

АВТОМАТИКА, КОМП'ЮТЕРНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.362.192

Модель взаимосвязи геометрии ветвей термоэлементов и показателей надежности при проектировании двухкаскадных охладителей в режиме минимума интенсивности отказов

Ю. И. Журавлев

Национальный университет «Одесская морская академия», ул. Дидрихсона, 8, Одесса, 65029

Рассмотрен конструктивный метод повышения показателей надежности (интенсивности отказов и вероятности безотказной работы) двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств в режиме минимума интенсивности отказов. В двухкаскадных охлаждающих устройствах существенно взаимное влияние каскадов, повышение перепада температур, поэтому требуется анализ связи показателей надежности с энергетическими показателями и конструктивными параметрами охладителя. Вероятность безотказной работы охладителя обусловлена, в первую очередь, термоэлектрическими элементами, поскольку их количество значительно, они включены последовательно, а результирующая вероятность безотказной работы определяется произведением вероятностей всех составляющих термоэлементов. Основным параметром термоэлектрического элемента является «геометрия» – отношение высоты термоэлемента к площади его поперечного сечения. Целью исследований явилось повышение показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства за счет вариации геометрии термоэлементов и их распределений в каскадах в рабочем диапазоне перепадов температур функционирования охладителя в режиме минимума интенсивности отказов. Для достижения этой цели решены задачи: создание модели связи показателей надежности с конструктивными параметрами и энергетическими показателями охладителя; определение значений показателей надежности термоэлектрического охладителя при различных значениях геометрии термоэлементов, перепадов температур и тепловой нагрузки. Разработана математическая модель двухкаскадного термоэлектрического охладителя, связывающая показатели надежности с энергетическими показателями и конструктивными параметрами термоэлементов в рабочем диапазоне температур функционирования изделия, обеспечивающая возможность проектирования термоэлектрических охладителей повышенной надежности. Анализ результатов моделирования показал, что при заданном перепаде температур и тепловой нагрузке уменьшение отношения высоты термоэлемента к его поперечному сечению: увеличивается величина максимального рабочего тока в каскадах; уменьшается суммарное количество термоэлементов; уменьшается общее падение напряжения; уменьшается интенсивность отказов и увеличивается вероятность безотказной работы термоэлектрического охладителя. С ростом температуры для различных значений геометрии термоэлементов и заданной тепловой нагрузке: уменьшаются холодильный коэффициент; увеличивается отношение количества термоэлементов в каскадах; увеличивается относительный перепад температуры в каскадах и рабочий ток; увеличивается интенсивность отказов. Отношение количества термоэлементов в каскадах существенно зависит от перепада температур с резким возрастанием при больших перепадах температур. Суммарное количество термоэлементов в диапазоне умеренных перепадов температур изменяется незначительно, однако существенно зависит от геометрии ветвей термоэлементов. Зависимость относительной интенсивности отказов от перепада температур имеет явно выраженный нелинейный характер и возрастает в диапазоне высоких температурных перепадов. Практическим результатом исследований явилось то, что для двухкаскадных охладителей с одинаковой геометрией ветвей термоэлементов в каскадах уменьшением отношения высоты термоэлемента к площади поперечного сечения можно в 2–10 раз уменьшить интенсивность отказов и повысить вероятность безотказной работы.

Ключевые слова: Интенсивность отказов; Термоэлементы; Каскады; Перепад температуры

Модель взаємозв'язку геометрії гілок термоелементів і показників надійності при проектуванні двокаскадних охолоджувачів в режимі мінімуму інтенсивності відмов

Ю. І. Журавльов

Національний університет «Одеська морська академія», вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна

Розглянуто конструктивний метод підвищення показників надійності (інтенсивності відмов і вірогідності безвідмовної роботи) двокаскадних термоелектричних охолоджувачів пристроїв в режимі мінімуму інтенсивності відмов. В двокаскадних термоелектричних охолоджувачів суттєвий взаємний вплив каскадів, підви-

