

Зайков В.П.¹, канд. техн. наук.,
Мещеряков В.И.², доктор техн. наук.,
Гнатовская А.А.²,
Журавлёв Ю.И.³, канд. техн. наук.

¹Научно-исследовательский институт ШТОРМ,
ул. Терешковой, 27, Одесса, Украина, e-mail: grand@i.ua;

²Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, Одесса, Украина, e-mail: grand@ua.fm;

³Национальный университет «Одесская морская академия»,
ул. Дидрихсона, 8, Одесса, Украина, e-mail: zhuravlov.y@ua.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Проведен сравнительный анализ динамики функционирования однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства при вариации геометрии ветвей термоэлементов с учетом влияния конструктивных и технологических элементов для различных характерных токовых режимов работы, перепадов температуры и тепловой нагрузки. Показано, что с ростом отношения высоты к площади сечения ветви термоэлемента уменьшается время выхода на стационарный режим работы величины рабочего тока, увеличивается падение напряжения при постоянном энергопотреблении для различных режимов работы. С ростом перепада температуры увеличивается время выхода на стационарный режим работы для различных режимов работы. Библ. 12, табл. 2, рис. 13.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, геометрия ветвей термоэлементов, показатели надежности, время выхода на режим, перепад температур.

Введение

Термоэлектрические охладители относятся к наиболее быстродействующим устройствам обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры, что связано, в первую очередь, с принципом генерации тепла и холода [1], малыми габаритами и массой [2]. Важнейшим показателем термоэлектрических охладителей является эксплуатационная надежность, которая определяется интенсивностью отказов и вероятностью безотказной работы [3], и превышает показатели компрессионных охладителей в силу отсутствия подвижных компонентов [4]. Вместе с тем, постоянно ужесточающиеся требования к эксплуатационным показателям теплонагруженных элементов приводят к необходимости поиска путей повышения показателей надежности при воздействии негативных климатических [5] и механических [6] факторов, тепловой нагрузки [7]. Повышение требований по быстродействию, связано с ростом температурных градиентов [8], показателей надежности и не получило должного внимания при проектировании термоэлектрических охладителей. Анализ одного из аспектов этой проблемы, связанный с влиянием геометрии ветвей термоэлементов на динамику и показатели надежности

однокаскадных термоэлектрических охладителей, является актуальной задачей. Практическая значимость такого подхода обусловлена и тем фактом, что не требуется изменения технологии изготовления модулей, которая также влияет на показатели надежности [9].

Целью работы является анализ динамических характеристик и показателей надежности однокаскадного термоэлектрического охладителя в диапазоне унифицированной геометрии ветвей термоэлементов в различных токовых режимах работы от минимума интенсивности отказов до максимальной холодопроизводительности.

Модель связи времени выхода термоэлектрического охладителя на стационарный режим с конструктивными параметрами и энергетическими показателями

В работах [10, 11] рассмотрено влияние токовых режимов работы на основные параметры, показатели надежности и динамику функционирования термоэлектрического устройства (ТЭУ) с учетом конструктивных и технологических элементов (КТЭ) в диапазоне перепадов температуры от $\Delta T = 5$ К до $\Delta T = 60$ К и тепловой нагрузке от $Q_0 = 0.5$ Вт до $Q_0 = 20$ Вт при заданной геометрии ветвей термоэлементов $l/s = 10$. В то же время представляет интерес оценить влияние на динамику и показатели надежности унифицированный диапазон изменения геометрии ветвей термоэлементов от $l/s = 4.5$ до $l/s = 40$ (отношений высоты термоэлемента l к площади его поперечного сечения s). При этом следует учесть влияние конструктивно-технологических элементов для различных перепадов температуры и тепловой нагрузки для различных токовых режимов работы.

Для этой цели воспользуемся ранее полученными соотношениями [12]. Выражения для определения времени выхода на стационарный режим работы τ в зависимости от токового режима работы можно записать в виде:

$$\tau = \frac{\sum_i M_i C_i}{K_k \left(1 + 2B_K \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \right)} \cdot \ln \frac{\gamma \cdot B_H (2 - B_H)}{2B_K - B_K^2 - \theta}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{I_{\max H}^2 \cdot R_H}{I_{\max K}^2 \cdot R_K}$;

$\sum_i M_i C_i$ – сумма произведений теплоемкости на массу составляющих КТЭ при заданной геометрии ветвей термоэлементов, Дж/К;

$I_{\max H}, R_H$ – соответственно, максимальный рабочий ток, (А) и электрическое сопротивление (Ом) ветви термоэлемента в начале процесса охлаждения $\tau_H = 0$;

$I_{\max K}, R_K$ – соответственно, максимальный рабочий ток, (А) и электрическое сопротивление (Ом) ветви термоэлемента в конце процесса охлаждения τ_K ;

$B_H = \frac{I}{I_{\max H}}$ – относительный рабочий ток при $\tau_H = 0$;

$B_K = \frac{I}{I_{\max K}}$ – относительный рабочий ток при τ_K ;

$$I_{\max_H} = \frac{\bar{e}_H T}{R_H} - \text{максимальный рабочий ток при } \tau_H = 0;$$

$$I_{\max_K} = \frac{\bar{e}_K T_0}{R_K} - \text{максимальный рабочий ток при } \tau_K.$$

При равенстве токов в начале и в конце процесса охлаждения:

$$I = B_H I_{\max_H} = B_K I_{\max_K}.$$

\bar{e}_H, \bar{e}_K – усредненный коэффициент термоЭДС ветви термоэлемента в начале и конце процесса охлаждения;

T_0 – температура термопоглощающего спая в конце процесса охлаждения, (К) при τ_K ;

T – температура термопоглощающего спая в начале процесса охлаждения, (К) при $\tau_H = 0$;

$$\theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} - \text{относительный перепад температур};$$

$\Delta T = T - T_0$ – рабочий перепад температур ТЭУ, (К);

$\Delta T_{\max} = 0.5\bar{z} \cdot T_0^2$ – максимальный перепад температуры, (К);

\bar{z} – усредненное значение эффективности термоэлектрического материала в модуле, (К⁻¹);

$K_K = \bar{\chi}_K / l / S$ – коэффициент теплоотдачи, (Вт/К)

$\bar{\chi}_K$ – усредненное значение коэффициента теплопроводности, (Вт/см·К);

I – величина рабочего тока, (А).

Количество термоэлементов n можно определить из соотношения:

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max_K}^2 \cdot R_K (2B_K - B_K^2 - \theta)},$$

где Q_0 – величина тепловой загрузки, (Вт).

Мощность потребления W_K ТЭУ можно подсчитать по формуле:

$$W_K = 2n \cdot I_{\max_K}^2 \cdot R_K \cdot B_K \left(B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \theta \right),$$

падение напряжения $U_K = W_K / I$

и холодильный коэффициент $E = Q_0 / W_K$.

