

УДК 621.362.192

Зайков В.П. канд. техн. наук.¹,
Мещеряков В.И. доктор техн. наук.²,
Журавлев 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.

МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОДНОКАСКАДНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ С ГЕОМЕТРИЕЙ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Работа посвящена повышению показателей надежности однокаскадного термоэлектрического охладителя конструктивным методом путем разработки и анализа надежно-ориентированной модели, связывающей показатели надежности с геометрией термоэлементов. Исследования проведены для различных перепадов температуры, фиксированной тепловой нагрузки для различных режимов работы. Показано, что с уменьшением отношения высоты термоэлемента к сечению увеличивается максимальная мощность охлаждения, уменьшается количество термоэлементов и повышается вероятность безотказной работы. При этом не изменяется существующая технология изготовления охладителей, сохраняются результаты существующих механических и климатических испытаний, материал термоэлементов, стоимость модулей. Библ. 12, Рис. 11, Табл. 3.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, геометрия термоэлементов, показатели надежности, мощность охлаждения, перепад температур.

Введение

Надежность относится к важнейшим показателям средств обеспечения тепловых режимов теплонагруженной радиоэлектронной аппаратуры [1]. По массогабаритным показателям, быстродействию, климатическим и механическим условиям эксплуатации термоэлектрические устройства (ТЭУ) имеют неоспоримое преимущество перед компрессионными охладителями [2]. Математическое моделирование показателей надежности ТЭУ на всех этапах жизненного цикла стало обязательным условием создания бортовой аппаратуры, требования к функционированию которой постоянно ужесточаются [3]. Разработка и анализ моделей позволяют учесть влияние технологии изготовления [4], влаги [5], механических [6], климатических [7] факторов, тепловой нагрузки [8], материалов термоэлементов [9] на показатели надежности, поскольку именно на стадии моделирования закладывается потенциал снижения степени их воздействия [10]. Вместе с тем, в литературе недостаточно освещены вопросы влияния конструктивной составляющей на показатели

эксплуатационной надежности термоэлектрических устройств. При проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств существуют несколько подходов:

1. Задана геометрия ветвей термоэлементов $l/s = \text{const}$, где l – высота, s – площадь поперечного сечения ветви термоэлемента. В этом случае, варьируя величиной рабочего тока I , можно обеспечить работу ТЭУ в различных режимах работы от $Q_{0\text{max}}$ до $Q_0 = 0$ и тем самым повысить надежность [11].

2. В то же время в термоэлектрическом приборостроении применяются различные конструкции унифицированных модулей с различной геометрией ветвей термоэлементов $l/s = \text{var}$, и перед разработчиком возникает вопрос о выборе геометрии ветвей термоэлементов в ТЭУ для различных условий функционирования, что позволяет повысить показатели надежности. Рациональный выбор геометрии ветвей термоэлементов с учетом всех ограничительных требований является достаточно актуальной задачей.

Целью работы является разработка математической модели термоэлектрического охладителя, связывающей показатели надежности с геометрией ветвей термоэлементов, анализ которой позволяет оптимизировать показатели надежности при различных перепадах температур и режимах функционирования.

Разработка и анализ модели взаимосвязи показателей надежности, конструктивных и энергетических параметров в режимах λ_{min} , ΔT_{max} и теплового насоса ($\Delta T = 0$ К).

Рассмотрим влияние геометрии ветвей термоэлементов на основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ для различных перепадов температуры ΔT от 0 до 60 К.

Как известно, холодопроизводительность ТЭУ Q_0 можно записать в виде выражения

$$Q_0 = nI_{\text{max}}^2 R(2B - B^2 - \Theta) = n\gamma(2B - B^2 - \Theta), \quad (1)$$

где n – количество термоэлементов, шт.;

I_{max} – максимальный рабочий ток, $I_{\text{max}} = \bar{e}T_0/R$, А;

R – электрическое сопротивление ветви термоэлемента, $R = l/\bar{\sigma}s$, Ом;

\bar{e} , $\bar{\sigma}$ – соответственно, усредненный коэффициент термоЭДС, В/К, и электропроводность ветви термоэлемента, См/см;

T_0 – температура теплопоглощающего спая, К;

B – относительный рабочий ток $B = I/I_{\text{max}}$, отн.ед.;

I – величина рабочего тока, А;

Θ – относительный перепад температуры, $\Theta = \Delta T/\Delta T_{\text{max}} = (T - T_0)/\Delta T_{\text{max}}$, отн.ед.;

T – температура тепловыделяющего спая, К;

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

\bar{z} – усредненная термоэлектрическая эффективность ветви термоэлемента, К-1;

γ – максимальная термоэлектрическая мощность охлаждения, $\gamma = I_{\text{max}}^2 R = \bar{e}^2 \bar{\sigma} T_0^2 s/l$, Вт.

Мощность потребления ТЭУ можно записать в виде:

$$W = 2n\gamma B(B + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta). \quad (2)$$

Холодильный коэффициент E определяется выражением

$$E = Q_0/W = (2B - B^2 - \Theta)/2B(B + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta). \quad (3)$$

Относительную величину интенсивности отказов λ/λ_0 [12] можно представить в виде:

$$\lambda/\lambda_0 = \frac{nB^2(\Theta + C)(B + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta)^2}{(1 + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta)^2} K_T, \quad (4)$$

где λ_0 – номинальная интенсивность отказов, ч⁻¹;

C – относительная величина тепловой нагрузки, $C = Q_0/(nI_{\max}^2 R) = Q_0/n\gamma$;

K_T – коэффициент значимости, зависящий от температуры.

Вероятность безотказной работы ТЭУ можно определить по известной формуле

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (5)$$

где t – назначенный ресурс, ч.

Режим λ_{\min}

В табл. 1 сведены результаты расчетов основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ для различных отношений l/s в режиме $\lambda_{\min}(B = \eta\Theta)$ при следующих исходных данных:

- тепловая нагрузка $Q_0 = 2,0$ Вт;
- температура тепловыделяющего спая $T = 300$ К;
- перепад температуры $\Delta T = 0$ К, 20 К, 40 К, 60 К;
- усредненная термоэлектрическая эффективность $\bar{z}_M = 2.4 \cdot 10^{-3}$ 1/К;
- $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; – $t = 104$ ч.

При одинаковой тепловой нагрузке Q_0 и перепаде температуры ΔT для различной геометрии ветви термоэлемента ($l/s = \text{var}$) величина $n\gamma = \text{const}$.