щення перепаду температур, що потребує аналізу зв'язку показників надійності з енергетичними показниками і конструктивними параметрами охолоджувача. Вірогідність безвідмовної роботи охолоджувача обумовлена, в першу чергу, термоелектричними елементами, оскільки їх кількість значна, вони підключені послідовно, а результуюча вірогідність безвідмовної роботи визначається множенням вірогідності всіх складових термоелементів. Основним параметром термоелектричного елемента є "геометрія" – відношення висоти термоелементу до площі поперечного перерізу. Метою досліджень явилось підвищення показників надійності двокаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою за рахунок варіації геометрії термоелементів і їх розподілу в каскадах у робочому діапазоні перепадів температур функціонування охолоджувача в режимі мінімуму інтенсивності відмов. Для досягнення цієї мети вирішені задачі: створення моделі зв'язку показників надійності з конструктивними параметрами і енергетичними показниками охолоджувача; визначення значень показників надійності термоелектричного охолоджувача при різних значеннях геометрії термоелементів, перепадів температур і теплового навантаження. Розроблена математична модель двокаскадного термоелектричного охолоджувача, яка зв'язує показники надійності з енергетичними показниками і конструктивними параметрами термоелементів в робочому діапазоні температур функціонування виробу, що забезпечує можливість проектування термоелектричних охолоджувачів підвищеної надійності. Аналіз моделювання показав, що при заданому перепаді температур і теплового навантаження зменшення відношення висоти термоелементу до його поперечного перерізу: збільшується величина максимального робочого струму в каскадах; зменшується сумарна кількість термоелементів; зменшується загальне падіння напруги; зменшується інтенсивність відмов і зростає вірогідність безвідмовної роботи термоелектричного охолоджувача. З ростом температури для різних значень геометрії термоелементів і заданого теплового навантаження: зменшується холодильний коефіцієнт; зростає відношення кількості термоелементів в каскадах; зростає відносний перепад температури в каскадах і робочий струм; зростає інтенсивність відмов. Відношення кількості термоелементів в каскадах суттєво залежить від перепаду температури з різким зростанням при великих перепадах температур. Сумарна кількість термоелементів в діапазоні помірних перепадів температур змінюється незначно, але суттєво залежить від геометрії гілок термоелементів. Залежність відносної інтенсивності відмов від перепаду температур має явно виражений нелінійний характер і зростає в діапазоні високих температурних перепадів. Практичним результатом досліджень явилось те, що для двокаскадних охолоджувачів з однаковою геометрією гілок термоелементів в каскадах зменшення відношення висоти термоелементу до площі поперечного перерізу можна в 2–10 разів зменшити інтенсивність відмов і підвищити вірогідність безвідмовної роботи.

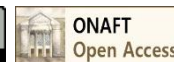
Ключові слова: Інтенсивність відмов; Термоелементи; Каскади; Перепад температури

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i4.710>

© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1 Введение

Термоэлектрические охладители систем обеспечения тепловых режимов теплонагруженной радиоэлектронной аппаратуры часто работают в условиях повышенных тепловых нагрузок, что снижает их показатели надежности. Кроме тепловой нагрузки на показатели надежности оказывает влияние и генерируемый перепад температур, режимы работы, конструктивные особенности устройства. Для обеспечения большего перепада температур используют каскадирование, поэтому требования к двухкаскадным термоэлектрическим охладителям оказываются более жесткими по сравнению с однокаскадными.

Анализ литературных источников показал, что проблеме повышения показателей надежности уделяется значительное внимание [1–3]. Рассмотрено влияние технологии изготовления [4], механических [5] и температурных параметров [6], влажности [7], условий эксплуатации термоэлектрических охладителей на всех этапах жизненного цикла [8]. Вместе с тем, этап проектирования является наиболее значимым, поскольку на всех последующих этапах жизненного цикла устройство только расходует потенциальные ресур-

сы надежности. Проблема повышения показателей надежности является фундаментальной. Основное внимание при решении этой проблемы уделялось влиянию энергетических показателей, конструктивные параметры рассмотрены не достаточно. Поэтому подход, основанный на исследовании влияния конструктивных особенностей термоэлементов и их распределения в каскадах, на показатели надежности термоэлектрического охладителя представляется актуальным.

В отличие от однокаскадных охладителей [9] в двухкаскадных существенно взаимное влияние каскадов, повышение перепада температур, что требует дополнительных исследований связи показателей надежности с энергетическими и конструктивными параметрами охладителя.

Целью работы является повышение показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства за счет вариации геометрии термоэлементов и их распределений в каскадах в режиме минимума интенсивности отказов.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать модель связи показателей надежности с геометрией ветвей термоэлементов и их распреде-

лением в каскадах для различных перепадов температуры и фиксированной тепловой нагрузки;

– определить возможность повышения показателей надежности двухкаскадного охладителя в рабочем диапазоне.

2 Разработка модели связи параметров геометрии ветвей термоэлементов с показателями надежности двухкаскадных охладителей в режиме минимума интенсивности отказов

Одним из методов повышения показателей надежности охлаждающих термоэлектрических устройств (ТЭУ) является конструктивный. Для построения каскадных термоэлектрических охлаждающих устройств повышенной надежности в рамках использования конструктивного метода необходимо исследовать влияние геометрии ветвей термоэлементов в каскадах на основные параметры и показатели надежности. В данной работе проведен такой анализ для режима λ_{\min} при условии $(l/S)_1 = (l/S)_2 = 40; 20; 10; 4,5; 2,0$ (где l, S — высота и площадь поперечного сечения ветви в каскаде) для различных значений перепада температуры ΔT и тепловой нагрузке $Q_0 = 2,0$ Вт.