Интенсивность отказов λ / λ_0 в соответствии с [12] можно определить по формуле:

$$\lambda / \lambda_0 = n \cdot B_K^2 (\theta + C_K) \cdot \frac{\left(B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \theta \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \theta \right)^2} \cdot K_T,$$

где $C_K = Q_0 / I_{\max_K}^2 \cdot R_K \cdot n$ – относительная тепловая нагрузка;

K_{T_i} – значимый коэффициент понижения температуры.

Результаты расчетов основных параметров показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных l/s и токовых режимов работы при перепаде температуры $\Delta T = 40$ К и тепловой нагрузке $Q_0 = 1.0$ Вт при $T = 300$ К; $m_0 c_0 \rightarrow 0$ (отсутствие объекта охлаждения); $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ сек⁻¹ и $t = 10^{-4}$ сек приведены в табл. 1.

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показал, что с ростом отношения l/s для различных режимов работы:

– уменьшается величина $\sum_i m_i c_i$ КТЭ (рис. 1);

– уменьшается время выхода на стационарный режим работы τ (рис. 2) в среднем на 30 – 33%:

от $\tau = 7.8$ сек при $l/s = 4.5$ до $\tau = 5.2$ сек до $l/s = 40$ для режима $Q_{0_{\max}}$;

от $\tau = 9.2$ сек при $l/s = 4.5$ до $\tau = 6.3$ сек до $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I)_{\max}$;

Таблица 1

Результаты расчетов основных параметров времени выхода на стационарный режим и показателей надежности

Режим $Q_{0_{\max}} - \Delta T = 40K ; Q_0 = 1.0Wm ; \theta = 0.5$												
l/s	n , шт	I , А	W , Вт	U , В	E	τ , с	B_H	B_K	$\sum_i m_i c_i$	λ/λ_0	$\lambda, 10^{-8}$ сек ⁻¹	P
4.5	3.6	11.1		0.36		7.8			451.7	3.15	9.45	0.99906
10	7.8	5.0	4.0	0.91	0.25	6.50	0.93	1.0	175.0	8.0	24.0	0.99760
20	15.8	2.50		1.62		6.0			85.8	12.3	36.9	0.9963
40	32.0	1.25		3.50		5.20			36.1	24.4	73.2	0.9927
Режим $(Q_0/I)_{\max}$												
4.5	4.6	8.0		0.38		9.2			451.7	0.88	2.65	0.99974
10	9.4	3.55	2.80	0.83	0.36	7.85	0.656	0.707	175.0	2.46	7.4	0.99926
20	20.6	1.78		1.70		7.4			85.8	4.0	12.0	0.99880
40	41.6	0.88		3.40		6.30			36.1	7.9	23.7	0.9976
Режим $(Q_0/I^2)_{\max} (B = \theta)$												
l/s	n , шт	I , А	W , Вт	U , В	E	τ , с	B_H	B_K	$\sum_i m_i c_i$	λ/λ_0	$\lambda, 10^{-8}$ сек ⁻¹	P
4.5	8.4	5.6		0.52		12.9			451.7	0.38	1.13	0.999887
10	15.8	2.51	2.70	1.04	0.37	11.0	0.465	0.50	175.0	1.0	3.0	0.99970
20	36.6	1.26		2.30		10.6			85.8	1.66	5.0	0.99950
40	74.8	0.63		4.7		8.9			36.1	2.82	8.46	0.99915
Режим $\lambda_{\min} (B = \eta\theta)$												
4.5	13.2	4.80		0.74		16.0			451.7	0.30	0.90	0.999909
10	24.0	2.10	3.20	1.40	0.31	14.0	0.395	0.425	175.0	0.71	2.14	0.99979
20	58.6	1.07		3.24		13.3			85.8	1.35	4.0	0.99960
40	119	0.53		6.60		11.2			36.1	2.70	8.10	0.99920

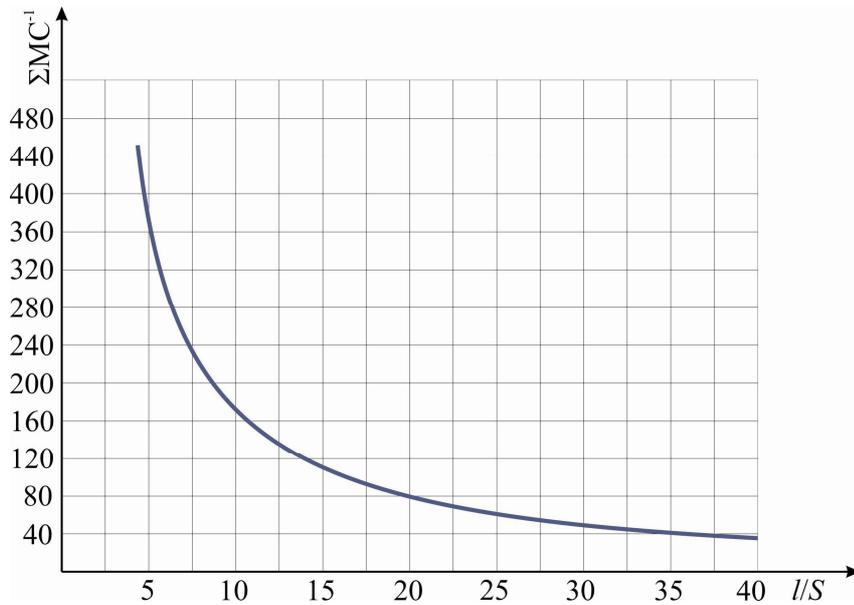


Рис. 1. Зависимость величины $\sum_i M_i C_i$ однокаскадного ТЭУ от геометрии ветвей термоэлементов l/s при $T = 300 \text{ K}$.

