

УДК 621.362.192

Зайков В.П.

Научно-исследовательский институт «ШТОРМ»

Мещеряков В.И.

Одесский государственный экологический университет

Журавлев Ю.И.

Национальный университет «Одесская морская академия»

ДИНАМИКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Рассмотрено влияние конструктивных и технологических элементов на основные параметры, показатели надежности и динамику функционирования термоэлектрических охлаждающих устройств в характерных токовых режимах в диапазоне рабочих перепадов температуры и тепловой нагрузки при заданной геометрии ветвей термоэлементов. Проведена оценка времени выхода на стационарный режим охладителя во взаимосвязи с основными параметрами и показателями надежности.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, время выхода на стационарный режим, геометрия ветвей термоэлементов.

Постановка проблемы. Передаточные характеристики и показатели надежности полупроводниковых элементов существенно зависят от температурных условий их функционирования. Повышение температуры на 10°C практически удваивает интенсивность отказов. Теплонагруженные элементы современной радиоэлектронной аппаратуры (полупроводниковые лазеры, приемники интенсивного инфракрасного излучения, процессоры, выходные каскады силовых приборов и т.п.) работают в условиях, предполагающих необходимость отвода от них избыточной тепловой энергии. К системам обеспечения их тепловых режимов теплонагруженных элементов предъявляются требования по отводу необходимой энергии на заданном временном интервале, а также показателям надежности, поскольку при выходе из строя системы обеспечения теплового режима автоматически выходит из строя и сам теплонагруженный элемент. Если же речь идет о критической системе (бортовой информационной системе летательного аппарата, управляющей системе транспортного средства и т.п.), то нарушение ее нормального функционирования может привести к значительным не только материальным затратам, не соизмеримым со стоимостью теплонагруженного элемента. Проблема состоит в том, что условия эксплуатации таких элементов постоянно ужесточаются в направлении быстрого действия и плотности мощности поглощения или выделения, что приводит к снижению их надежности, а требования к повышению надежности аппаратуры, в состав которой входят эти элементы, постоянно возрастают.

Анализ последних достижений и публикаций.

Термоэлектрические охладители (ТЭУ) относятся к перспективным устройствам обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры [1]. Этот выбор обусловлен малыми габаритами и массой, отсутствием подвижных частей [2], приводит к повышенным динамическим характеристикам [3] и показателям надежности [4] по сравнению с компрессионными системами. Вместе с тем повышение требований к надежности и быстродействию бортовых информационных систем, работающих в экстремальных режимах, требует повышения этих показателей и у систем обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов, являющихся их необходимой составляющей [5]. Работы в этом направлении идут по пути учета влияния на показатели надежности конструктивных и технологических показателей [6], тепловой нагрузки [7], материала термоэлементов [8], технологии изготовления термоэлектрических охладителей [9].

В ряде случаев проектирования ТЭУ одним из основных требований является обеспечение заданного времени выхода на стационарный режим работы и возможность его сокращения без учета массы m_0 и теплоемкости C_0 объекта охлаждения. Для этого рассмотрим динамическую составляющую ТЭУ для случая, когда учитывается только масса и теплоемкость конструктивных и технологических элементов (КТЭ) на теплопоглощающем спае ТЭУ.

Формулирование целей статьи. Целью работы является определение динамических

параметров ТЭУ и возможность их минимизации для различных перепадов температуры, тепловой нагрузки и токовых режимов работы при заданной геометрии ветвей термоэлементов.

Изложение основного материала. В работе [10] получены соотношения для определения времени выхода на стационарный режим работы τ , где достаточно полно описаны КТЭ и их методы расчета для геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 10 \text{ см}^{-1}$. Поэтому не вызывает затруднений оценить массу и теплоемкость КТЭ при $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$

Кроме того, воспользуемся соотношением для определения времени выхода на стационарный режим работы τ во взаимосвязи с относительным рабочим током B и суммарной величиной произведения теплоемкости и массы составляющих КТЭ при заданной геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$

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

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

• $m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$ – суммарная величина произведения теплоемкости и массы составляющих КТЭ при заданной геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$;

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

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

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

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

I – величина рабочего тока, А;

$I_{\max H} = e_H T/R_H$ – максимальный рабочий ток, А, при $\tau = 0$;