Для проведения вычислений воспользуемся соотношениями, приведенными в [10].

Как известно, холодопроизводительность двухкаскадного ТЭУ определяется первым каскадом

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1) = n_1 \gamma_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1), \quad (1)$$

где n_1 — количество термоэлементов в первом каскаде, шт;

$I_{\max 1} = \frac{\bar{e}_1 T_0}{R_1}$ — максимальный рабочий ток первого каскада, А;

када, А;

\bar{e}_1, R_1 — усредненное значение коэффициента термоЭДС, В/К, и электрическое сопротивление, Ом, первого каскада, $R_1 = l_1 / (\bar{\sigma}_1 S_1)$;

$\bar{\sigma}_1$ — усредненное значение электропроводности ветви термоэлемента, См/см;

T_0 — температура теплопоглощающего спая, К;

B_1 — относительный рабочий ток первого каскада, $B_1 = I / I_{\max 1}$;

I — величина рабочего тока, А;

Θ_1 — относительный перепад температуры первого каскада $\Theta_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max 1}} = \frac{T_1 - T_0}{0,5 \bar{z}_1 T_0^2}$;

T_1 — промежуточная температура, К;

\bar{z}_1 — усредненное значение эффективности термоэлектрического материала первого каскада, 1/К;

γ_1 — максимальная термоэлектрическая мощность охлаждения первого каскада, Вт,

$\gamma_1 = I_{\max 1}^2 R_1 = \bar{e}_1^2 \bar{\sigma}_1 T_0^2 (S/l)_1$;

$$\lambda / \lambda_0 = n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left(\frac{B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \Theta_1}{T_0}}{1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \Theta_1}{T_0}} \right)^2 K_{T1} + n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left(\frac{B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2} \Theta_2}{T_1}}{1 + \frac{\Delta T_{\max 2} \Theta_2}{T_1}} \right)^2 K_{T2}, \quad (9)$$

$\Delta T_{\max 1}$ — максимальный перепад температуры первого каскада, К, $\Delta T_{\max 1} = 0,5 \bar{z}_1 T_0^2$.

При последовательном электрическом соединении каскадов

$$I_{\max 1} B_1 = I_{\max 2} B_2 = I, \quad (2)$$

где $I_{\max 2}$ — максимальный рабочий ток второго каскада, А,

$$I_{\max 2} = \frac{\bar{e}_2 T_1}{R_2};$$

R_2 — электрическое сопротивление ветви термоэлемента второго каскада, Ом,

$$R_2 = l_2 / (\bar{\sigma}_2 S_2);$$

$\bar{\sigma}_2$ — усредненная электропроводность ветви термоэлемента второго каскада, См/см;

B_2 — относительный рабочий ток второго каскада,

$$B_2 = I / I_{\max 2}.$$

Количество термоэлементов в смежных каскадах соотносятся следующим образом:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 (1 + (\Delta T_{\max 1} / T_0) \Theta_1) + B_1^2 - \Theta_1)}{I_{\max 2}^2 R_2 (2B_2 - B_2^2 - \Theta_2)}, \quad (3)$$

где $\Theta_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max 2}} = \frac{T - T_1}{0,5 \bar{z}_2 T_1^2}$ — относительный перепад температуры во втором каскаде;

температуры во втором каскаде;

T — температура тепловыделяющего спая, К;

$\Delta T_{\max 2}$ — максимальный перепад температуры второго каскада, $\Delta T_{\max 2} = 0,5 \bar{z}_2 T_1^2$, К;

\bar{z}_2 — усредненное значение эффективности термоэлектрического материала второго каскада, 1/К.

Мощность потребления первого и второго каскадов, соответственно, можно записать в виде

$$W_1 = 2n_1 I_{\max 1}^2 R_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \Theta_1}{T_0} \right); \quad (4)$$

$$W_2 = 2n_2 I_{\max 2}^2 R_2 B_2 \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2} \Theta_2}{T_1} \right). \quad (5)$$

Общая мощность потребления двухкаскадного ТЭУ составляет

$$W_{\Sigma} = W_1 + W_2; \quad (6)$$

Холодильный коэффициент E двухкаскадного ТЭУ можно записать как

$$E = Q_0 / W_{\Sigma}. \quad (7)$$

Падение напряжения на двухкаскадном ТЭУ

$$U_{\Sigma} = W_{\Sigma} / I; \quad (8)$$

Относительную величину интенсивности отказов λ / λ_0 двухкаскадного ТЭУ можно представить в виде суммы интенсивностей отказов каскадов:

где C_1 и C_2 – относительная величина тепловой нагрузки первого и второго каскадов соответственно, $C_1 = Q_0/(n_1 I_{\max 1}^2 R_1)$, $C_2 = (Q_1 + W_1)/(n_2 I_{\max 2}^2 R_2)$; K_{T1} и K_{T2} – коэффициент значимости, зависящий от температуры [10]; λ_0 – номинальная интенсивность отказов, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч.