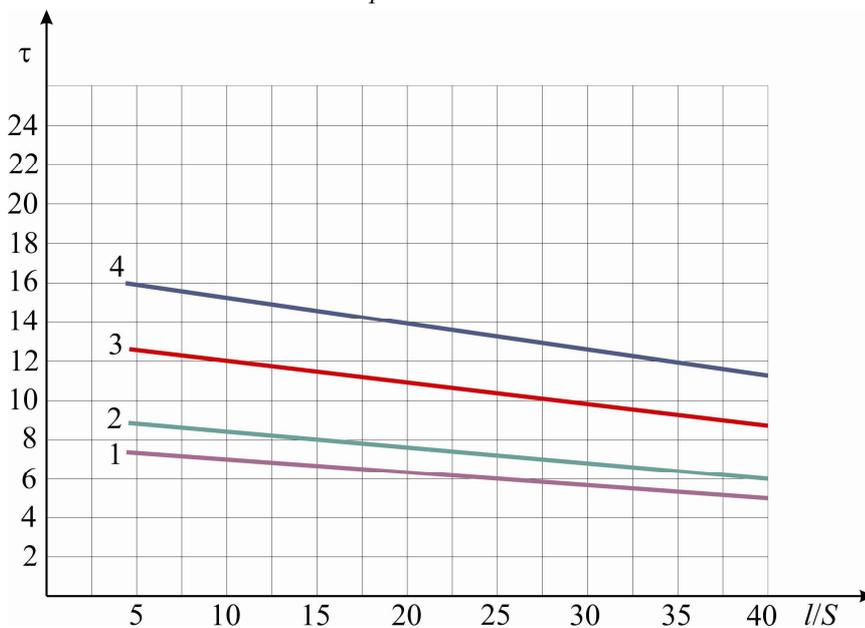


Рис. 2. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ однокаскадного ТЭУ от отношения l/s для различных режимов работы при $T = 300 \text{ K}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$. 1 – режим $Q_{0\max}$; 2 – режим $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0^2/I)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min} .

от $\tau = 12.9$ сек при $l/s = 4.5$ до $\tau = 8.9$ сек до $l/s = 40$ для режима $(Q_0^2/I)_{\max}$;

от $\tau = 16.0$ сек при $l/s = 4.5$ до $\tau = 11.2$ сек до $l/s = 40$ для режима λ_{\min} .

Минимальное время выхода на стационарный режим работы τ_{\min} обеспечивается в режиме $Q_{0\max}$ при $l/s = 40$:

– уменьшается величина рабочего тока I (рис. 3) для различных режимов работы (в среднем на 89%);

от $I = 11.1 \text{ А}$ при $l/s = 4.5$ до $I = 1.25 \text{ А}$ при $l/s = 40$ для режима $Q_{0\max}$;

от $I = 8.0 \text{ А}$ при $l/s = 4.5$ до $I = 0.88 \text{ А}$ при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I)_{\max}$;

от $I = 5.6$ А при $l/s = 4.5$ до $I = 0.63$ А при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I^2)_{\max}$;

от $I = 4.8$ А при $l/s = 4.5$ до $I = 0.53$ А при $l/s = 40$ для режима λ_{\min} ;

Минимальная величина рабочего тока I_{\min} обеспечивается в режиме λ_{\min} при $l/s = 40$:

– увеличивается количество термоэлементов (рис. 4) для различных режимов работы (в среднем в 9 раз):

От $n = 4$ шт при $l/s = 4.5$ до $n = 32$ шт при $l/s = 40$ для режима $Q_{0\max}$;

От $n = 5$ шт при $l/s = 4.5$ до $n = 41.6$ шт при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I)_{\max}$;

От $n = 9$ шт при $l/s = 4.5$ до $n = 74.8$ шт при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I^2)_{\max}$;

От $n = 13$ шт при $l/s = 119$ до $n = 74.8$ шт при $l/s = 40$ для режима λ_{\min} .

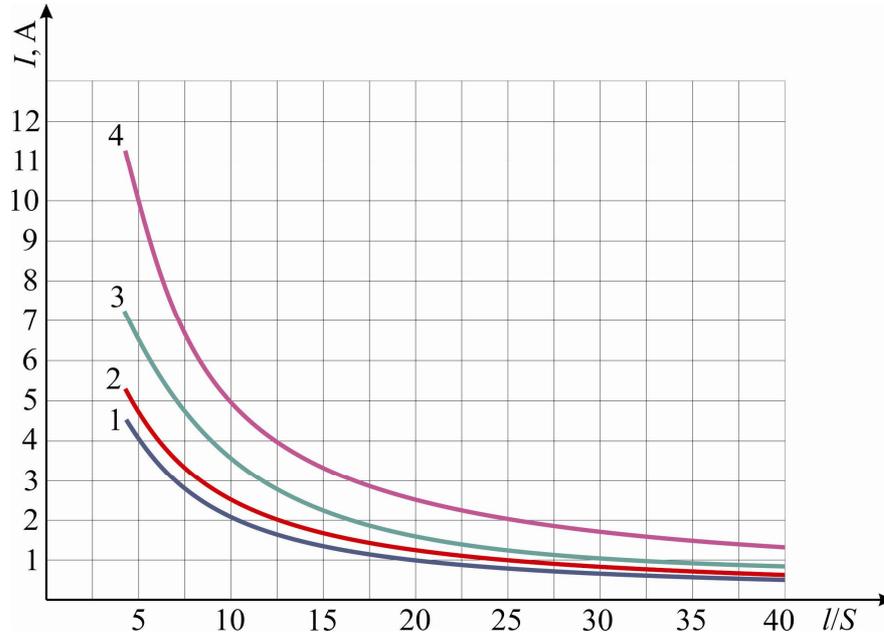


Рис. 3. Зависимость рабочего тока I от отношения l/s для разных режимов работы при $T = 300$ К; $\Delta T = 300$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт. 1 – режим $Q_{0\max}$; 2 – режим $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min} .

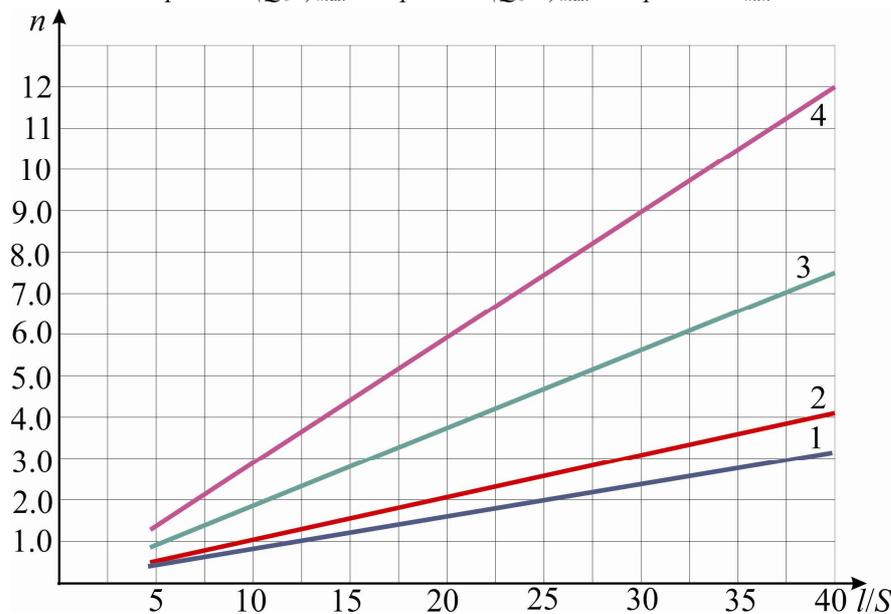


Рис. 4 – Зависимость количества термоэлементов n при $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт от отношения l/s для режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min} .