$I_{\max K} = e_K T_0/R_K$ – максимальный рабочий ток, А, при τ ;

e_H, e_K – соответственно, коэффициент термоЭДС ветви термоэлемента в начале и в конце процесса охлаждения, В/К;

T_0 – температура теплопоглощающего спая в конце процесса охлаждения, К;

T – температура теплопоглощающего спая в начале процесса охлаждения, К;

$\Theta = \Delta T/T_{\max}$ – относительный перепад температуры;

$\Delta T = T - T_0$ – перепад температуры ТЭУ, К;

$\Delta T_{\max} = 0,5 \bar{z} T_0^2$ – максимальный перепад температуры, К;

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

$K_K = \bar{\alpha}_K / (l/S)$ – коэффициент теплопередачи, Вт/К;

$\bar{\alpha}_K$ – усредненный коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К).

Количество термоэлементов n можно определить из соотношения

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max K}^2 R_K (2B_K - B_K^2 - \Theta)}, \quad (2)$$

где Q_0 – величина тепловой нагрузки, Вт.

Мощность потребления W_K ТЭУ можно определить из выражения:

$$W_K = 2n I_{\max K}^2 R_K B_K \left(B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (3)$$

Падение напряжения

$$U_K = W_K / I. \quad (4)$$

Холодильный коэффициент E можно вычислить по формуле

$$E = Q_0 / W_K. \quad (5)$$

Относительную величину интенсивности отказов λ/λ_0 можно определить по формуле [11]

$$\lambda/\lambda_0 = n B_K^2 (\Theta + C_K) \frac{\left(B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2} K_{T_1}; \quad (6)$$

где $C_K = \frac{Q_0}{n I_{\max K}^2 R_K}$ – относительная тепловая нагрузка;

K_{T_1} – значимый коэффициент пониженной температуры [11].

Условия равенства токов можно записать в виде

$$I = B_H I_{\max H} = B_K I_{\max K}. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы P ТЭУ можно определить из выражения

$$P = \exp(-\lambda t). \quad (8)$$

Режим $Q_{0\max}$. Результаты расчетов основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных перепадов температуры ΔT в диапазоне от 5 до 60 К и тепловой нагрузки Q_0 от 5 до 20 Вт для случая, когда $m_0 C_0 \rightarrow 0$, приведены в табл. 1, где

$$\beta = \frac{(\lambda/\lambda_0)_K}{(\lambda/\lambda_0)_H}.$$

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показал, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

– увеличивается время выхода на стационарный режим τ (рис. 1, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

– уменьшается рабочий ток I (рис. 2, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

Таблица 1

$T = 300 \text{ K}$, $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$, режим $Q_{0\text{max}}$, $m_0 C_0 \rightarrow 0$, $\bullet m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