Анализ расчетных значений основных параметров и показателей надежности показал, что с уменьшением отношения, l/s при заданном перепаде температуры ΔT и тепловой нагрузке Q_0 в режиме λ_{\min} :

- увеличивается величина рабочего тока I (рис. 1,а);
- увеличивается максимальная мощность охлаждения γ (рис. 1,а);
- уменьшается падение напряжения U (рис. 1,б);
- уменьшается интенсивность отказов λ и увеличивается вероятность безотказной работы P (рис. 2).

Таблица 1

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ для различных перепадов температуры ΔT и геометрии ветвей термоэлементов (l/s) при

$$T = 300 \text{ K}; Q_0 = 2,0 \text{ Вт}; \bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}; l = 4 \text{ мм в режиме } \lambda_{\min}$$

l/s , см ⁻¹	γ , Вт	n , шт.	$R \cdot 10^3$, Ом	I_{\max} , А	I , А	U , В	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P	$S=(a \times b)$, мм
$\Delta T = 10 \text{ K}$										
$\Theta = 0.10; B = 0.071; \Delta T_{\max} = 100.9 \text{ K}; \Delta T_{\max}/T_0 = 0.35; W = 0.81 \text{ Вт}; E = 2.46; K_T = 1.007; \bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$										
40.0	0.0762	709.4	44.4	1.31	0.093	8.83	0.0052	0.0155	0.99999845	1.0×1.0
20.0	0.162	335.5	22.2	2.70	0.192	4.23	0.00245	0.00735	0.99999926	1.5×1.5
10.0	0.324	167.0	11.1	5.40	0.383	2.12	0.00122	0.00366	0.99999963	2.1×2.1
4.5	0.720	75.1	5.0	12.0	0.852	0.953	0.00055	0.00164	0.99999984	3.1×3.1
3.25	0.997	54.3	3.61	16.6	1.18	0.69	0.00040	0.00119	0.99999988	3.6×3.6
2.0	1.62	33.4	2.22	27.0	1.92	0.423	0.000243	0.00073	0.99999993	4.6×4.6
1.0	3.24	16.7	1.11	54.0	5.0	0.212	0.000122	0.000365	0.999999964	6.5×6.5
$\Delta T = 20 \text{ K}$										
$\Theta = 0.214; B = 0.146; \Delta T_{\max} = 93.3 \text{ K}; \Delta T_{\max}/T_0 = 0.33; W = 2.23 \text{ Вт}; E = 0.90; K_T = 1.01; \bar{z} = 2.38 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$										
40.0	0.071	499.4	42.6	1.29	0.19	11.7	0.1179	0.354	0.999965	1.0×1.0
20.0	0.143	246.7	21.3	2.60	0.38	5.90	0.059	0.177	0.999982	1.4×1.4
10.0	0.286	123.3	10.64	5.2	0.76	2.90	0.030	0.089	0.9999911	2.0×2.0
4.5	0.676	52.2	4.79	11.5	1.70	1.33	0.0125	0.038	0.9999963	3.1×3.1
3.25	0.880	40.0	3.46	15.9	2.30	0.96	0.0096	0.029	0.9999971	3.5×3.5
2.0	1.43	24.7	2.13	25.9	3.80	0.60	0.0059	0.018	0.9999982	4.5×4.5
1.0	2.86	12.3	1.06	52.0	9.9	0.30	0.0030	0.0089	0.99999911	6.3×6.3
$\Delta T = 40 \text{ K}$										
$\Theta = 0.5; B = 0.40; \Delta T_{\max} = 79.8 \text{ K}; \Delta T_{\max}/T_0 = 0.31; W = 6.34 \text{ Вт}; E = 0.315; K_T = 1.022; \bar{z} = 2.37 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$										
40.0	0.0625	228.6	40.8	1.24	0.494	12.8	5.52	16.56	0.99835	1.0×1.0
20.0	0.125	114.3	20.4	2.47	1.0	6.40	2.76	8.30	0.99917	1.4×1.4
10.0	0.249	57.4	10.2	4.95	2.0	3.20	1.39	4.20	0.99958	2.0×2.0
4.5	0.554	25.8	4.59	11.0	4.4	1.44	0.625	1.87	0.99981	3.0×3.0
3.25	0.767	18.6	3.32	15.2	6.1	1.04	0.45	1.35	0.999865	3.5×3.5
2.0	1.246	11.5	2.04	2.47	10.0	0.64	0.28	0.84	0.999917	4.5×4.5
1.0	2.49	5.70	1.02	49.5	19.8	0.32	0.14	0.42	0.999958	6.3×6.3
$\Delta T = 60 \text{ K}$										
$\Theta = 0.9; B = 0.855; \Delta T_{\max} = 66.8 \text{ K}; \Delta T_{\max}/T_0 = 0.28; W = 47.9 \text{ Вт}; E = 0.042; K_T = 1.035; \bar{z} = 2.32 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$										
40.0	0.053	477.8	38.8	1.17	1.0	47.9	276.6	830	0.9204	1.0×1.0
20.0	0.106	238.8	19.4	2.34	2.0	24.0	138.3	414.8	0.9594	1.4×1.4
10.0	0.212	119.4	9.71	4.67	4.0	12.0	69.15	207.5	0.9795	2.0×2.0
4.5	0.471	53.8	4.37	10.4	8.90	5.40	31.1	93.3	0.99071	3.0×3.0
3.25	0.625	38.8	3.16	14.3	12.3	3.90	22.4	67.3	0.9933	3.5×3.5
2.0	1.06	23.9	1.94	23.4	20.0	2.40	13.8	41.4	0.9959	4.5×4.5
1.0	2.12	11.9	0.97	46.8	40.0	1.20	6.9	20.6	0.9979	6.3×6.3

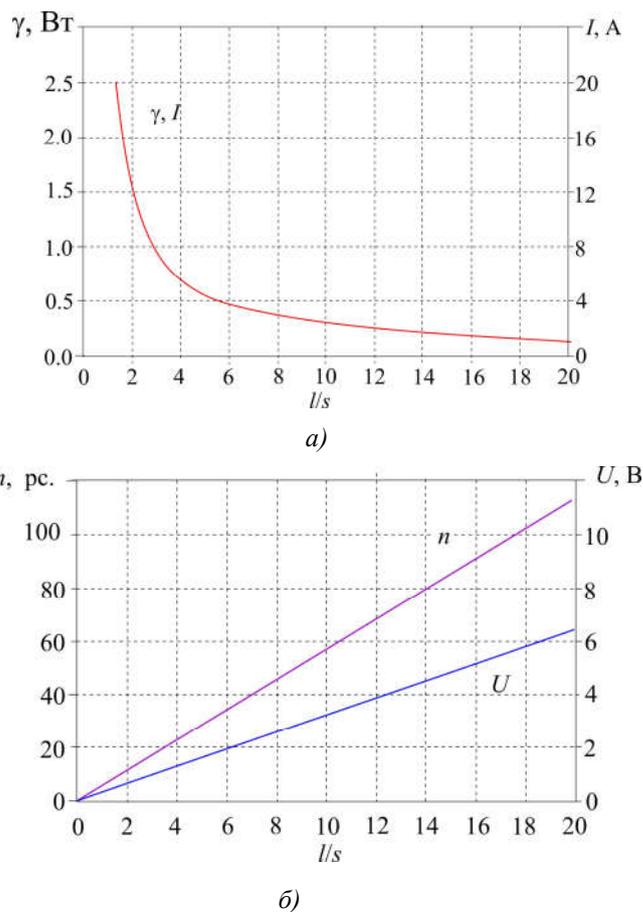


Рис. 1. Зависимость параметров γ , I (а) и n , U (б) однокаскадного ТЭУ от значения отношения l/s при $T = 300$ К, $\Delta T = 40$ К и $Q_0 = 2,0$ Вт в режиме λ_{\min}