Минимальное количество термоэлементов n_{\min} обеспечивается в режиме $Q_{0\max}$:

– холодильный коэффициент E остается постоянным для различных режимов работы и не зависит от геометрии ветвей термоэлементов:

$E = 0.25$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$ в режиме $Q_{0\max}$;

$E = 0.36$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$ в режиме $(Q_0/I)_{\max}$;

$E = 0.37$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$ в режиме $(Q_0/I^2)_{\max}$;

$E = 0.31$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$ в режиме λ_{\min} .

Максимальная величина холодильного коэффициента $E = 0.37$ обеспечивается в режиме $(Q_0/I^2)_{\max}$:

– относительный рабочий ток B_K и B_H остается постоянным и не зависит от геометрии ветвей термоэлементов;

– увеличивается величина падения напряжения U (рис. 5) в среднем в $9.0 \div 9.7$ раза.

$U = 0.36$ В при $l/s = 4.5$ и $U = 3.5$ В при $l/s = 40$ для режима $Q_{0\max}$;

$U = 0.38$ В при $l/s = 4.5$ и $U = 3.4$ В при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I)_{\max}$;

$U = 0.52$ В при $l/s = 4.5$ и $U = 4.7$ В при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I^2)_{\max}$;

$U = 0.74$ В при $l/s = 4.5$ и $U = 6.6$ В при $l/s = 40$ для режима λ_{\min} .

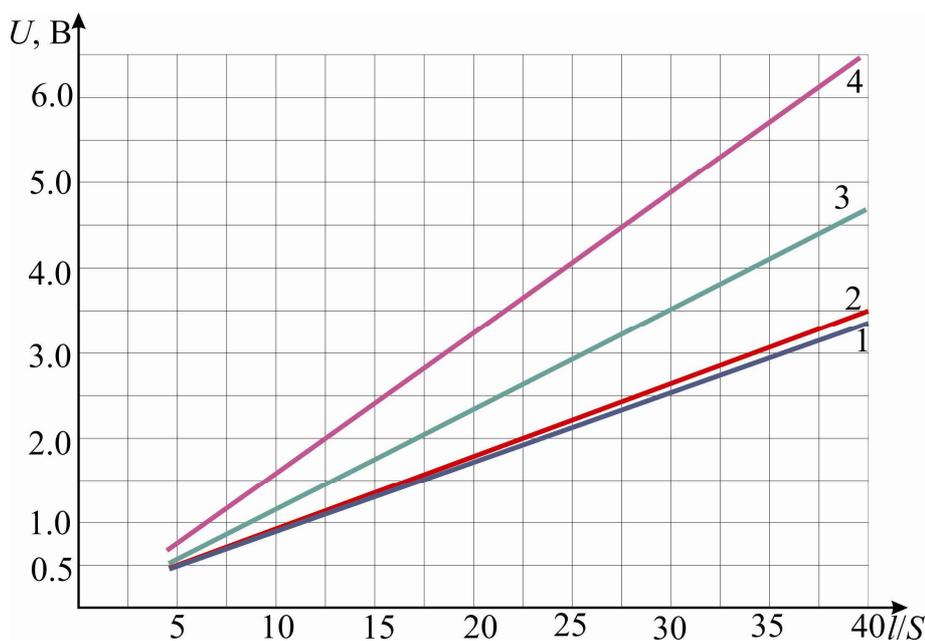


Рис. 5. Зависимость падения напряжения U однокаскадного ТЭУ от отношения l/s для различных режимов работы при $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт. 1 – режим $Q_{0\max}$; 2 – режим $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min} .

Максимальное падение напряжения U_{\max} обеспечивается в режиме λ_{\min} :

– увеличивается интенсивность отказов λ/λ_0 (рис. 6) в среднем от 7.4 до 9.0 раза:

$\lambda/\lambda_0 = 3.15$ при $l/s = 4.5$ и $\lambda/\lambda_0 = 24.4$ при $l/s = 40$ для режима $Q_{0\max}$;

$\lambda/\lambda_0 = 0.88$ при $l/s = 4.5$ и $\lambda/\lambda_0 = 7.9$ при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I)_{\max}$;

$\lambda/\lambda_0 = 0.38$ при $l/s = 4.5$ и $\lambda/\lambda_0 = 2.82$ при $l/s = 40$ для режима $(Q_0/I^2)_{\max}$;

$\lambda/\lambda_0 = 0.30$ при $l/s = 4.5$ и $\lambda/\lambda_0 = 2.70$ при $l/s = 40$ для режима λ_{\min} .

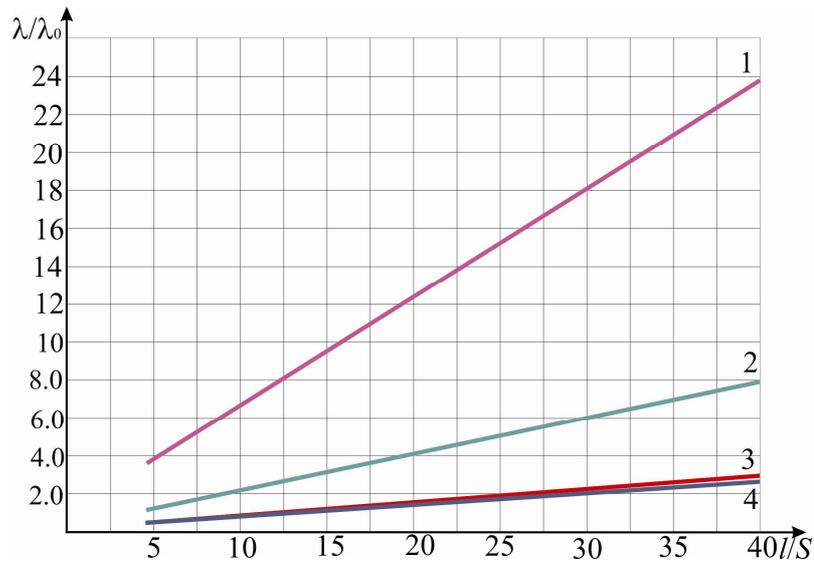


Рис. 6. Зависимость интенсивности отказов λ/λ_0 ТЭУ от отношения l/s для различных режимов работы при $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт.

Минимальная интенсивность отказов λ/λ_0 обеспечивается в режиме λ_{\min} :
– уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 7).

Максимальная вероятность безотказной работы P обеспечивается в режиме λ_{\min} :
увеличивается относительная величина времени выхода на стационарный режим работы $\Delta\tau/\tau = \tau_{4.5} - \tau_i/\tau_{4.5}$ % однокаскадного ТЭУ от геометрии ветвей термоэлементов l/s для различных режимов работы (рис. 8).