Q_0 , Вт	n , шт.	W , Вт	U , В	E	I , А	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	γ , отн.ед.	τ , с	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4$, 1/ч	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 104,4 \text{ K}$; $\Theta = 0,048$; $R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,34 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,9926$												
0,5	6,6	1,045	0,79	0,478	1,34	1,06	6,0	1,024	0,39	6,35	19	0,99810
1,0	13,2	2,10	1,58				12,0			12,7	38,1	0,99620
2,0	26,4	4,20	3,16				24,0			25,4	76,2	0,9924
5,0	66,0	10,5	7,90				60,0			63,5	191	0,9811
7,0	92,4	14,7	11,1				84,0			88,9	266,7	0,9737
10,0	132	21,0	15,8				120,0			127	381	0,9626
20,0	264	42,0	31,6				240			254	726	0,9266
$\Delta T = 10 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 100,5 \text{ K}$; $\Theta = 0,10$; $R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,33 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,985$												
0,5	7,2	1,113	0,85	0,450	1,33	1,17	5,8	1,052	0,85	6,78	20,4	0,9980
1,0	14,4	2,23	1,70				11,6			13,6	40,7	0,9960
2,0	28,8	4,46	3,40				23,2			27,2	81,6	0,9919
5,0	72,0	11,15	8,50				58,0			68,0	204,0	0,97980
7,0	101	15,6	11,9				81,2			95,2	286	0,9718
10,0	144	22,3	17,0				116			136	408	0,9600
20,0	288	44,6	34,0				232			272	816	0,9216
$\Delta T = 20 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 93,7 \text{ K}$; $\Theta = 0,213$; $R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,31 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,970$												
0,5	8,70	1,28	1,0	0,390	1,31	1,41	5,53	1,11	1,91	7,82	23,46	0,99766
1,0	17,4	2,56	2,0				11,06			15,6	46,8	0,99533
2,0	34,8	5,10	4,0				22,1			31,2	93,6	0,9907
5,0	87,0	12,8	10,0				55,3			78,0	234	0,9769
7,0	122	17,9	14,0				77,4			109	328	0,9678
10,0	174	25,6	20,0				110,6			156	468	0,9543
20,0	348	51,2	40,0				221,2			312	936	0,9106
$\Delta T = 30 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 86,8 \text{ K}$; $\Theta = 0,346$; $R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,30 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,960$												
0,5	11,1	1,57	1,27	0,320	1,30	1,81	5,34	1,18	3,28	9,66	29,0	0,9971
1,0	22,2	3,14	2,54				10,7			19,3	58,0	0,9942
2,0	44,4	6,28	5,08				21,4			38,6	116	0,9885
5,0	111,0	15,7	12,7				53,5			96,5	290	0,9714
7,0	155,0	22,0	17,8				74,9			135	405	0,9603
10,0	222,0	31,4	25,4				107			193	579	0,9437
20,0	444,0	62,8	50,8				214			386	1158	0,8907
$\Delta T = 40 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 78,9 \text{ K}$; $\Theta = 0,50$; $R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,25 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,926$												
0,5	16,0	2,0	1,74	0,250	1,25	2,6	4,64	1,28	5,20	12,2	36,7	0,9963
1,0	32,0	4,0	3,50				9,28			24,4	73,2	0,9927
2,0	64,0	8,0	7,0				18,6			48,8	146	0,9855
5,0	160	20,0	17,5				46,4			122,0	366	0,9640
7,0	224	28,0	24,5				65,0			171	512	0,9500
10,0	320	40,0	35,0				92,8			244	732	0,9294
20,0	640	80,0	70,0				185,6			488	1464	0,8638
$\Delta T = 50 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{max}} = 73,4 \text{ K}$; $\Theta = 0,68$; $R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $I_{\text{maxK}} = 1,22 \text{ A}$; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$; $B_K = 1,0$; $B_H = 0,904$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	27,5	3,19	2,90	0,157	1,22	4,5	4,25	1,39	8,30	19,3	57,9	0,9942
1,0	55,0	6,38	5,80				8,5			38,6	116	0,9884
2,0	110	12,76	11,6				17,0			77,2	232	0,9771
5,0	275	31,9	29,0				42,5			193	579	0,9437
7,0	385	44,7	40,6				59,5			270	811	0,9221
10,0	550	63,8	58,0				85,0			386	1158	0,8907
20,0	1100	127,6	116	170,0	772	2316	0,7933					
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 1,0; B_H = 0,8770$												
0,5	109,9	11,6	11,2	0,043	1,184	18,3	3,80	1,50	15,30	69,5	208,5	0,9794
1,0	218	23,2	22,4				7,6			139,0	417,0	0,9592
2,0	436	46,4	44,8				15,2			278,0	834	0,9200
5,0	1090	116	112				38,0			695	2085	0,8118
7,0	1526	162	157,0				53,2			973	2919	0,7468
10,0	2180	232	224				76,0			1390	4170	0,6590
20,0	4360	464	448	152	2780	8340	0,4343					