Вероятность безотказной работы P двухкаскадного ТЭУ можно представить в виде:

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (10)$$

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

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного охладителя при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт, $(I/S)_1 = (I/S)_2 = I/S = \text{var}$ для различных значений ΔT в режиме λ_{\min}

I/S	$R_1 \cdot 10^3$, Ом	$R_2 \cdot 10^3$, Ом	$I_{\max 1}$, А	$I_{\max 2}$, А	I , А	n_1 , шт.	n_2 , шт.	$n_1 + n_2$, шт.	U_1 , В	U_2 , В	U_{Σ} , В	λ / λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
$\Delta T = 60$ К														
$T_1 = 267$ К; $B_1 = 0,328$; $B_2 = 0,316$; $\Theta_1 = 0,426$; $\Theta_2 = 0,389$; $K_{T1} = 1,035$; $K_{T2} = 1,018$; $W_1 = 4,74$ Вт; $W_2 = 13,1$ Вт; $W_{\Sigma} = 17,9$ Вт; $E = 0,112$; $n_2/n_1 = 2,28$														
40	36,4	42,6	1,185	1,23	0,39	320	729,6	1050	12,2	33,6	45,8	9,22	27,7	0,9972
20	18,2	21,3	2,37	2,46	0,78	160,4	366,5	526,9	6,1	16,8	22,9	4,61	13,8	0,99862
10	9,09	10,64	4,75	4,92	1,56	80	181	261	3,04	8,4	11,41	2,3	6,9	0,99931
4,5	4,09	4,79	10,56	10,9	3,46	35,9	81,6	117,6	1,37	3,78	5,15	1,0	3,1	0,99969
2,0	1,82	2,13	23,7	24,6	7,8	16,0	36,5	52,5	0,61	1,68	2,29	0,455	1,37	0,99986
$\Delta T = 70$ К														
$T_1 = 262$ К; $B_1 = 0,455$; $B_2 = 0,436$; $\Theta_1 = 0,562$; $\Theta_2 = 0,469$; $K_{T1} = 1,043$; $K_{T2} = 1,021$; $W_1 = 7,67$ Вт; $W_2 = 23,0$ Вт; $W_{\Sigma} = 30,67$ Вт; $E = 0,0652$; $n_2/n_1 = 2,44$														
40	34,8	42,0	1,165	1,215	0,53	300,4	733	1033	14,5	43,4	57,9	37,4	112,2	0,98884
20	17,4	21,0	2,33	2,43	1,06	150,2	366,0	516,3	7,23	21,7	28,9	18,7	56,1	0,99440
10	8,7	10,53	4,65	4,85	2,12	75,4	183,0	258,5	3,62	10,8	14,5	9,36	28,1	0,9972
4,5	3,91	4,47	10,35	10,78	4,71	33,9	82,0	115,9	1,63	4,88	6,5	4,23	12,7	0,99873
2,0	1,74	2,10	23,3	24,3	10,6	15,0	36,6	51,6	0,72	2,17	2,9	1,87	5,62	0,99944
$\Delta T = 80$ К														
$T_1 = 256$ К; $B_1 = 0,63$; $B_2 = 0,59$; $\Theta_1 = 0,716$; $\Theta_2 = 0,571$; $K_{T1} = 1,052$; $K_{T2} = 1,024$; $W_1 = 13,6$ Вт; $W_2 = 53,8$ Вт; $W_{\Sigma} = 67,4$ Вт; $E = 0,0297$; $n_2/n_1 = 3,1$														
40	33,3	41,7	1,12	1,19	0,71	325,0	1008	133,3	19,2	75,8	95,0	183,0	549	0,9466
20	16,67	20,83	2,24	2,38	1,41	162,5	502,2	664,7	9,65	38,1	47,8	91,5	274,4	0,9729
10	8,33	10,42	4,49	4,77	2,83	81,0	250,1	331,1	4,82	19,03	23,8	45,6	136,7	0,9864
4,5	3,75	4,69	9,97	10,6	6,28	40,5	125,5	166,0	2,17	8,56	10,7	22,8	68,5	0,99317
2,0	1,67	2,08	22,4	23,9	14,1	16,2	50,3	66,5	0,965	3,82	4,78	9,0	27,1	0,9973
$\Delta T = 90$ К														
$T_1 = 250$ К; $B_1 = 0,874$; $B_2 = 0,80$; $\Theta_1 = 0,907$; $\Theta_2 = 0,684$; $K_{T1} = 1,062$; $K_{T2} = 1,024$; $W_1 = 48,3$ Вт; $W_2 = 291,0$ Вт; $W_{\Sigma} = 339,0$ Вт; $E = 0,0059$; $n_2/n_1 = 4,6$														
40	32,0	40,8	1,08	1,175	0,94	701,4	3226	3928	51,4	309,6	361	1849	5548	0,5742
20	16,0	20,4	2,15	2,35	1,88	350,7	1613	1964	25,7	154,6	180,3	924,6	2774	0,7578
10	8,0	10,2	4,30	4,71	3,76	175,4	808	983,0	12,8	77,3	90,1	463	1388	0,8704
4,5	3,6	4,6	9,57	10,46	8,4	78,9	363	441,8	5,78	34,8	40,6	208	624	0,9395
2,0	1,60	2,04	21,5	23,5	18,8	35,1	161,5	196,6	2,57	15,5	18,0	92,9	278,7	0,9725