С ростом относительного рабочего тока B_K уменьшается время выхода на стационарный режим работы τ для различной геометрии ветвей термоэлементов l/s (рис. 9) при $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт. При заданном B_K (токовом режиме работы) время выхода на стационарный режим работы τ уменьшается от $l/s = 4.5$ до $l/s = 4.0$.

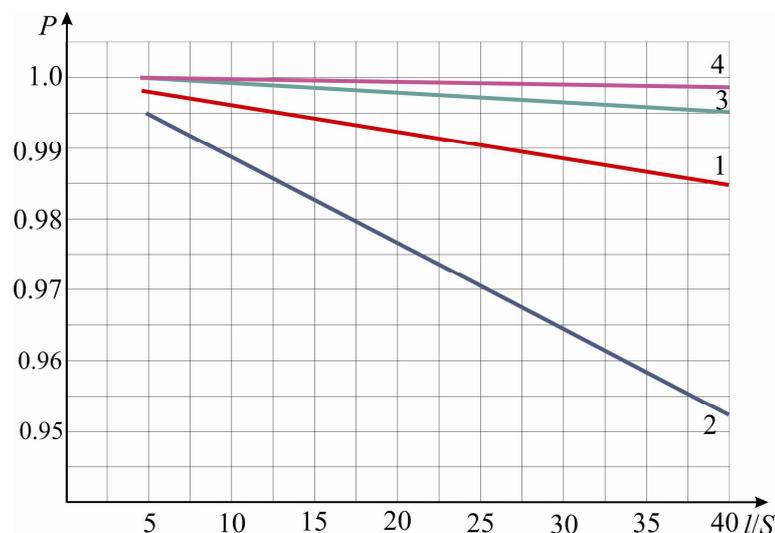


Рис. 7. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от отношения l/s для различных режимов работы при $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт; $t = 10^4$ сек. 1 – режим $Q_{0\max}$; 2 – режим $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0^2/I)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min} .

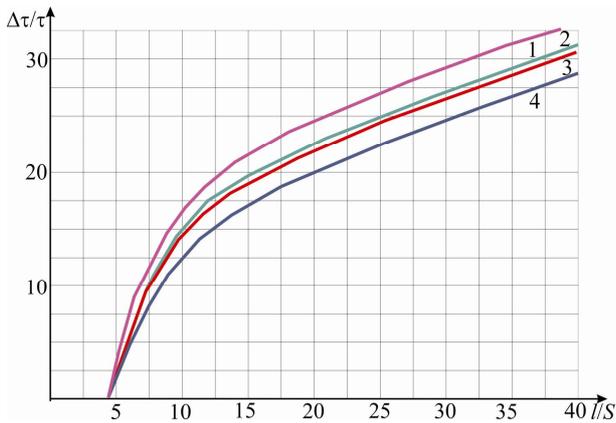


Рис. 8. Зависимость относительной величины времени выхода на стационарный режим работы $\Delta\tau/\tau = \tau_{4.5} - \tau_i / \tau_{4.5} \%$ однокаскадного ТЭУ от геометрии ветвей термоэлементов l/s для различных режимов работы при $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт ($i = 4.5; 10; 20; 40$); $t = 10^4$ сек. 1 – режим Q_{0max} ; 2 – режим $(Q_0/I)_{max}$; 3 – режим $(Q_0/I^2)_{max}$; 4 – режим λ_{min} .

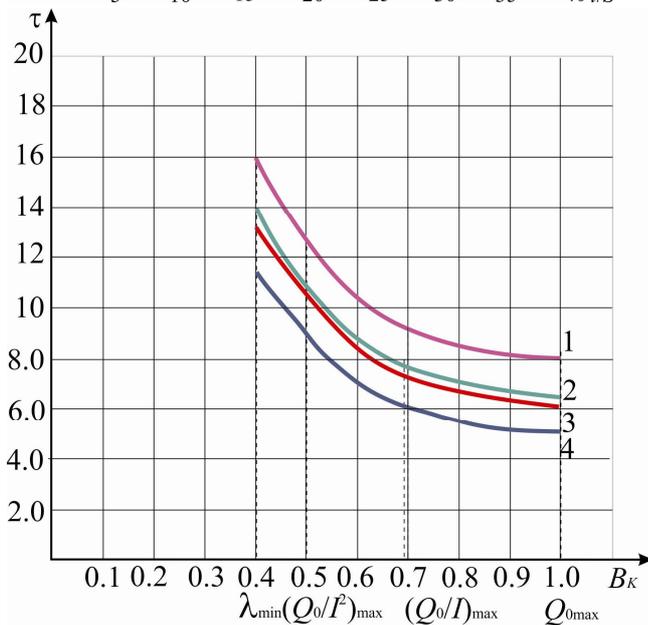


Рис. 9. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока B_K для различной геометрии ветвей термоэлементов l/s при $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт. Режимы работы: λ_{min} ; $(Q_0/I^2)_{max}$; $(Q_0/I)_{max}$; Q_{0max} .
1 – $l/s = 4.5$ см⁻¹; 2 – $l/s = 10$ см⁻¹; 3 – $l/s = 20$ см⁻¹; 4 – $l/s = 40$ см⁻¹.

Результаты расчетов динамики функционирования для различных перепадов температуры ΔT и различных режимов работы приведены в таблицах 2 а, б.

Таблица 2а

Результаты расчетов динамики функционирования ТЭУ для различных температур для токовых режимов Q_{0max} и $(Q_0/I)_{max}$

$T = 300$ К, $Q_0 = 1.0$ Вт										
l/s	режим Q_{0max}					режим $(Q_0/I)_{max}$				
	I, A	B_H	B_K	$\tau, \text{сек.}$	λ / λ_0	I, A	B_H	B_K	$\tau, \text{сек.}$	λ / λ_0
$\Delta T = 10$ К, $T_0 = 290$ К, $\Delta T_{max} = 100.5$ К, $\theta = 0.10$										
4.5	11.9	0.988	1.0	1.36	1.58	3.80	0.31	0.316	2.9	0.02
10	5.32	0.985	1.0	1.0	3.6	1.68	0.31	0.316	2.3	0.046
20	2.67	0.99	1.0	0.96	6.9	0.85	0.31	0.316	2.2	0.088
40	1.33	0.985	1.0	0.85	13.6	0.42	0.31	0.316	1.86	0.17
$\Delta T = 20$ К, $T_0 = 280$ К, $\Delta T_{max} = 93.7$ К, $\theta = 0.213$										
4.5	11.6	0.97	1.0	3.0	1.86	5.45	0.447	0.46	4.7	0.105