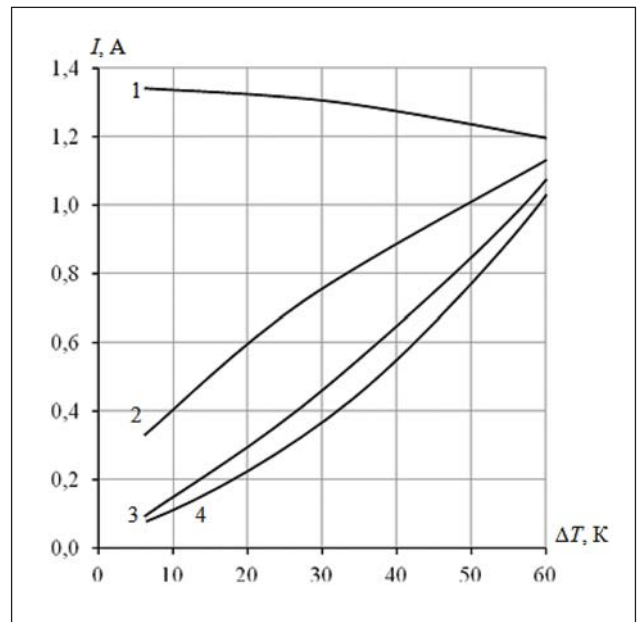
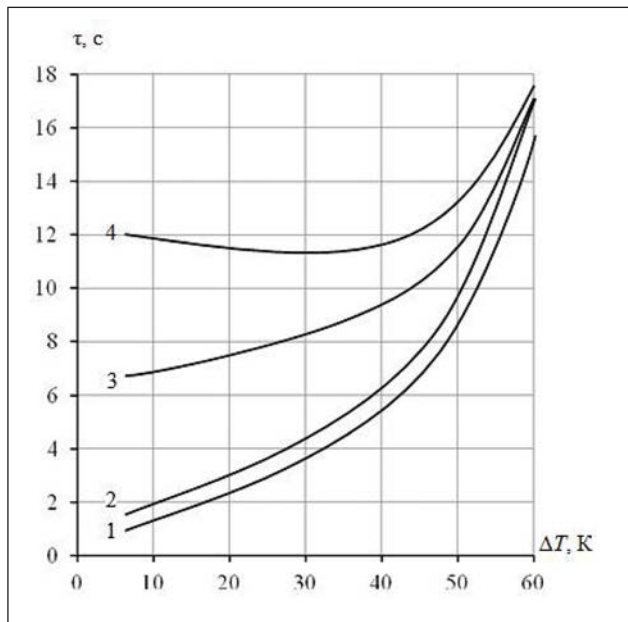


Рис. 1. Зависимость времени выхода τ на стационарный режим работы однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$; ● $m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/P)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

Рис. 2. Зависимость величины рабочего тока I однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/P)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

– уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

– увеличивается количество термоэлементов n для различной тепловой нагрузки Q_0 (рис. 4); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов увеличивается;

– увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;

– увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 для различной тепловой нагрузки Q_0 (рис. 5); с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;

– уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 6) для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;

– увеличивается отношение $\beta = \lambda_K/\lambda_H$ интенсивности отказов в начале λ_H и в конце λ_K процесса

Таблица 2

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } (Q_0/I)_{\max}; m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