3 Анализ результатов моделирования связи параметров геометрии ветвей термозлементов с показателями надежности двухкаскадных охладителей

Анализ результатов расчета основных параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при заданном перепаде температуры ΔT и тепловой нагруз-

ке Q_0 в режиме λ_{\min} показывает, что с уменьшением отношения I/S :

- увеличивается величина максимального рабочего тока $I_{\max 1}$ и $I_{\max 2}$ в каскадах;
- уменьшается электрическое сопротивление ветвей термозлементов в каскадах R_1 и R_2 ;
- увеличивается рабочий ток I ;

- уменьшается суммарное количество термоэлементов $n_1 + n_2$;
- уменьшается общее падение напряжения U_{Σ} ;
- уменьшается интенсивность отказов λ , так при $\Delta T = 60$ К с уменьшением l/S от 20 до 2 интенсивность отказов уменьшается в 10 раз;
- увеличивается вероятность безотказной работы P .

При заданном перепаде температуры ΔT , тепловой нагрузке Q_0 и $(l/S)_1 = (l/S)_2 = \text{const}$ промежуточная температура T_1 , относительные перепады температуры в каскадах Θ_1 и Θ_2 , относительный рабочий ток в каскадах B_1 и B_2 , отношение количества термоэлементов в смежных каскадах n_1/n_2 , общая потребляемая мощность W_{Σ} , холодильный коэффициент E не зависят от геометрии ветвей термоэлементов.

С ростом перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/S при заданной тепловой нагрузке Q_0 :

- уменьшается промежуточная температура T_1 (рисунок 1, кривая 1);
- уменьшается холодильный коэффициент E (рисунок 1, кривая 2);
- увеличивается отношение количества термоэлементов в каскадах (рисунок 1, кривая 3);
- увеличивается относительный рабочий ток в каскадах B_1 и B_2 (рисунок 2);
- увеличивается относительный перепад температуры в каскадах Θ_1 и Θ_2 (рисунок 3);
- увеличивается рабочий ток I (рисунок 4);
- увеличивается падение напряжения U_{Σ} (рисунок 5);
- функциональная зависимость суммарного количества термоэлементов $n_1 + n_2$ имеет слабо выраженный минимум при $\Delta T = 70$ К (рисунок 6);
- увеличивается интенсивность отказов λ/λ_0 (рис. 7);
- уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 8).

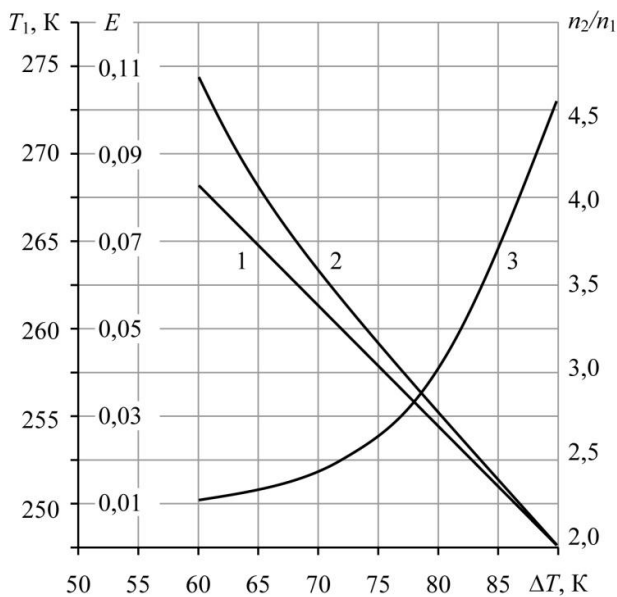


Рисунок 1 – Зависимость промежуточной температуры T_1 (1), холодильного коэффициента E (2) и отношения n_1/n_2 (3) двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт в режиме λ_{\min}