Продолжение таблицы 2а

10	5.24	0.970	1.0	2.3	4.4	2.42	0.445	0.46	3.8	0.26
20	2.62	0.97	1.0	2.2	7.8	1.21	0.45	0.46	3.65	0.47
40	1.31	0.97	1.0	1.91	15.6	0.60	0.45	0.46	3.10	0.94
$\Delta T = 30 K, T_0 = 270 K, \Delta T_{\max} = 86.5 K, \theta = 0.346$										
4.5	11.5	0.96	1.0	4.9	2.33	6.90	0.565	0.588	6.7	0.4
10	5.19	0.96	1.0	4.0	5.7	3.05	0.565	0.588	5.5	0.87
20	2.59	0.959	1.0	3.8	9.7	1.52	0.56	0.59	5.3	1.52
40	1.30	0.96	1.0	3.3	19.3	0.76	0.56	0.588	4.5	3.0
$\Delta T = 40 K, T_0 = 260 K, \Delta T_{\max} = 79.8 K, \theta = 0.50$										
4.5	11.1	0.93	1.0	7.8	3.15	8.0	0.656	0.707	9.2	2.888
10	5.02	0.93	1.0	6.4	8.0	3.55	0.656	0.707	7.7	2.46
20	2.51	0.93	1.0	6.0	12.3	1.78	0.66	0.707	7.4	4.0
40	1,25	0.93	1.0	5.2	24.4	0.88	0.66	0.707	6.3	7.9
$\Delta T = 50 K, T_0 = 250 K, \Delta T_{\max} = 73.4 K, \theta = 0.68$										
4.5	10.9	0.91	1.0	12.2	5.16	9.1	0.75	0.825	13.1	2.5
10	4.90	0.91	1.0	10	13.6	4.0	0.75	0.825	11.0	7.2
20	2.45	0.91	1.0	9.5	19.5	2.0	0.75	0.825	10.6	10.9
40	1.22	0.91	1.0	8.3	38.6	1.0	0.75	0.825	9.2	22.2
$\Delta T = 60 K, T_0 = 240 K, \Delta T_{\max} = 66.8 K, \theta = 0.90$										
4.5	10.5	0.88	1.0	22.8	19.3	10.2	0.83	0.95	22.5	15.1
10	4.74	0.88	1.0	19.0	47.8	4.5	0.83	0.95	19.1	40.4
20	2.38	0.88	1.0	18.3	69.4	2.3	0.836	0.95	18.6	67.0
40	1.18	0.88	1.0	15.3	139	1.12	0.836	0.95	15.7	135

Таблица 2б

Результаты расчетов динамики функционирования ТЭУ для различных температур для токовых режимов $(Q_0/I^2)_{\max}$ и λ_{\min}

$T = 300 K, Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$										
l/s	режим $(Q_0/I^2)_{\max}$					режим λ_{\min}				
	$I, \text{ А}$	B_H	B_K	$\tau, \text{ сек.}$	λ / λ_0	$I, \text{ А}$	B_H	B_K	$\tau, \text{ сек.}$	λ / λ_0
$\Delta T = 10 K, T_0 = 290 K, \Delta T_{\max} = 100.5 K, \theta = 0.10$										
4.5	1.20	0.098	0.10	9.9	0.00051	0.85	0.070	0.071	16.9	0.0008
10	0.53	0.098	0.10	8.2	0.0012	0.38	0.070	0.071	14.5	0.0009
20	0.27	0.098	0.10	8.0	0.0023	0.19	0.071	0.072	13.7	0.0013
40	0.133	0.98	0.10	6.8	0.0045	0.096	0.071	0.072	11.5	0.0025
$\Delta T = 20 K, T_0 = 280 K, \Delta T_{\max} = 93.7 K, \theta = 0.213$										
4.5	2.5	0.206	0.213	10.6	0.010	1.9	0.155	0.16	16.5	0.0016
10	1.12	0.207	0.213	8.8	0.025	0.84	0.155	0.16	13.8	0.015

Продолжение таблицы 2б

20	0.56	0.207	0.213	8.6	0.047	0.42	0.155	0.16	13.5	0.029
40	0.28	0.207	0.213	7.3	0.094	0.21	0.155	0.16	11.4	0.048
$\Delta T = 30 \text{ K}, T_0 = 270 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 86.5 \text{ K}, \theta = 0.346$										
4.5	4.0	0.33	0.35	11.5	0.078	3.2	0.266	0.28	15.5	0.054
10	1.80	0.33	0.35	9.45	0.19	1.44	0.27	0.28	13.3	0.13
20	0.90	0.33	0.35	9.40	0.35	0.72	0.266	0.277	13.1	0.24
40	0.45	0.33	0.35	7.90	0.70	0.36	0.267	0.277	11.0	0.49
$\Delta T = 40 \text{ K}, T_0 = 260 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 79.8 \text{ K}, \theta = 0.50$										
4.5	5.6	0.464	0.50	12.9	0.38	4.8	0.39	0.425	16.0	0.3
10	2.51	0.465	0.50	11.0	0.98	2.1	0.39	0.425	14.0	0.4
20	1.26	0.465	0.50	10.6	1.66	1.07	0.395	0.425	13.3	1.35
40	0.63	0.463	0.50	8.9	2.82	0.53	0.394	0.405	11.2	2.7
$\Delta T = 50 \text{ K}, T_0 = 250 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 73.4 \text{ K}, \theta = 0.68$										
4.5	7.5	0.62	0.68	15.6	1.71	6.80	0.355	0.612	17.9	1.58
10	3.33	0.62	0.68	13.4	4.4	3.0	0.555	0.612	15.2	3.7
20	1.67	0.62	0.68	12.9	7.6	1.5	0.555	0.612	14.9	7.0
40	0.83	0.62	0.68	10.9	15.2	0.75	0.553	0.612	12.6	14.0
$\Delta T = 60 \text{ K}, T_0 = 240 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 66.8 \text{ K}, \theta = 0.90$										
4.5	9.6	0.79	0.90	23.4	15.9	9.30	0.766	0.87	24.2	16.6
10	4.3	0.79	0.90	20.4	35.0	4.1	0.76	0.87	21.0	34.6
20	2.14	0.79	0.90	19.4	70.0	2.07	0.77	0.87	20.2	75.6
40	1.07	0.79	0.90	16.4	140.0	1.0	0.77	0.87	17.0	162

Следует отметить, что с ростом перепада температуры ΔT для различной геометрии ветвей термоэлементов l/s и режимов работы:

– увеличивается время выхода на стационарный режим τ для режима $Q_{0\max}$ (рис. 10).

Так при заданном перепаде температуры ΔT , например, $\Delta T = 40 \text{ K}$, время выхода на стационарный режим работы τ уменьшается от $\tau = 7.8$ сек. для $l/s = 4.5$ до $\tau = 5.2$ сек. для $l/s = 40$, т.е. на 33 %:

– увеличивается время выхода на стационарный режим работы τ для режима $(Q_0/I)_{\max}$ (рис. 11).