Q_0 , Вт	n , шт.	W , Вт	U , В	E	I , А	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	γ , отн.ед.	i , с	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4$, 1/ч	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,34 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,219; B_H = 0,217$												
0,5	18,7	0,15	0,52	3,33	0,29	1,31	0,0137	1,024	1,18	0,018	0,054	0,9999946
1,0	37,4	0,30	1,04				0,0274			0,036	0,109	0,999989
2,0	74,8	0,60	2,08				0,0548			0,072	0,217	0,999978
5,0	187	1,50	5,20				0,137			0,181	0,543	0,999946
7,0	262	2,10	7,30				0,1918			0,253	0,760	0,999924
10,0	374	3,0	10,4				0,274			0,362	1,09	0,99989
20,0	748	6,0	20,8				0,480			0,724	2,17	0,99978
$\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,33 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,316; B_H = 0,311$												
0,5	15,3	0,253	0,61	2,00	0,42	1,52	0,0573	1,052	1,86	0,087	0,261	0,999974
1,0	30,6	0,506	1,22				0,1146			0,174	0,522	0,999948
2,0	61,2	1,10	2,44				0,229			0,348	1,04	0,999896
5,0	153	2,53	6,10				0,573			0,87	2,61	0,99974
7,0	214	3,54	8,54				0,802			1,22	3,65	0,99963
10,0	306	5,06	12,2				1,146			1,74	5,22	0,99948
20,0	612	10,1	24,4				2,292			3,48	7,0	0,99930
$\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,31 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,462; B_H = 0,448$												
0,5	14,2	0,482	0,82	1,04	0,60	1,88	0,2488	1,11	3,10	0,469	1,41	0,99986
1,0	28,4	0,954	1,64				0,4976			0,938	2,81	0,99972
2,0	56,8	1,93	3,28				0,9952			1,88	5,63	0,99944
5,0	142	4,82	8,20				2,488			4,70	14,1	0,9986
7,0	199	6,75	11,5				3,483			6,57	19,7	0,9980
10,0	284	9,64	16,4				4,976			9,38	28,1	0,9972
20,0	568	19,3	32,8				9,952			18,8	56,3	0,9944
$\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,30 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,588; B_H = 0,565$												
0,5	15,6	0,822	1,12	0,61	0,76	2,40	0,636	1,18	4,50	1,52	4,56	0,99954
1,0	31,2	1,64	2,24				1,272			3,0	9,0	0,99910
2,0	62,4	3,28	4,48				2,544			6,0	18,0	0,9982
5,0	156	8,2	11,2				6,36			15,0	45,0	0,9955
7,0	218	11,5	15,7				8,904			21,0	63,0	0,9937
10,0	312	16,4	22,4				12,72			30,0	90,0	0,9910
20,0	624	32,8	44,8				25,44			60,0	180,0	0,9822
$\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,25 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,707; B_H = 0,655$												
0,5	20,8	1,39	1,70	0,36	0,88	3,36	1,174	1,28	6,30	3,95	11,8	0,99882
1,0	41,6	2,78	3,40				2,348			7,9	23,7	0,9976
2,0	83,2	5,60	6,80				4,70			15,8	47,4	0,9954
5,0	208	13,9	17,0				11,74			39,5	118,5	0,9882
7,0	291	19,5	23,8				16,44			55,3	166	0,935
10,0	416	27,8	34,0				23,48			79,0	237	0,9766
20,0	832	55,6	68,0				47,0			158	474	0,9537
$\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,22 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,825; B_H = 0,746$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	33,5	2,75	3,0	0,18	1,0	5,66	1,96	1,39	9,20	11,1	33,3	0,9967
1,0	67,0	5,50	6,0				3,92			22,2	66,7	0,9934
2,0	134	11,0	12,0				7,84			44,4	133	0,9868
5,0	335	27,5	30,0				19,6			111,0	333	0,9672
7,0	469	38,5	42,0				27,44			155	466	0,9545
10,0	670	55,0	60,0				39,2			222	667	0,9355
20,0	1340	110,0	120,0	78,4	444	1332	0,8753					
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,949; B_H = 0,832$												
0,5	129	12,56	12,75	0,040	1,12	21,9	3,07	1,50	15,7	67,3	202	0,980
1,0	258	25,1	25,5				6,14			135	404	0,9604
2,0	516	50,2	51,0				12,28			270	810	0,9222
5,0	1290	125,5	127,5				30,7			675	2025	0,8167
7,0	1806	176	179				43,0			945	2835	0,7531
10,0	2580	251	255				61,4			1350	4050	0,6670
20,0	5160	502	510	122,8	2700	8100	0,4450					

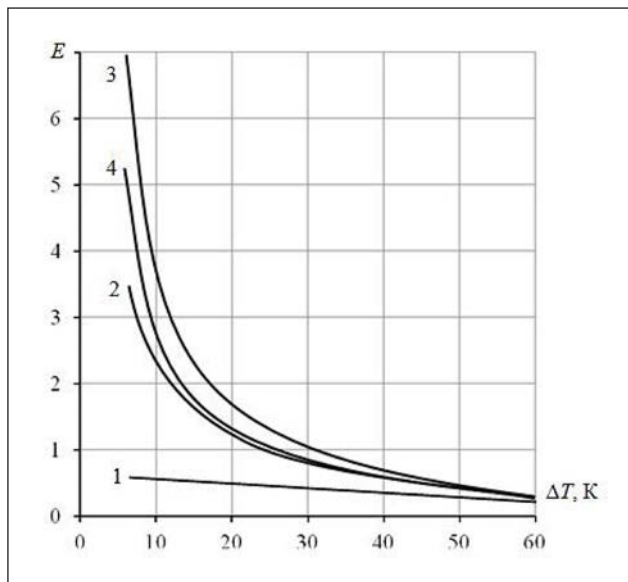


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента E однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$, $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

охлаждения (рис. 7, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 .