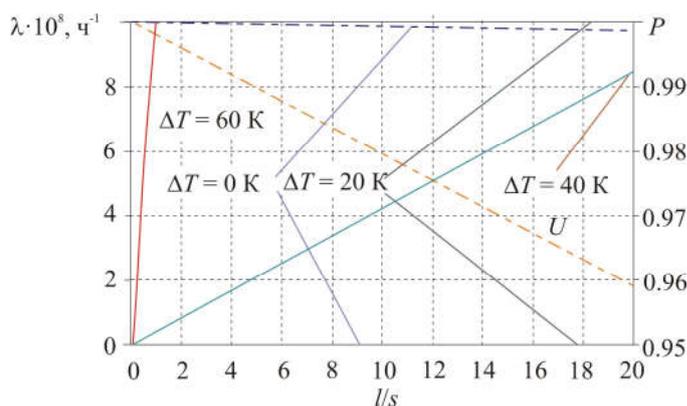


Рис. 2. Зависимость интенсивности отказов λ (сплошные линии) и вероятности безотказной работы P (пунктирные линии) однокаскадного ТЭУ от значения отношения l/s при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ч}^{-1}$, $t = 10^4$ ч и различных значениях ΔT в режиме λ_{\min} .

С ростом перепада температуры ΔT для различных значений l/s в режиме λ_{\min} :

- уменьшается максимальная термоэлектрическая мощность охлаждения γ ;
- увеличивается величина рабочего тока I (рис. 3,а);

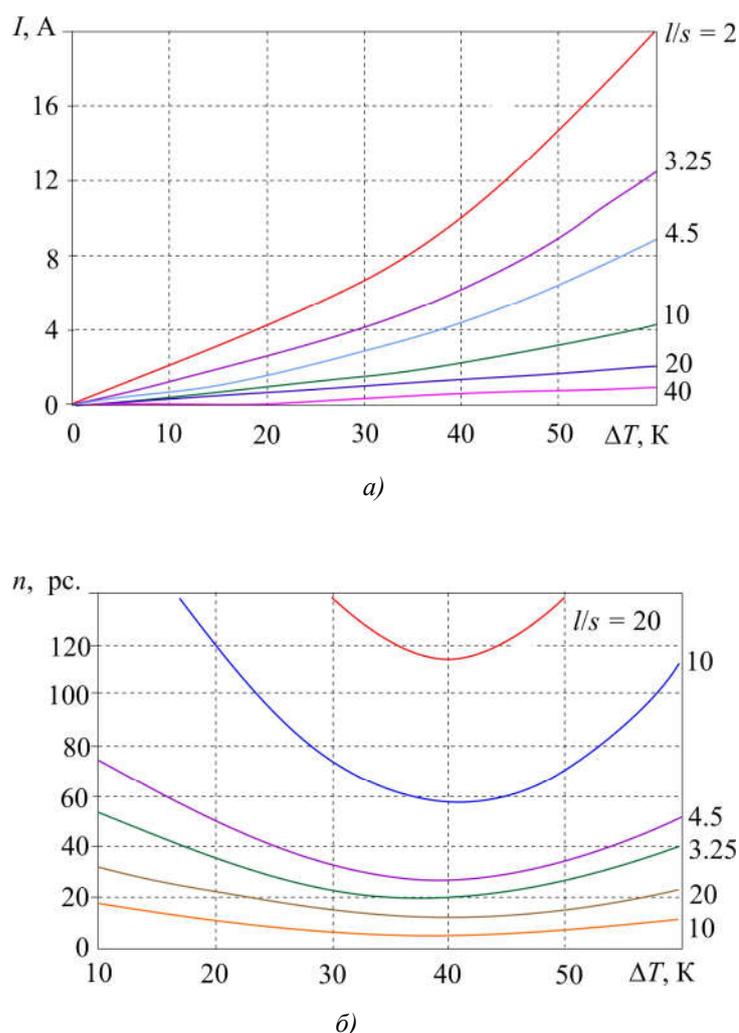


Рис. 3. Зависимость рабочего тока I (а) и количества термоэлементов n (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт и различных значениях отношения l/s в режиме λ_{\min} .

– функциональная зависимость количества термоэлементов n в ТЭУ от перепада температуры ΔT имеет минимум для различных значений отношения l/s (рис. 3,б), что можно объяснить ростом холодопроизводительности на один термоэлемент Q_0/n при ΔT_{opt} в точке минимума;

– увеличивается интенсивность отказов λ/λ_0 и уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 4).

Следует отметить, что с уменьшением отношения l/s увеличивается рабочий ток I (рис. 5).

Для режима λ_{\min} при $\Delta T = 40$ К и $Q_0 = 2.0$ Вт уменьшение отношения l/s от 20 до 10 позволяет снизить интенсивность отказов вдвое (с $8.3 \cdot 10^{-8}$ до $4.2 \cdot 10^{-8}$ 1/ч), а, следовательно, увеличить вероятность безотказной работы P . При этом количество термоэлементов n уменьшается в 2 раза, рабочий ток I увеличивается от 1 до 2 А, а мощность потребления и холодильный коэффициент остаются постоянными ($W = 6.34$ Вт, $E = 0.315$).

