\lambda_{\min}$	0,71	0,62	0,79	0,64	85,8	365,1	4,25	0,016	3,6	245,4	0,9758
2,75	$Q_{0\max}$	1,00	0,90	0,73	0,59	34,1	153,5	4,50	0,0177	5,57	427,6	0,9580
	$\lambda_{\min}$	0,64	0,58	0,73	0,59	64,7	230,8	3,57	0,0251	3,57	116,4	0,9885

перепада на ТЭУ ($\Delta T = T - T_0$) и промежуточной температуры T_1 для указанных исходных данных (l/S — отношение длины термоэлемента к площади его сечения). Исследования проводились для двух экстремальных токовых режимов — максимальной холодопроизводительности ($Q_{\max}$) и минимальной интенсивности отказов ($\lambda_{\min}$), которые максимально отличаются величиной λ_{Σ} . При проведении расчетов считалось, что в обоих каскадах используются термоэлектрические материалы с одной и той же эффективностью, а диапазон ее изменения ограничивался максимально возможным на данный момент значением $2,75 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$.

Анализ расчетных данных показал, что при фиксированных значениях ΔT в диапазоне от 60 до 90 К увеличение термоэлектрической эффективности в интервале $(2,4 - 2,75) \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$

а)



б)

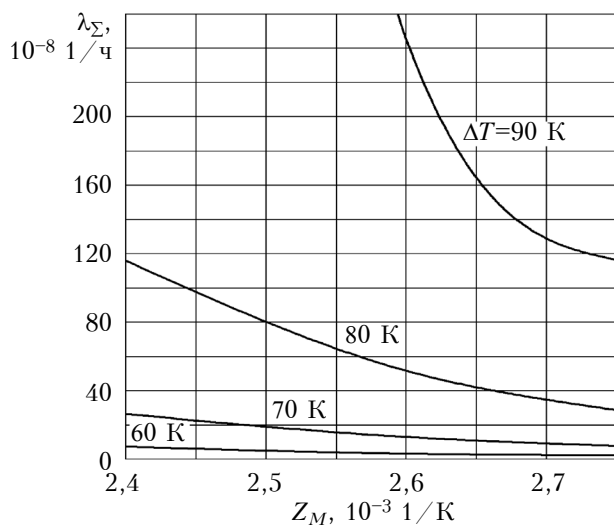
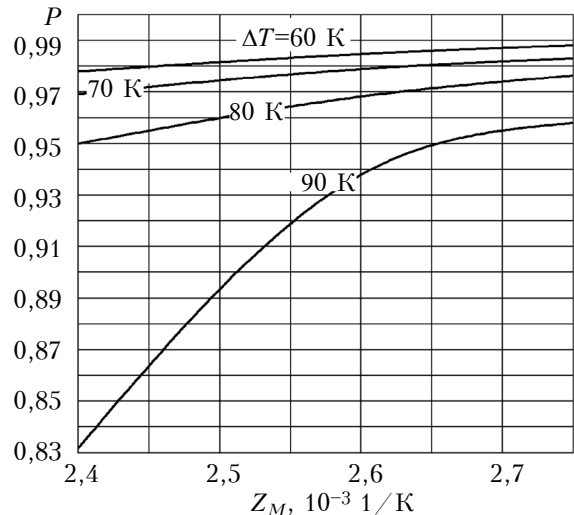


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ от усредненного значения термоэлектрической эффективности материала модулей в режимах $Q_{0\max}$ (а) и $\lambda_{\min}$ (б) для различных значений ΔT при $T=300 \text{ K}$ и $Q_0=2,0 \text{ Вт}$

при $T=300 \text{ K}$ приводит к тому, что параметры каскадов и ТЭУ в целом изменяются следующим образом:

- увеличивается максимальный перепад температуры: $\Delta T_{\max 1}$ на 18–23%; $\Delta T_{\max 2}$ на 16%;
- уменьшается относительный перепад температуры: θ_1 на 14–18%; θ_2 на 14%;
- уменьшается относительный рабочий ток: в режиме $Q_{0\max}$ B_2 на 1–3% ($B_1=1,0=\text{const}$); в режиме $\lambda_{\min}$ B_1 на 17–23%, B_2 на 18–23%;
- увеличивается холодильный коэффициент E : в режиме $Q_{0\max}$ на 20–30%; в режиме $\lambda_{\min}$ на 40–60%;
- уменьшается интенсивность отказов λ_{Σ} : в режиме $Q_{0\max}$ на 45–77%; в режиме $\lambda_{\min}$ на 70–90% (рис. 1);
- увеличивается вероятность безотказной работы P (рис. 2).