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показал, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

- увеличивается время выхода на стационарный режим τ (рис. 1, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- увеличивается величина рабочего тока I (рис. 2, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

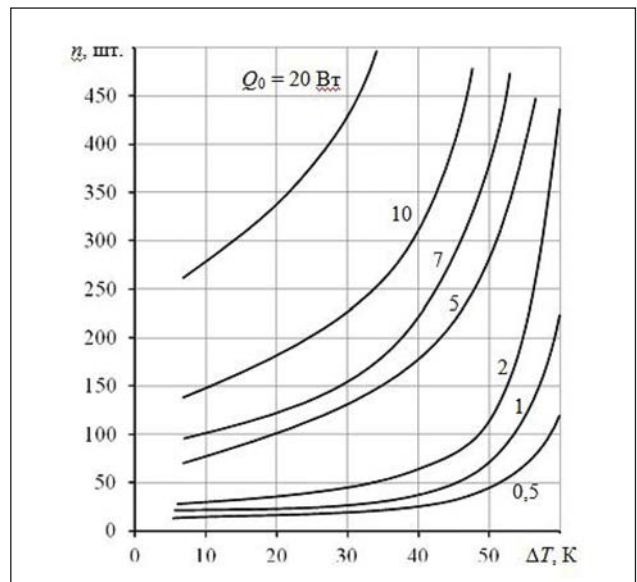


Рис. 4. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$, $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $Q_{0\max}$

- функциональная зависимость количества термоэлементов $n = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 20 \text{ K}$ (рис. 8); с ростом тепловой нагрузки Q_0 количество термоэлементов n увеличивается;

- увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;

- увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 (рис. 9); с ростом тепловой нагрузки Q_0 интенсивность отказов увеличивается;

- уменьшается вероятность безотказной работы P для различной тепловой нагрузки Q_0

Таблица 3

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } (Q_0/P^2)_{\text{max}}; m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum_i m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