Так при заданном перепаде температуры ΔT , например, $\Delta T = 40 \text{ K}$, время выхода на стационарный режим работы τ уменьшается от $\tau = 9.2$ сек. для $l/s = 4.5$ до $\tau = 6.3$ сек. для $l/s = 40$, т.е. на 31.5%:

– увеличивается время выхода на стационарный режим работы τ для режима $(Q_0/I^2)_{\max}$ (рис. 12).

Так при заданном перепаде температуры ΔT , например, $\Delta T = 40 \text{ K}$, время выхода на стационарный режим работы τ уменьшается от $\tau = 12.9$ сек. для $l/s = 4.5$ до $\tau = 8.9$ сек. для $l/s = 40$, т.е. на 31.0 %.

– функциональная зависимость $\tau = f(\Delta T)$ имеет пологий минимум при $\Delta T = 30 \text{ K}$ (рис. 13) для режима λ_{\min} .

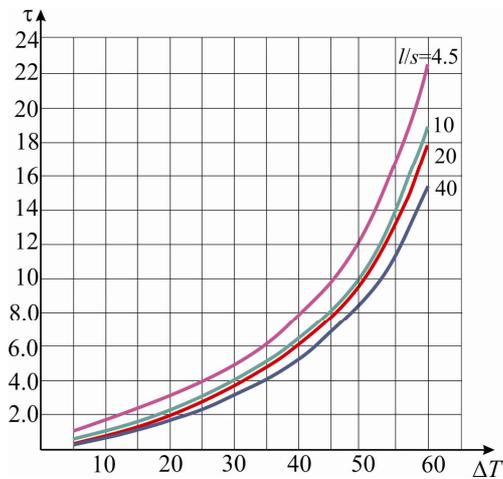


Рис. 10. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различной геометрии ветвей термоэлементов l/s в режиме Q_{0max} при $T = 300$ К.

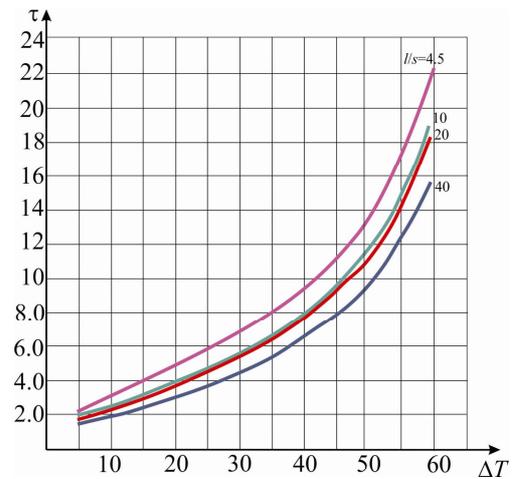


Рис. 11. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различной геометрии ветвей термоэлементов l/s в режиме $(Q_0/I)_{max}$ при $T = 300$ К, $Q_0 = 1.0$ Вт.

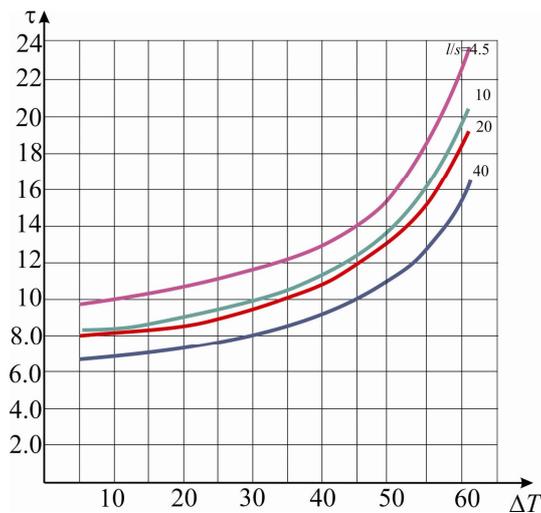


Рис. 12. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различной геометрии ветвей термоэлементов l/s в режиме $(Q_0/T^2)_{max}$ при $T = 300$ К, $Q_0 = 1.0$ Вт.

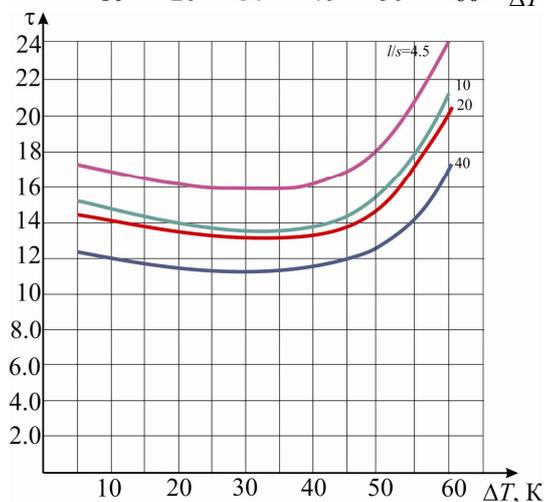


Рис. 13. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различной геометрии ветвей термоэлементов l/s в режиме λ_{min} при $T = 300$ К, $Q_0 = 1.0$ Вт.

Так при заданном перепаде температуры ΔT , например, $\Delta T = 40$ К время выхода на стационарный режим работы τ уменьшается от $\tau = 16$ сек. для $l/s = 4.5$ до $\tau = 11.2$ сек. $l/s = 40$, т.е. на 30 %.

Обсуждение результатов анализа динамики функционирования однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства с различной геометрией ветвей термоэлементов

Время выхода на стационарный режим работы τ однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства при заданном перепаде температуры ΔT и тепловой нагрузке Q_0 зависит от геометрии ветвей термоэлементов (отношение l/s) для различных режимов работы.

С ростом отношения l/s от $l/s = 4.5$ до $l/s = 40$ для различных режимов работы:

- уменьшается время выхода на стационарный режим работы τ в среднем на 30 – 33 %;
- минимальное время выхода на стационарный режим работы τ_{min} обеспечивается в режиме Q_{0max} ;
- уменьшается величина рабочего тока I до 9 раз;
- увеличивается количество термоэлементов n до 9 раз;
- минимальное количество термоэлементов n_{min} обеспечивается в режиме Q_{0max} ;
- холодильный коэффициент E остается постоянным и не зависит от геометрии ветвей термоэлементов;
- наибольший холодильный коэффициент E обеспечивается в режиме $(Q_0/I^2)_{max}$;
- увеличивается падение напряжения U до 9 раз;
- максимальное падение напряжения U_{max} обеспечивается в режиме λ_{min} ;
- увеличивается интенсивность отказов λ/λ_0 ;
- минимальная интенсивность отказов λ/λ_0 обеспечивается в режиме λ_{min} ;
- уменьшается вероятность безотказной работы P ;
- максимальная вероятность безотказной работы P_{max} обеспечивается в режиме λ_{min} ;
- с ростом перепада температуры ΔT время выхода на стационарный режим работы τ увеличивается для различных режимов работы.