а)



б)

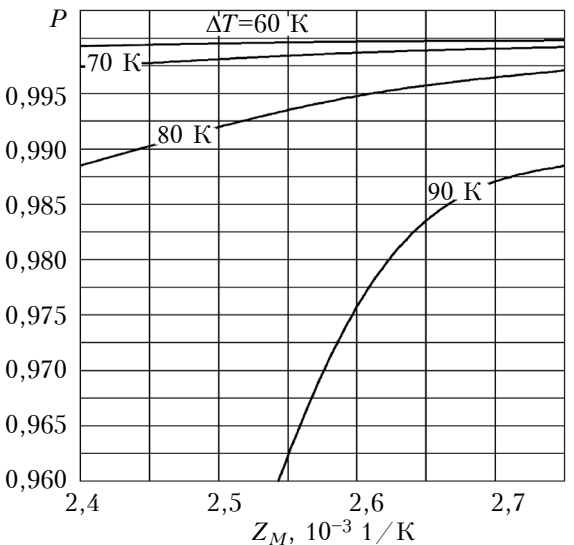


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы двухкаскадного ТЭУ от усредненного значения термоэлектрической эффективности модулей в режимах $Q_{0\max}$ (а) и $\lambda_{\min}$ (б) для различных значений ΔT при $T=300 \text{ K}$; $Q_0=2,0 \text{ Вт}$; $t=10^4 \text{ ч}$

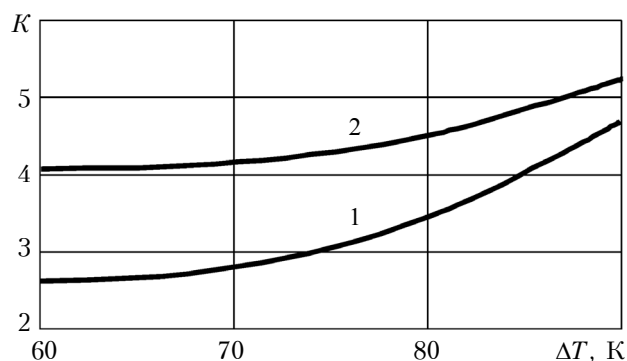


Рис. 3. Зависимость коэффициента $K = \frac{\Delta\lambda_R/\lambda_R}{\Delta Z/Z}$ от общего перепада температуры на двухкаскадном ТЭУ в режимах $Q_{0\max}$ (1) и $\lambda_{\min}$ (2) при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $l/S=10$ см⁻¹

С ростом общего перепада температуры ΔT при заданном значении термоэлектрической эффективности материала модулей величина относительного перепада температуры в каскадах (θ_1 и θ_2) увеличивается, а максимального перепада ($\Delta T_{\max 1}$ и $\Delta T_{\max 2}$) — уменьшается. При увеличении ΔT от 60 до 90 К параметры двухкаскадного ТЭУ с $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К, например, изменяются следующим образом:

- увеличивается количество термоэлементов в каскадах: для режима $Q_{0\max}$ n_1 в 7,2 раза, n_2 в 10,3 раза; для режима $\lambda_{\min}$, соответственно, в 2,4 и в 4,7 раза;

- увеличивается отношение количества термоэлементов в смежных каскадах n_2/n_1 : на 43% для режима $Q_{0\max}$ и на 20% для режима $\lambda_{\min}$;

- уменьшается холодильный коэффициент E : на 7,5% $Q_{0\max}$ и в 17 раз для режима $\lambda_{\min}$;

- увеличивается интенсивность отказов ТЭУ λ_Σ : для режима $Q_{0\max}$ в 8,3 раза и в 144 раза для режима $\lambda_{\min}$.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента K , отражающего взаимосвязь относительных изменений интенсивности отказов и термоэлектрической эффективности материала:

$$K = \frac{\Delta\lambda_R/\lambda_R}{\Delta Z/Z},$$

от общего перепада температуры. Кривые получены для экстремальных режимов $Q_{0\max}$ и $\lambda_{\min}$ и ограничивают область, в которой расположены данные, соответствующие промежуточным токовым режимам.

Анализ приведенных на рис. 3 данных показывает, что рост термоэлектрической эффективности исходных материалов в модуле позволяет снизить интенсивность отказов ТЭУ: увеличение Z_M на 1% приводит к уменьшению λ_Σ на 2,7–4,5% в режиме $Q_{0\max}$ и на 4,1–5,2% в

режиме $\lambda_{\min}$ при увеличении ΔT от 60 до 90 К. В то же время, значение коэффициента K практически не зависит от тепловой нагрузки Q_0 , т. е. относительное изменение интенсивности отказов $\Delta\lambda_\Sigma/\lambda_\Sigma$, приходящееся на один процент роста эффективности материала, одинаково для различных значений Q_0 при заданном перепаде температуры ΔT .