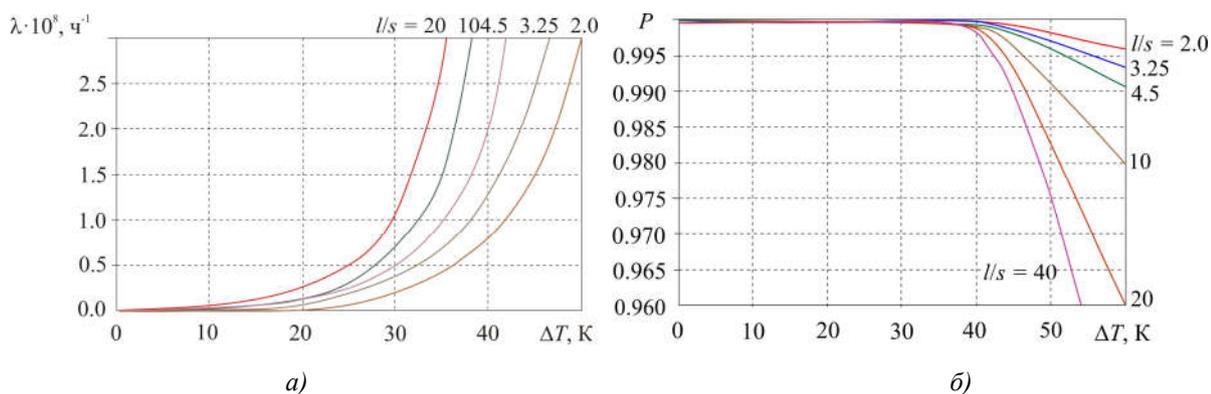


Рис. 4. Зависимость интенсивности отказов λ (а) и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$, $Q_0 = 2,0 \text{ Вт}$, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, $t = 10^4 \text{ ч}$ и различных значениях отношения l/s в режиме λ_{\min}

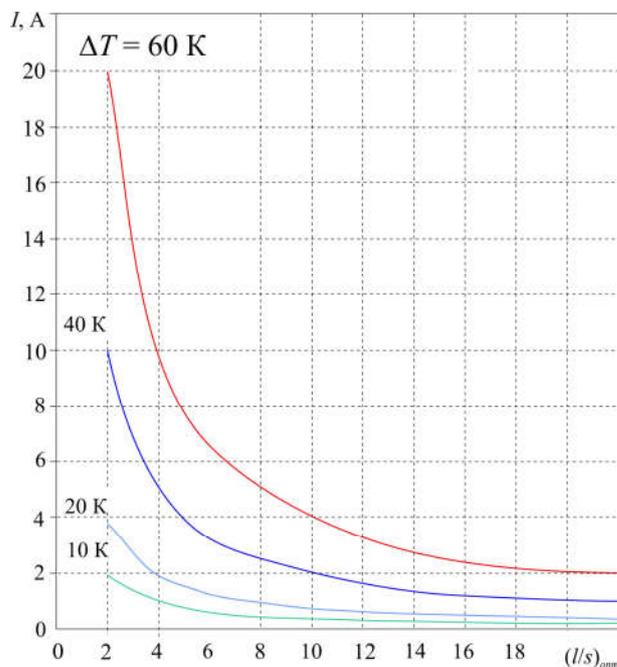


Рис. 5. Зависимость рабочего тока I от оптимального отношения $(l/s)_{\text{opt}}$ однокаскадного ТЭУ при $T = 300 \text{ K}$, $Q_0 = 2.0 \text{ Вт}$ и различных значениях ΔT в режиме λ_{\min} .

Режим ΔT_{\max} ($Q = 0$) Рассмотрим однокаскадное ТЭУ и определим оптимальную геометрию ветвей термоэлементов, обеспечивающую максимальный перепад температуры ΔT_{\max} . Для этого воспользуемся известными соотношениями [12].

Холодопроизводительность Q_0 охлаждающего термоэлемента можно записать в виде

$$Q_0 = 2n \left[\bar{\alpha} T_0 - \frac{1}{2} \frac{I^2 (l/s)}{\bar{\sigma}} - \frac{\bar{\chi}}{(l/s)} (T - T_0) \right] \quad (6)$$

либо

$$T_0 = \frac{I^2 (l/s)^2 + 2\bar{\chi}\bar{\sigma}T + (Q_0\bar{\sigma}l/ns)}{2\bar{\sigma}[\bar{\chi}^2 + \bar{e}I(l/s)]} \quad (7)$$

где \bar{e} , $\bar{\sigma}$, $\bar{\chi}$ – усредненные значения, соответственно, коэффициента термоЭДС, В/К; электропроводности, См/см и коэффициента теплопроводности ветви термоэлемента, Вт/(см·К).

Тогда зависимость температуры теплопоглощающего спая T_0 от геометрии ветвей термоэлементов при заданной величине рабочего тока I можно представить в виде.

$$T_0 = \frac{I^2 (l/s)^2 + 2\bar{\chi}\bar{\sigma}T + (Q_0\bar{\sigma}l/ns)}{2\bar{\sigma}[\bar{\chi}^2 + \bar{e}I(l/s)]} \quad (8)$$

Из условия $dT_0/d(l/s) = 0$ можно определить оптимальную геометрию ветвей термоэлементов $(l/s)_{opt}$, обеспечивающую максимальный перепад температуры ($\Delta T_{max} = T - T_{min}$) при заданном рабочем токе I :

$$(l/s)_{opt} = \frac{\bar{\chi}}{\bar{e}I} \left[\sqrt{1 + 2\bar{z}T \left(1 - \frac{Q_0}{2n\bar{e}IT} \right)} - 1 \right]. \quad (9)$$

Из этого выражения видно, что с ростом тепловой нагрузки Q_0 величина $(l/s)_{opt}$ уменьшается, а при $Q_0 \rightarrow 0$, т. е. при отсутствии тепловой нагрузки, она примет вид

$$(l/s)_{opt} = \frac{\bar{\chi}}{\bar{e}I} \left[\sqrt{1 + 2\bar{z}T} - 1 \right]. \quad (10)$$

Легко показать, что значение $(l/s)_{opt}$, обеспечивающее максимальный перепад температуры ΔT_{max} , практически такое же, как и в режиме Q_{0max} ($\Theta \rightarrow 1.0$), которое равно

$$(l/s)_{opt} = \frac{\bar{e}\bar{\sigma}T_0}{I}. \quad (11)$$

Как видно из рис. 6, в режиме ΔT_{max} уменьшением l/s рабочий ток I увеличивается.

Для расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ воспользуемся вышеприведенными соотношениями. Результаты расчетов при оптимальной геометрии ветвей термоэлементов приведены в табл. 2

Режим теплового насоса ($\Delta T = 0$). Одним из возможных применений термоэлектричества является использование термоэлектрических модулей в качестве теплового насоса для отвода тепловой мощности при $\Delta T = 0$ К.