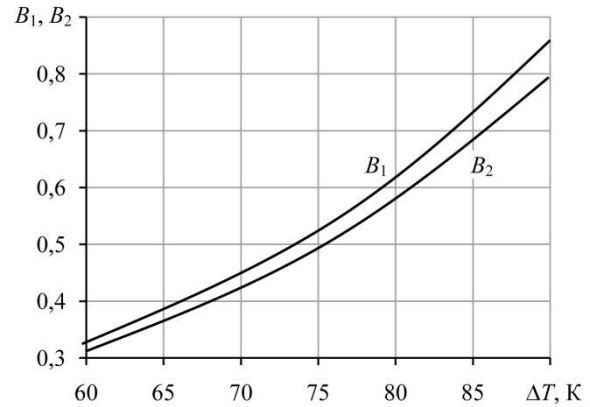


Рисунок 2 – Зависимость относительного рабочего тока в каскадах двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт в режиме λ_{\min}

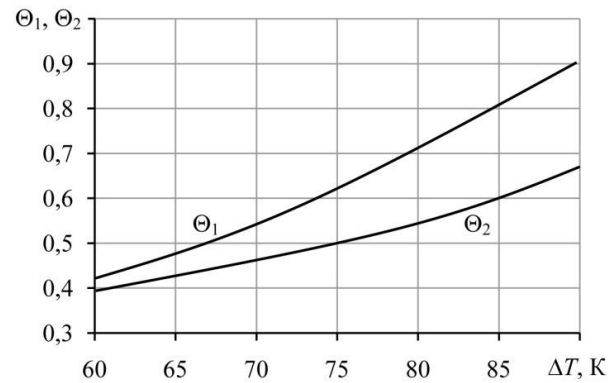


Рисунок 3 – Зависимость относительного перепада температуры в каскадах двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт в режиме λ_{\min}

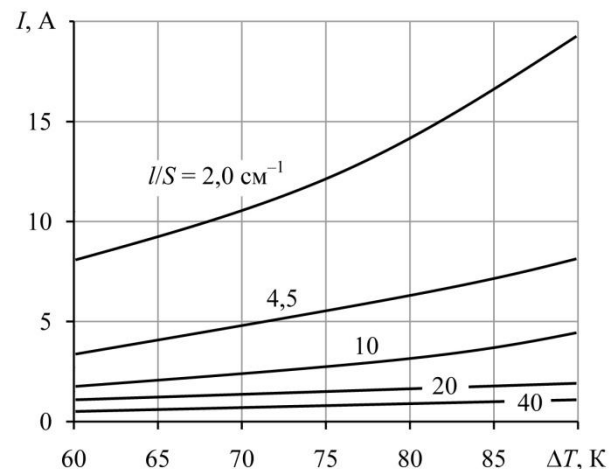


Рисунок 4 – Зависимость рабочего тока I двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/S при $T = 300$ К; $Q_0 = 2,0$ Вт в режиме λ_{\min}

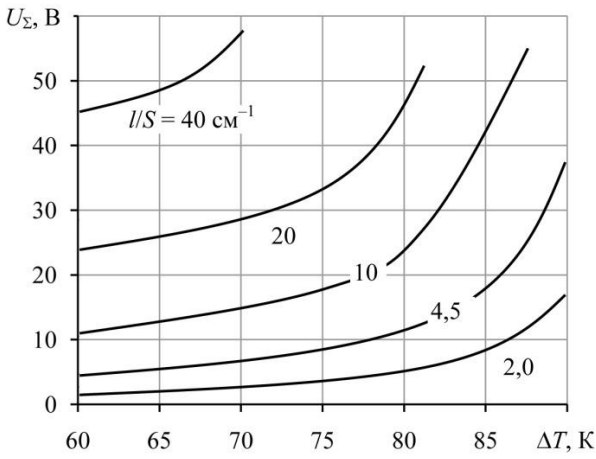


Рисунок 5 – Зависимость общего падения напряжения U_{Σ} (б) двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/s при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 2,0 \text{ Вт}$ в режиме λ_{\min}