Следует отметить, что с ростом Q_0 пропорционально увеличивается количество термоэлементов в обоих каскадах, а следовательно, увеличивается абсолютная величина интенсивности отказов в каскадах и уменьшается вероятность безотказной работы ТЭУ.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования указывают на то, что надежность каскадных ТЭУ можно повышать параметрическим способом — увеличение эффективности термоэлектрических материалов модулей при фиксированном перепаде температуры приводит к снижению интенсивности отказов λ_Σ и увеличению вероятности их безотказной работы P в заданном режиме. Если же кроме этого выбирать режим $\lambda_{\min}$, можно дополнительно уменьшить интенсивность отказов, в некоторых случаях — на 50%.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коленко Е. А., Стыльбанс Л. С. Термоэлектрические холодильники // Полупроводники в науке и технике. Т. 2. — Изд-во АН СССР, 1958. — С. 217–298.
2. Зайков В. П., Киншова Л. А., Казанжи Л. Д., Храмова Л. Ф. Прогнозирование показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства в режиме $Q_{0\max}$ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 5. — С. 34–37.
3. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009.
4. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А. Прогнозирование показателей надежности информационных систем с термоэлектрическими устройствами // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладные информационные технологии. — 2011. — Т. 2, № 10(50). — С. 37–43.
5. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А. Обеспечение наименьшей интенсивности отказов термоэлектрического устройства заданной конструкции // Вестник НТУ «ХТУ». Тем. вып. «Новые решения в современных технологиях». — Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. — № 23. — С. 78–86.
6. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А., Журавлев Ю. И. Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 1: Однокаскадные ТЭУ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 1. — С. 44–48. DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.44

Дата поступления рукописи
в редакцию 26.01 2015 г.

В. П. ЗАЙКОВ¹, В. И. МЕЩЕРЯКОВ²,
Ю. И. ЖУРАВЛЬОВ³

Україна, м. Одеса, ¹НДІ «Шторм»,

²Одеський державний екологічний університет, ³Одеська національна морська академія

E-mail: gradan@ua.fm

ВПЛИВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРВИННИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОХОЛОДЖУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ. ЧАСТИНА 2: ДВОКАСКАДНІ ТЕП

У продовження досліджень однокаскадних термоелектричних пристроїв (ТЕП) розглянуто вплив термоелектричної ефективності вихідних матеріалів модулів на показники надійності двокаскадних ТЕП. Показано, що з її ростом зменшується інтенсивність відмов і збільшується ймовірність безвідмовної роботи двокаскадного ТЕП для різних значень перепаду температури (від 60 до 90 К) і умов функціонування.

Ключові слова: термоелектричні пристрої, надійність, інтенсивність відмов, ефективність, температура, робочий струм.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.34
UDC 621.362.192

V. P. ZAYKOV¹, V. I. MESHCHERYAKOV²,
Yu. I. ZHURAVLEV³

Odessa, Ukraine, ¹Research Institute «Storm»,

²Odessa State Environmental University,

³Odessa National Maritime Academy

E-mail: gradan@ua.fm

INFLUENCE OF THE EFFECTIVENESS OF RAW MATERIALS ON THE RELIABILITY OF THERMOELECTRIC COOLING DEVICES. PART 2: TWO-STAGE THERMOELECTRIC DEVICES

Extended operation temperature range of elements and electronic equipment components using thermoelectric devices necessitates the use of cascade thermoelectric cooling devices. One of the best ways to improve the reliability of thermoelectric coolers is to improve the efficiency of thermoelectric materials.

The article presents the research results on the influence of thermoelectric efficiency of initial materials on the failure rate and probability of failure of the two-stage thermoelectric cooler within temperature range of 60 to 90 K for maximum cooling operation modes and low failure rate.

The results have shown that with the increase in the thermoelectric efficiency of the material thermocouples the maximum temperature difference in cascades increases, the working current and the ratio of the elements number in the adjoining cascades decreases (depending on the current mode in cascades of thermoelectric device from the mode of the maximum cooling capacity up to the minimum failure rate), the cooling coefficient increases, the failure rate reduces and the probability of failure-free operation of two-stage thermoelectric cooler increases.

Thus, it is shown that the increase in the thermoelectric efficiency of initial materials can significantly reduce the failure rate and increase the probability of failure-free operation of the two-stage thermoelectric devices depending on temperature difference and the current mode of operation.

Keywords: thermoelectric device, reliability, failure rate, efficiency, temperature, operating current.

REFERENCES

1. Kolenko E.A., Stil'bans L.S. [Thermoelectric coolers]. In book *Poluprovodniki v nauke i tekhnike*, vol. 2. Publ. Academy of Sciences of the USSR, 1958, pp. 217-298. (Rus)
2. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Kazanzhi L.D., Khranova L.F. Forecasting of parameters of reliability two-cascade thermoelectrical cooling device in a mode Q_{0max} . *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2009, no 5, pp. 34-37. (Rus)
3. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognostirovaniye pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Forecasting performance reliability of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single stage device]. Odessa, Politehperiodika, 2009, 118 p. (Rus)
4. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A. Forecasting of reliability indicators of information systems with thermoelectric devices. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, vol 2, no 10(50), pp. 45-47. (Rus)
5. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A. [Providing the lowest failure rate of the thermoelectric device specified design]. *Vestnik NTU «KhTU». Thematic iss. «Novye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh»*, Kharrov, 2011, no 23, pp. 78-86. (Rus)
6. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A., Zhuravlev Yu. I. Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part I: Single-stage TEDs. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2015, no 1, pp. 47-51. DOI: 10.15222/TKEA2015.1.44 (Rus)