Основной характеристикой такого режима является так называемый тепловой коэффициент μ , который представляет собой отношение величины отводимой тепловой мощности Q_N к затраченной (потребляемой) W при $\Delta T = 0$ К:

$$\mu = \frac{Q_N = Q_0}{W} = \frac{2 - B}{2B}. \quad (12)$$

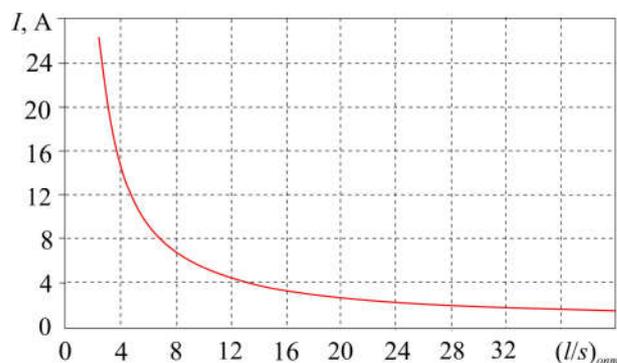


Рис. 6. Зависимость рабочего тока I от оптимального отношения $(l/s)_{opt}$ однокаскадного ТЭУ при $T = 300$ К, $Q_0 = 2.0$ Вт в режиме ΔT_{max} .

Таблица 2

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ с оптимальной геометрией ветвей термоэлементов при $T = 300$ К; $T_{0min} = 235$ К; $Q_0 = 0$ Вт;

$\Delta T_{max} = 65$ К; $K_T = 1,04$, $\bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\bar{e} = 2.0 \cdot 10^{-3}$ В/К; $\bar{\sigma} = 900$ См·см ;

$\bar{\chi} = 15 \cdot 10^{-3}$ Вт/(См·К) в режиме ΔT_{max}

$(l/S)_{opt}$	$R \cdot 10^{-3}$, Ом	$I = I_{max}$, А	n , шт.	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P	l , мм	$S=(a \times b)$, мм	γ , Вт
38.0	35.5	1.25	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	1.0×1.0	0.055
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	0.8×0.8	
			27	28.1	84.2	0.99162	2.0	0.7×0.7	
							1.5	0.6×0.6	
19.0	17.7	2.25	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	1.45×1.45	0.110
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	1.25×1.25	
			27	28.1	84.2	0.99162	2.0	1.0×1.0	
							1.5	0.9×0.9	
9.4	8.85	5.0	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	2.0×2.0	0.220
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	1.7×1.7	
			27	28.1	84.2	0.99162	2.0	1.4×1.4	
							1.5	1.2×1.2	
4.3	4.0	11.0	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	3.0×3.0	0.484
								1.0	

Продолжение таблицы 1

			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	2.6×2.6	
							2.0	2.1×2.1	
			27	28.1	84.2	0.99162	1.5	1.8×1.8	
							1.0	1.5×1.5	
1.9	1.8	25.0	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	4.5×4.5	1.089
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	3.9×3.9	
							2.0	3.2×3.2	
			27	28.1	84.2	0.99162	1.5	2.7×2.7	

На рис. 7а представлена зависимость теплового коэффициента μ от относительного рабочего тока B в режиме теплового насоса. С ростом относительного рабочего тока B коэффициент μ уменьшается и при $B = 1.0$ становится равным $\mu = 0.5$, т. е. достигает своего минимального значения.

При заданной величине отводимой тепловой мощности Q_N можно использовать модули либо ТЭУ с различным количеством термоэлементов n при $T = 300$ К, $\Delta T = 0$ К

На рис. 7б представлена зависимость теплового коэффициента μ от количества термоэлементов для различной величины отводимой тепловой мощности Q_N при $T = 300$ К, $\Delta T = 0$ К. С ростом количества термоэлементов n тепловой коэффициент μ увеличивается для различных значений отводимой тепловой мощности Q_N . С ростом величины отводимой тепловой мощности Q_N при заданном количестве термоэлементов n тепловой коэффициент μ уменьшается.

Величину относительного рабочего тока B для различных величин Q_N можно определить из выражения

$$B = 1 - \sqrt{1 - C}, \quad (13)$$

где $C = \frac{Q_N}{nI_{\max}^2 R} = \frac{Q_N}{n\gamma}$;

$$\gamma = I_{\max}^2 R. \quad (14)$$

На рис. 8 представлена зависимость относительного рабочего тока B от количества термоэлементов n для различной отводимой тепловой мощности Q_N при $T = 300$ К, $\Delta T = 0$ К. С ростом количества термоэлементов n относительный рабочий ток B уменьшается для различных Q_N . При заданном количестве термоэлементов n с ростом отводимой тепловой мощности Q_N относительный рабочий ток B увеличивается.

Относительную величину интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ в режиме теплового насоса можно представить в виде [12]:

$$\lambda/\lambda_0 = nB^4 C \quad (15)$$

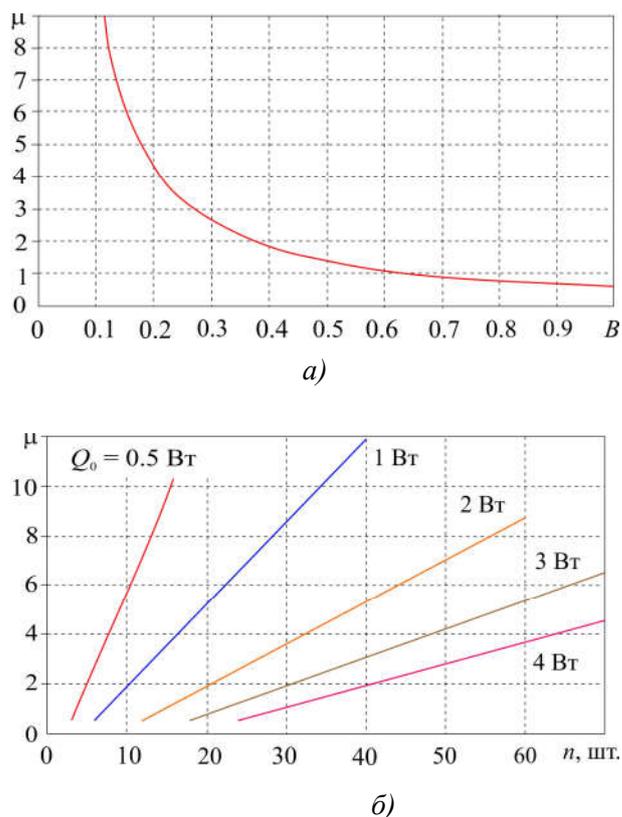


Рис. 7. Зависимость теплового коэффициента μ однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока B (а) и количества термоэлементов n для различных значений отводимой тепловой мощности (б) при $T = 300$ К, $l/s = 20$ в режиме теплового насоса ($\Delta T = 0$ К)

На рис. 9 представлены зависимости относительной величины интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от количества термоэлементов n для различных значений отводимой тепловой мощности Q_N в режиме теплового насоса ($\Delta T = 0$ К).