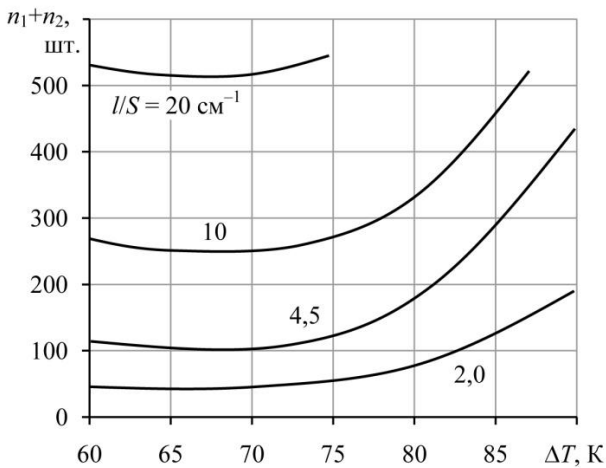


Рисунок 6 – Зависимость суммарного количества термоэлементов двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/s при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 2,0 \text{ Вт}$ в режиме λ_{\min}

Из приведенных графических зависимостей следует, что отношение количества термоэлементов в каскадах существенно зависит от перепада температуры с резким ростом на высоких перепадах температур (рисунок 1). Суммарное количество термоэлементов (рисунок 6) в диапазоне умеренных перепадов температур изменяется незначительно, однако существенно зависит от геометрии ветвей термоэлементов.

Зависимость относительной интенсивности отказов от перепада температур имеет явно выраженный нелинейный характер и возрастает в диапазоне высоких температурных перепадов, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации охладителей в режиме минимума интенсивности отказов.

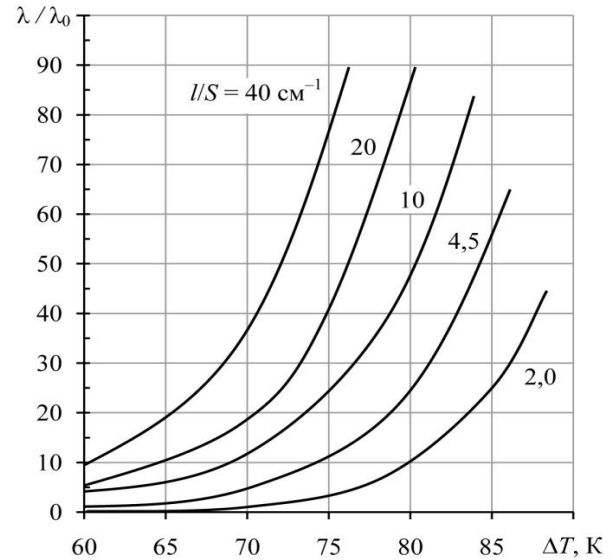


Рисунок 7 – Зависимость относительной интенсивности отказов λ / λ_0 двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT для различных значений l/s ; $t = 10^4 \text{ ч}$ в режиме λ_{\min} .

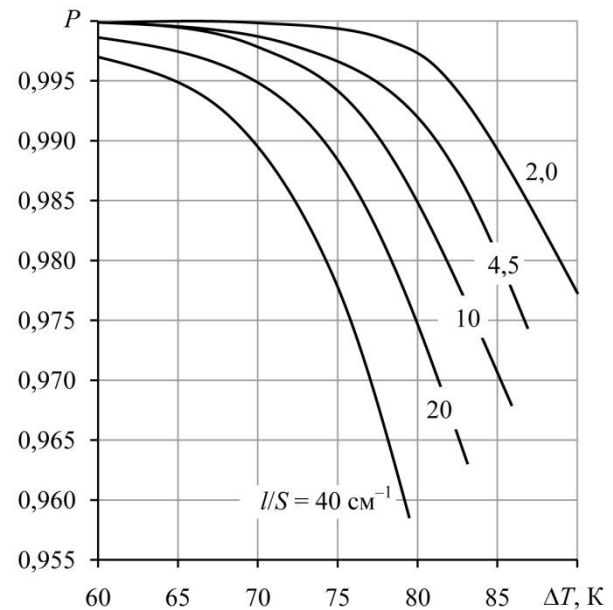


Рисунок 8 – Зависимость вероятности безотказной работы P (б) двухкаскадного охладителя от перепада температуры ΔT для различных значений l/s ; $t = 10^4 \text{ ч}$ в режиме λ_{\min} .

Выводы

1. Разработана надежно-ориентированная модель двухкаскадного термоэлектрического охладителя, связывающая показатели надежности с энергетическими показателями и конструктивными параметрами термоэлементов;

2. Анализ модели свидетельствует о том, что при построении двухкаскадных ТЭУ с одинаковой геометрией ветвей термоэлементов в каскадах $(l/s)_1 = (l/s)_2$

уменьшением отношения l/S можно значительно (в 2-10 раз в зависимости от перепада температуры ΔT) уменьшить интенсивность отказов λ/λ_0 при заданной тепловой нагрузке в режиме λ_{\min} .