Сравнительный анализ основных параметров, показателей надежности и динамических характеристик дает возможность выбора компромиссных решений при построении ТЭУ с учетом весомости каждого из ограничительных требований.

Выводы

1. Изменением геометрии ветвей термоэлементов в диапазоне унификации для широкого использования при проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств возможно уменьшение динамических характеристик до 30% без изменения технологии их изготовления.
2. Показана взаимосвязь динамических характеристик термоэлектрических охладителей с показателями надежности, что позволяет вариацией геометрии термоэлементов и токовых режимов работы выбирать охладители, обеспечивающие обоснованный компромисс при проектировании термоэлектрических систем обеспечения тепловых режимов теплонагруженной радиоэлектронной аппаратуры.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические оборудование: Справочник / Л.И. Анатычук // М.: Наукова думка, 1979. - 768 с.
2. Zebarjadi, M. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications / M. Zebarjadi, K. Esfarjani, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren, G. Chen // *Energy & Environmental Science*, № 5, 2012. - P. 5147-5162.
3. Hyoung-Seuk, Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics-of-failure / Choi Hyoung-Seuk // *Electronic Materials Letter*, 7, 2011. - P. 271.
4. Царев А.В. Исследование характеристик термоэлектрических устройств для систем термостатирования стартовых комплексов / А.В. Царев, В.В. Чугунки // *Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXII академических чтений по космонавтике* - М.: Комиссия РАН, 2008. - С. 320-321.
5. Ping, Yang. Approach on thermoelectricity reliability of board-level backplane based on the orthogonal experiment design / Ping Yang // *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 4 (2-4), 2010. - P. 70-185.
6. Wereszczak, H. Wang // *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. - Arlington, 11 May 2011. - P. 18.
7. Rowe, D. M. Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics / D. M. Rowe // Boca Raton: CRC Press, 2012. - 544 г.
8. Zaykov V. Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single-stage cooler / V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 1 / 1 (85), P. 26-33.
9. Зайков В. П. Модель взаимосвязи показателей надежности однокаскадного охладителя с геометрией отраслей термоэлементов / В.П. Зайков, В. И. Мещеряков, Ю.И. Журавлев // *Термоэлектричество*, № 6. -2017. - С. 59-76.
10. Zaykov V. Analysis of the possibility to control the inertia of the thermoelectric cooler / V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 6/8 (90), P. 17-24.
11. Zaykov V. Analysis of relationship between of a thermoelectric cooler and its design and mode of operation / V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 1/8 (91), P. 12-24.
12. Зайков В. П., Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные оборудования / В.П. Зайков, Л.А. Киншова, В.Ф. Моисеев // Одесса: Политехперіодика, 2009г. - 120 с.

Поступила в редакцию 12.03.2018

V.P.Zaykov¹, *Candidate of Tech. science,*
V.I.Mescheryakov², *Doctor of Tech. science,*
Gnatovskaya A.A.²
Yu. I. Zhuravlov³, *Candidate of Tech. science*

¹SHTORM Research Institute, 27, Tereshkova str.,
Odesa, Ukraine, e-mail: grand@i.ua;

²Odesa State Ecological University, 15, Lvivska
str., Ukraine, e-mail: grand@ua.fm;

³National University “Odesa Maritime Academy”, 8,
Didrikhson str., Ukraine, e-mail: zhuravlov.y@ya.ru.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF OPERATION OF A SINGLE-STAGE THERMOELECTRIC COOLING DEVICE WITH DIFFERENT GEOMETRY OF THERMOELEMENT LEGS

A comparative analysis was carried out of the dynamics of operation of a single-stage thermoelectric cooling device with a variation in the geometry of thermoelement legs taking into account the influence of structural and technological elements for different characteristic current operating modes, temperature drops and thermal load. It is shown that as the aspect ratio of thermoelement leg increases, the time to reach the steady-state operating mode and the magnitude of the operating current decrease, the voltage drop with constant energy consumption for various operating modes increases. As the temperature drop grows, the time to reach the steady-state operating mode for different operating modes increases. Bibl. 12, Tabl. 2, Fig. 13.

Key words: thermoelectric cooler, geometry of thermoelement legs, reliability indicators, time to reach the mode, temperature drop.

References

1. Anatyчук L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskii ustroystva. Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices. Handbook]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
2. Zebarjadi M., Esfarjani K., Dresselhaus M.S., Ren Z.F., Chen G. (2012). Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications. *Energy & Environmental Science*, 5, 5147-5162.
3. Hyoung-Seuk Choi. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics-of-failure. *Electronic Materials Letters*, 7, 271.
4. Tsarev A.V., Chugunkov V.V. (2008). Issledovaniie k harakteristik termoelektricheskikh ustroystv dlia system termostatirovaniia startovykhk ompleksov [Research on characteristics of thermoelectric devices for thermostating systems of start complexes]. *Aktualnyie problem rossiiskoi kosmonautiki. Materialy XXXII akademicheskikh chtenii po kosmonautike [Current Problems of Russian Cosmonautics: Proc. of XXXII Academic Readings on Cosmonautics]*. (pp.320-321). M: Commission of the Russian Academy of Sciences [in Russian].
5. Yang Ping (2010). Approach on thermoelectricity reliability of board-level backplane based on the orthogonal experiment design. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 4(2-4), 170-185.
6. Wereszczak A. A., Wang H. (2011). Thermoelectric mechanical reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting (USA, Arlington, 11 May 2011)* (P. 18).
7. Rowe, D. M. (2012). Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. (Boca Raton: CRC Press, 2012) (544 p).
8. Zaikov V., Meshcheriakov V., Zhuravlev Yu. (2017). Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single-stage cooler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (85), 26-33.
9. Zaikov, V., Meshcheriakov V., Zhuravlev Yu. (2017). Model of interrelation between indicators of a single-stage cooler and the geometry of thermoelement legs. *J. Thermoelectricity*, 6, 59-76.
10. Zaikov, V., Meshcheriakov V., Zhuravlev Yu. (2017). Analysis of the possibility to control the inertia of the thermoelectric cooler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/8 (90), 17-24.
11. Zaikov, V., Meshcheriakov V., Zhuravlev (2018). Analysis of relationship between of a thermoelectric cooler and its design and mode of operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8 (91), 12-24.

12. Zaikov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. (2009). *Prognozirovaniie pokazatelei nadezhnosti termoelektric heskikh okhlazhdaiiushchikh ustroistv. Kniga 1. Odnokaskadnyie ustroistva. [Prediction of reliability indicators of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single-staged devices].* Odessa: Politekhpriodika [in Russian].

Submitted 12.03.2018