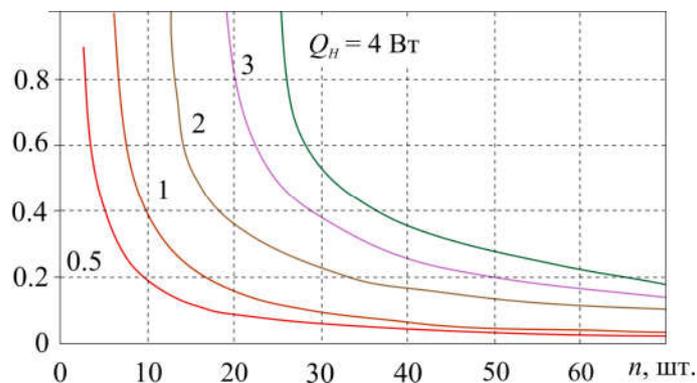


Рис. 8. Зависимость относительного рабочего тока B однокаскадного ТЭУ от количества термоэлементов n при $T = 300$ К, $l/s = 20$ и различных значениях отводимой тепловой мощности Q_N .

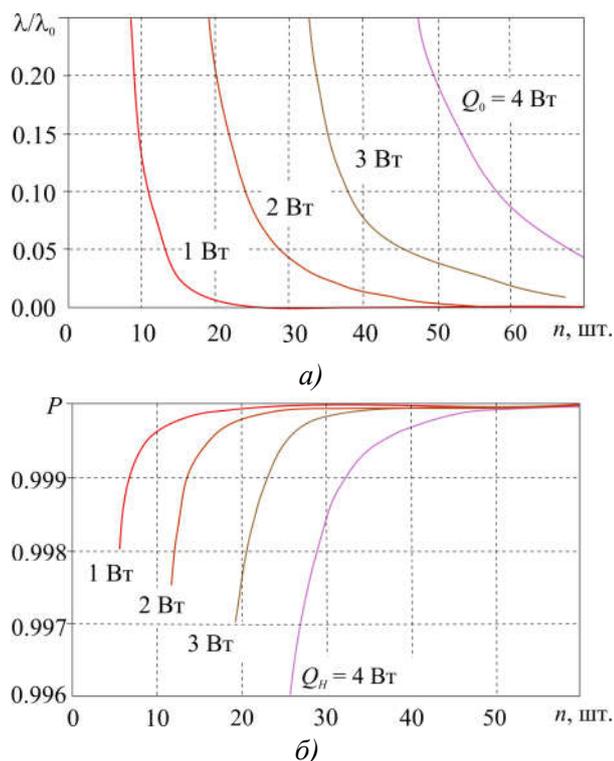


Рис. 9. Зависимость относительной интенсивности отказов λ/λ_0 (а) и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от количества термоэлементов n при $T = 300\text{ K}$, $l/s = 20$, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}\text{ ч}^{-1}$, $t = 10^4$ ч и различных значениях отводимой тепловой мощности в режиме теплового насоса ($\Delta T = 0\text{ K}$).

Рассмотрим влияние геометрии ветвей термоэлементов однокаскадного теплового насоса на его основные параметры и показатели надежности при заданном количестве термоэлементов $n = 27$ в ТЭУ и для различной отводимой тепловой мощности $Q_N = 1.0; 2.2; 2.9; 4.0; 8.8$ Вт.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме теплового насоса приведены в табл. 3.

С ростом количества термоэлементов n интенсивность отказов λ/λ_0 уменьшается. При заданном количестве термоэлементов n интенсивность отказов λ/λ_0 увеличивается при увеличении Q_N от 1.0 до 4.0 Вт. С ростом количества термоэлементов n в ТЭУ вероятность безотказной работы P увеличивается для различных значений Q_N .

При заданном количестве термоэлементов n вероятность безотказной работы P однокаскадного ТЭУ уменьшается с ростом отводимой тепловой мощности Q_N .

Таблица 3

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ для различной геометрии ветвей термоэлементов при $T = 300\text{ K}$, $n = 27$, $Q_n = 2.2\text{ Вт}$, $\bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3}\text{ 1/K}$; $\bar{e} = 2.0 \cdot 10^{-4}\text{ В/K}$; $\bar{\sigma} = 900\text{ См/см}$; $\bar{\lambda} = 15 \cdot 10^{-3}\text{ Вт/(См·K)}$ и различной тепловой нагрузке в режиме теплового насоса ($\Delta T = 0\text{ K}$)

l/s	$R, 10^{-3}\text{ Ом}$	B	$I_{\max},\text{ А}$	$I,\text{ А}$	C	$W,\text{ Вт}$	$U,\text{ В}$	μ	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8,\text{ ч}^{-1}$	P
-------	------------------------	-----	----------------------	---------------	-----	----------------	---------------	-------	---------------------	-------------------------------------	-----