Литература

1. 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.
2. Rowe, D. M. Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics / D. M. Rowe // Boca Raton: CRC Press, 2012. – 544 p.
3. 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. 170–185.
4. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques / A. L. Jurgensmeyer // *Colorado State University*, 2011. – 54 p.
5. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability / A. A. Wereszczak, H. Wang // *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. – Arlington, 11 May 2011. – P. 18.
6. Melcor Thermoelectric Cooler Reliability Report // Melcor Corporation, April 9th., 2002. – 36 p.
7. Царев, А.В. Исследование характеристик термоэлектрических устройств для систем термостатирования стартовых комплексов / А.В. Царев, В.В. Чугунков // Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXII академического чтения по космонавтике – М.: Комиссия РАН, 2008. – С. 320–321.
8. 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.
9. 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*, 1/1 (85), 2017. – P. 26–33.
10. Зайков, В.П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 2. Каскадные устройства / В.П. Зайков, В.И. Мещеряков, Ю.И. Журавлев // Одесса: Политехперіодика, 2016. – 124 с.

Отримана в редакції 04.05.2017, прийнята до друку 06.06.2017

Model of Thermoelements Branches Geometry Interaction and Reliability Indicators in Design of Two-Cascade Coolers in the Minimum Failures Intensity Mode

Yu. Zhuravlov

National University «Odessa Maritime Academy», str. Didrikhsona, 8, Odessa, 65029, Ukraine

A constructive method for increasing reliability indicators (failure rate and probability of failure-free operation) of two-stage thermoelectric cooling devices in the mode of minimum failure rate is considered. In two-stage cooling devices, the mutual influence of cascades, the increase in the temperature difference, is essential, which requires an analysis of the relationship between the reliability indexes and the energy parameters and design parameters of the cooler. The probability of failure-free operation of the cooler is due, first of all, to thermoelectric elements, since their quantity is significant, they are connected in series, and the resulting probability of failure-free operation is determined by the product of the probabilities of all thermoelements. The main parameter of the thermoelectric element is the "geometry" - the ratio of the height of the thermoelement to its cross-sectional area. The purpose of the research was to increase the reliability of a two-stage thermoelectric cooling device due to the variation in the geometry of the thermoelements and their distributions in the cascades in the operating range of the temperature gradients of the cooler in the mode of the minimum failure rate. To achieve this goal, the following tasks have been accomplished: creating a model for linking reliability indicators with design parameters and energy parameters of the cooler; determination of values of reliability indexes of a thermoelectric cooler for different values of thermoelements geometry, temperature differences and thermal load. A mathematical model of a two-stage thermoelectric cooler has been developed, linking reliability indicators with energy parameters and design parameters of thermoelements in the operating temperature range of the product, providing the possibility of designing thermoelectric coolers of increased reliability. Analysis of simulation results showed that for a given temperature difference and heat load in the ratio of the height of the thermoelement to its cross section decreases; the maximum operating current in cascades increases; the total number of thermoelements decreases; the total voltage drop decreases; the failure rate decreases and the probability of failure-free operation of the thermoelectric cooler increases. With increasing of temperature for different values of the geometry of thermoelements and a given heat load the refrigerating coefficient is decreased; the ratio of the number of thermoelements in cascades increases; the relative temperature drop in the cascades and the operating current increase; the intensity of failures increases. The ratio of the number of thermoelements in the cascades depends significantly on the temperature drop with a sharp increase at large temperature changes. The total number of thermoelements in the range of moderate temperature changes varies insignificantly, but it depends significantly on the geometry of

the branches of the thermoelements. The dependence of the relative failure rate on the temperature difference has a clearly pronounced nonlinear character and increases in the range of high temperature changes. The practical result of the research was that for two-stage coolers with the same geometry of the branches of thermoelements in cascades, by reducing the ratio of the height of the thermoelement to the cross-sectional area, the failure rate and the probability of failure-free operation can be reduced by a factor of 2-10.

Keywords: Failure Rate; Thermoelements; Cascades; Temperature Drop

References

1. 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.
2. Rowe, D. M. (2012). Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press, 544.
3. 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.
4. Jurgensmeyer, A. L. (2011). High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. Colorado State University, 54.
5. Wereszczak A. A., Wang H. Thermoelectric Mechanical Reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. – Arlington, 18.
6. Melcor Thermoelectric Cooler Reliability Report. (2002). Melcor Corporation, April 9th., 36.
7. 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*. – M.: The Board of RAS, 320–321.
8. Hyoung-Seuk Choi. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics-of-failure. *Electronic Materials Letter*, 7, 271.
9. Zaykov 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.
10. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. (2016). Prediction of reliability on thermoelectric cooling devices. Book 2. Cascade devices. Odessa: Politehperiodika, 124.

Received 04 May 2017
Approved 06 June 2017
Available in Internet 03 July 2017