Продолжение таблицы 3

$Q_H = 1.0 \text{ Вт}$											
40.0	44.4	0.26	1.35	0.36	0.458	0.30	0.84	3.3	0.06	0.18	0.999982
30.0	33.3	0.189	1.80	0.34	0.343	0.21	0.61	4.8	0.012	0.036	0.999965
20.0	22.2	0.122	2.70	0.33	0.229	0.13	0.39	7.7	$1.37 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-11}$	0.9999959
10.0	11.1	0.059	5.40	0.32	0.114	0.061	0.19	16.4	$3.73 \cdot 10^{-5}$	$11.2 \cdot 10^{-13}$	≈ 1.0
4.5	5.0	0.026	12.0	0.31	0.0514	0.026	0.085	38.0	$6.3 \cdot 10^{-7}$	$19.0 \cdot 10^{-15}$	≈ 1.0
2.0	2.22	0.0115	27.0	0.305	0.023	0.0116	0.037	86.2	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$3.3 \cdot 10^{-16}$	≈ 1.0
$Q_H = 2.2 \text{ Вт}$											
40.0	44.4	1.0	1.35	1.35	1.0	4.37	3.2	0.50	27.0	81.0	0.9919
30.0	33.3	0.0	1.80	0.90	0.752	1.46	1.62	1.50	1.27	3.81	0.99962
20.0	22.2	0.29	2.70	0.79	0.50	0.735	0.33	3.0	0.0955	0.286	0.9999714
10.0	11.1	0.134	5.40	0.72	0.25	0.314	0.44	7.0	0.0022	0.0065	0.9999935
4.5	5.0	0.058	12.0	0.69	0.113	0.131	0.19	16.7	0.000034	0.0001	0.99999990
2.0	2.22	0.025	2.70	0.68	0.05	0.056	0.082	39.1	$5.53 \cdot 10^{-7}$	$1.65 \cdot 10^{-6}$	$\rightarrow 1.0$
$Q_H = 2.9 \text{ Вт}$											
30.0	33.3	0.93	1.80	1.67	0.996	5.0	3.0	0.58	19.8	59.3	0.9941
20.0	22.2	0.42	2.70	1.13	0.664	1.54	1.36	1.88	0.56	1.67	0.99983
10.0	11.1	0.182	5.40	0.98	0.332	0.58	0.59	5.0	0.01	0.030	0.9999970
4.5	5.0	0.078	12.0	0.94	0.149	0.237	0.25	12.8	$1.49 \cdot 10^{-4}$	0.00045	0.99999956
2.0	2.22	0.034	27.0	0.92	0.0664	0.101	0.11	28.7	$2.4 \cdot 10^{-6}$	$7.2 \cdot 10^{-14}$	$\rightarrow 1.0$
$Q_H = 4.0 \text{ Вт}$											
20.0	22.2	0.708	2.7	1.91	0.915	4.38	2.3	0.91	6.2	18.6	0.9981
10.0	11.1	0.263	5.4	1.42	0.458	1.21	0.85	3.3	0.06	0.18	0.99982
4.5	5.0	0.109	1.0	1.31	0.206	0.46	0.35	8.7	$7.85 \cdot 10^{-4}$	$2.36 \cdot 10^{-12}$	1.0
2.0	2.22	0.047	27.0	1.27	0.0915	0.193	0.152	20.7	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-13}$	1.0
$Q_H = 8.8 \text{ Вт}$											
10.0	11.1	1.0	5.4	5.4	1.0	17.5	3.24	0.50	27.0	81.0	0.9919
4.5	5.0	0.26	12.0	3.12	0.453	2.63	0.84	3.35	0.056	0.17	0.99983
2.0	2.22	1.106	27.0	2.86	0.89	2.21	0.77	4.0	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-12}$	$\rightarrow 1.0$

Анализ результатов расчетов показал, что с уменьшением отношения l/s при заданном n для различной отводимой мощности Q_N в режиме теплового насоса:

- уменьшается относительный рабочий ток B (рис. 10);
- увеличивается максимальный рабочий ток I_{\max} ;
- уменьшается рабочий ток I ;
- уменьшается затраченная мощность W ;
- уменьшается падение напряжения U ;
- увеличивается тепловой коэффициент μ ;

– уменьшается интенсивность отказов λ/λ_0 и увеличивается вероятность безотказной работы P (рис. 11).

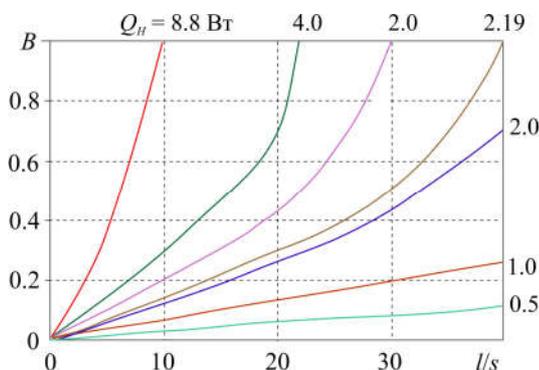
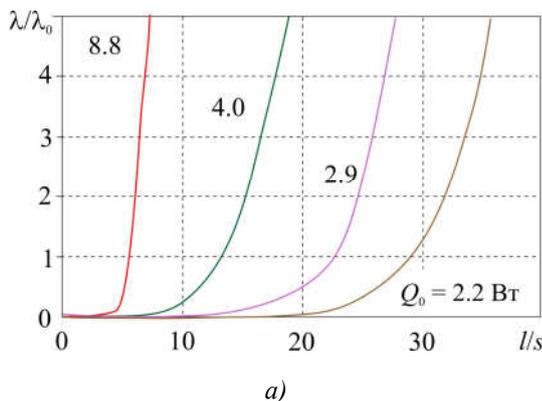
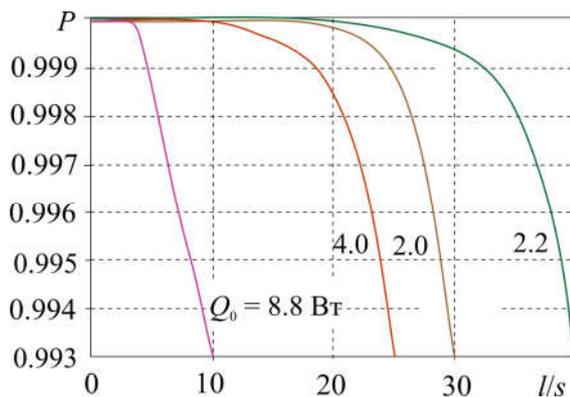


Рис. 10. Зависимость относительного рабочего тока B однокаскадного ТЭУ от отношения l/s при $T = 300\text{ K}$, $n = 27$ и различных значениях отводимой тепловой мощности в режиме теплового насоса ($\Delta T = 0\text{ K}$).



а)



б)

Рис. 11. Зависимость относительной интенсивности отказов λ/λ_0 (а) и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от отношения l/s при $T = 300\text{ K}$, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}\text{ 1/ч}$, $t = 10^4\text{ ч}$, $n = 27$ и различных значениях отводимой тепловой мощности в режиме теплового насоса ($\Delta T = 0\text{ K}$)

Так, например, при необходимости отвода тепловой мощности $Q_N = 2.2\text{ Вт}$ использование модуля М40-27 вместо модуля М30-27 позволяет уменьшить интенсивность отказов λ в 21 раз и при этом в 3 раза уменьшить затраченную мощность.

Обсуждение результатов анализа.

Анализ расчетных данных показал, что:

1. С уменьшением отношения (l/s) ветви термоэлемента однокаскадного ТЭУ для различных перепадов температуры ΔT и заданной тепловой нагрузке Q_0 в режиме λ_{\min} :

- увеличивается максимальная мощность охлаждения γ ;
- уменьшается необходимое количество термоэлементов n ;
- увеличивается величина рабочего тока I ;
- уменьшается величина падения напряжения U ;
- уменьшается интенсивность отказов λ ;
- увеличивается вероятность безотказной работы P .

С ростом перепада температуры ΔT при заданной тепловой нагрузке Q_0 для различных значений отношения l/s ветви термоэлемента однокаскадного ТЭУ в режиме λ_{\min} :

- уменьшается максимальная мощность охлаждения λ ;
- увеличивается необходимое количество термоэлементов $n(Q_{0\max})$; функциональная зависимость $n = f(\Delta T)$ имеет ярко выраженный минимум, что можно объяснить наличием максимума холодопроизводительности при оптимальном ΔT ;
- увеличивается величина рабочего тока I (кроме режима $Q_{0\max}$);
- увеличивается величина падения напряжения U ;
- увеличивается интенсивность отказов λ ;
- уменьшается вероятность безотказной работы P .

2. С уменьшением отношения l/s ветви термоэлемента однокаскадного ТЭУ при $Q_0 = 0$ Вт:

- уменьшается электрическое сопротивление R_B ;
- увеличивается максимальный рабочий ток I_{\max} ;
- максимальный перепад температуры остается постоянным ΔT_{\max} ;
- интенсивность отказов λ остается постоянной величиной при заданном количестве термоэлементов n .

3. С уменьшением отношения l/s ветви термоэлемента однокаскадного ТЭУ при заданном n :

- уменьшается относительный рабочий ток B и величина рабочего тока I ;
- увеличивается тепловой коэффициент μ ;
- уменьшается интенсивность отказов λ и тем самым увеличивается вероятность безотказной работы P .

4. С увеличением количества термоэлементов n в ТЭУ при заданном отношении l/s и тепловой нагрузке Q_N :

- повышается тепловой коэффициент μ ;
- уменьшается относительный рабочий ток B ;
- уменьшается величина рабочего тока I ;

- уменьшается интенсивность отказов λ ;
- увеличивается вероятность безотказной работы P .

Выводы

1. Предложена и обоснована модель взаимосвязи показателей надежности и основных параметров однокаскадного ТЭУ при вариации геометрии ветвей термоэлементов для различных перепадов температуры ΔT при фиксированной тепловой нагрузке для режимов работы λ_{\min} , ΔT_{\max} ($Q_0 = 0$) и теплового насоса ($\Delta T = 0$).
2. Определена возможность повышения показателей надежности однокаскадного ТЭУ, как в режиме λ_{\min} , за счет выбора геометрии ветвей термоэлементов с меньшим отношением l/s .
3. Максимальный перепад температуры ΔT_{\max} не зависит от геометрии ветвей термоэлементов l/s в ТЭУ, а зависит только от термоэлектрической эффективности исходных материалов.
4. Интенсивность отказов λ охлаждающего термоэлемента в режиме ΔT_{\max} не зависит от геометрии ветвей термоэлементов l/s при заданном их количестве n в ТЭУ, а, следовательно, и вероятность безотказной работы P остается постоянной.
5. Для повышения показателей надежности однокаскадного теплового насоса следует использовать термоэлектрические модули с большим количеством термоэлементов n и малым отношением l/s .

Литература

1. Моисеев, В. Ф. Системы обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры специального назначения / В. Ф. Моисеев // ТРИО. – 2003. – Вып. 1. – С. 43–48.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
3. Tsarev, A.V., Chugunkov, V.V. Investigation of thermoelectric devices characteristics for temperature control systems launch facilities. *Actual problems of Russian cosmonautics: Materials of XXXII Academic Conference on Astronautics, Moscow: The Board of RAS*, 2008, 320–321.
4. Rowe, D. M. Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. *Boca Raton: CRC Press*, 2012, 544.
5. Hyoung –Seuk Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of–failure. *Electronic Materials Letter*, 2011, 7, 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. Thermoelectric Mechanical Reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Reviewand Peer Evaluation Meeting. – Arlington*, 2011, 18.
7. Melcor Thermoelectric Cooler Reliability Report. (2002). *Melcor Corporation*, April 9th., 36.
8. Singh, R. (2008). Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxial. *University of California*, 54.
9. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. *Colorado State University*, 2011, 54.
10. Ping Yang. Approach on thermoelectricity reliability of board –level backplane based on the orthogonal experiment design. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 2010, 4(2–4), 170–185.
11. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single–stage cooler. *Eastern –*

European Journal of Enterprise Technologies, 2017, 1/1 (85), P. 26–33.

12. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства / В. П. Зайков, Л. А. Киншова, В. Ф. Моисеев // Одесса: Политехперіодика, 2009 г. – 120 с.

Поступила в редакцию 19.01.2018

V.P.Zaykov¹, *Candidate of Tech. science*,
V.I.Mescheryakov², *Doctor of Tech. science*,
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.

MODEL OF INTERRELATION BETWEEN RELIABILITY INDICATORS OF A SINGLE-STAGE COOLER AND THE GEOMETRY OF THERMOELEMENT LEGS

The paper deals with improving the reliability indicators of a single-stage thermoelectric cooler using a constructive method by developing and analyzing a reliability-oriented model relating reliability indicators to the geometry of thermoelements. The investigations were carried out for various temperature differences, a fixed thermal load for various operating modes. It is shown that with decreasing the ratio of thermoelement height to its cross section, the maximum cooling power is increased, the number of thermoelements is decreased and the probability of failure-free operation is increased. At the same time, the existing technology of manufacturing coolers does not change, the results of existing mechanical and climatic tests, the material of thermoelements, the cost of modules remain unvaried..Bibl. 9, Fig. 2.

Key words: thermoelectric cooler, geometry of thermoelements, reliability indicators, cooling power, temperature difference.

References

1. Moiseev V.F. (2003). Systems for providing of thermal modes for special-purpose radioelectronic equipment. *TRiO*, 1, 43–48 [in Russian].
2. Anatychuk L.I. (1979). Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
3. Tsarev, A.V., Chugunkov, V.V.(2008). Investigation of thermoelectric devices characteristics for temperature control systems launch facilities. *Actual problems of Russian cosmonautics: Materials of XXXII Academic Conference on Astronautics*. Moscow: The Board of RAS [in Russian].
4. Rowe, D. M. (2012). *Thermoelectrics and its energy harvesting. Materials, preparation, and characterization in thermoelectrics*. Boca Raton: CRC Press.

5. Hyoung –Seuk Choi. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and physics –of –failure. *Electronic Materials Letter*, 7, 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. (2011). Thermoelectric mechanical reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Arlington*, 2011.
7. Melcor thermoelectric cooler reliability report. (2002). *Melcor Corporation*, April 9th., 36.
8. Singh, R. (2008). *Experimental characterization of thin film thermoelectric materials and film deposition VIA molecular beam epitaxial*. University of California, 54.
9. Jurgensmeyer, A. L. (2011). *High efficiency thermoelectric devices fabricated using quantum well confinement techniques*. ColoradoStateUniversity, 2011.
10. Ping Yang. (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.
11. Zaikov V., Mescheryakov V., Zhuravlov 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 [in Russian].
12. Zaikov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. (2009). *Prediction of reliability figures of thermoelectric cooling devices. Vol.1. Single-state devices*. Odessa: Politekhperiodica [in Russian].

Submitted 19.01.2018