$Q_0, \text{ Вт}$	$n, \text{ шт.}$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	E	$I, \text{ А}$	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	$\gamma, \text{ отн.ед.}$	$\tau, \text{ с}$	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4, \text{ 1/ч}$	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,34 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,048; B_H = 0,0476$												
0,5	141	0,0683	1,07	7,32	0,064	3,79	0,0000317	1,024	6,6	0,00012	0,00036	→1,0
1,0	282	0,137	2,10				0,000063			0,00024	0,00072	→1,0
2,0	564	0,274	4,28				0,000127			0,00048	0,00144	0,9999986
5,0	1410	0,685	10,5				0,000315			0,0012	0,0036	0,9999964
7,0	1974	0,959	14,7				0,000441			0,00168	0,0050	0,9999950
10,0	2820	1,37	21,0				0,00063			0,0024	0,0072	0,9999928
20,0	5640	2,74	42,0				0,00126			0,0048	0,0144	0,9999986
$\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,33 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,10; B_H = 0,0985$												
0,5	74,5	0,151	1,15	3,31	0,133	3,87	0,000581	1,052	6,8	0,00225	0,00675	0,9999933
1,0	149	0,30	2,30				0,001162			0,0045	0,0135	0,9999987
2,0	298	0,60	4,60				0,00232			0,0090	0,027	0,9999973
5,0	745	1,50	11,5				0,00581			0,0225	0,0675	0,9999933
7,0	1043	2,10	16,1				0,00813			0,0315	0,0945	0,9999906
10,0	1490	3,0	23,0				0,01162			0,045	0,135	0,9999987
20,0	2980	6,0	46,0				0,02324			0,090	0,270	0,9999973
$\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,31 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,213; B_H = 0,207$												
0,5	43,3	0,363	1,34	1,38	0,28	4,10	0,0115	1,11	7,3	0,047	0,14	0,9999986
1,0	86,6	0,726	2,68				0,023			0,094	0,281	0,9999972
2,0	173	1,45	5,40				0,046			0,187	0,562	0,9999944
5,0	433	3,63	13,4				0,115			0,468	1,40	0,999986
7,0	606	5,0	18,8				0,161			0,648	1,94	0,999981
10,0	866	7,26	26,8				0,23			0,936	2,81	0,999972
20,0	1732	14,5	53,6				0,46			1,87	5,62	0,999944
$\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,30 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,346; B_H = 0,333$												
0,5	34,7	0,707	1,63	0,71	0,45	4,53	0,0772	1,18	7,9	0,35	1,05	0,9999895
1,0	69,4	1,414	3,26				0,1544			0,70	2,10	0,999979
2,0	139	2,82	6,50				0,3088			1,40	4,20	0,999958
5,0	347	7,07	16,3				0,772			3,50	10,5	0,999895
7,0	486	9,87	22,8				1,081			4,9	14,7	0,99985
10,0	694	14,1	32,6				1,544			7,0	21,0	0,99979
20,0	1388	28,2	65,2				3,088			14,0	42,0	0,99958
$\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,25 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,50; B_H = 0,463$												
0,5	37,4	1,35	2,33	0,37	0,63	4,86	0,29	1,28	8,9	1,41	4,24	0,99958
1,0	74,8	2,70	4,66				0,58			2,82	8,46	0,99915
2,0	150	5,40	9,32				1,16			5,64	16,9	0,99831
5,0	374	13,5	23,3				2,90			14,1	42,3	0,9958
7,0	524	18,9	32,6				4,06			19,7	59,2	0,9941
10,0	748	27,0	46,6				5,80			28,2	84,6	0,9916
20,0	1496	54,0	93,2				11,6			56,4	169	0,9832
$\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\text{maxK}} = 1,22 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,68; B_H = 0,615$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	49,8	2,90	3,87	0,17	0,83	8,35	0,908	1,39	10,9	7,58	22,7	0,9977
1,0	99,6	5,80	7,70				1,816			15,2	45,5	0,99546
2,0	199	11,6	15,4				3,63			30,4	60,8	0,9939
5,0	498	29,0	38,5				9,08			76,0	228	0,9775
7,0	697	40,6	53,9				12,71			106	319	0,9686
10,0	996	58,0	77,0				18,16			152	456	0,9554
20,0	1992	116	154				36,3			304	912	0,9128
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,90; B_H = 0,789$												
0,5	168	14,9	16,0	0,034	1,07	28,9	2,48	1,50	16,4	71,7	215	0,9787
1,0	337	30,0	32,0				4,96			143	430	0,9579
2,0	674	60,0	64,0				9,92			287	860	0,9176
5,0	1685	150	160				24,8			717	2151	0,8065
7,0	2359	210	224				34,7			1004	3011	0,7400
10,0	3370	300	320				49,6			1434	4302	0,6504
20,0	7640	600	640				99,2			2868	8604	0,4230

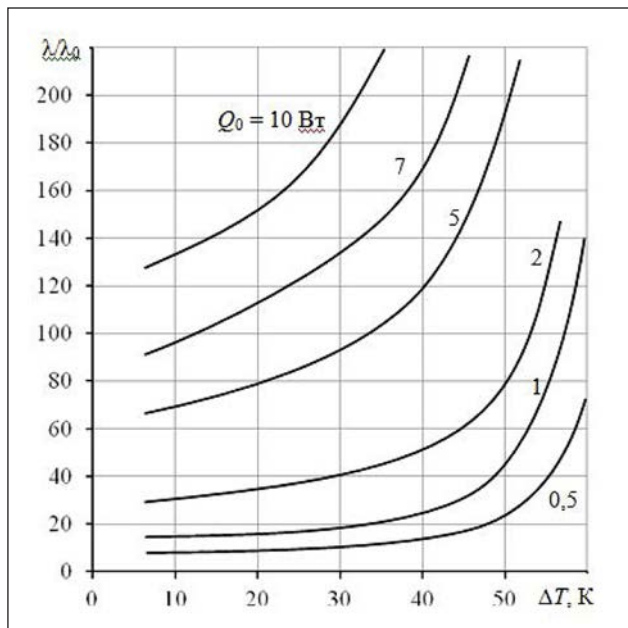


Рис. 5. Зависимость относительной величины интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3 \text{ Ч}$

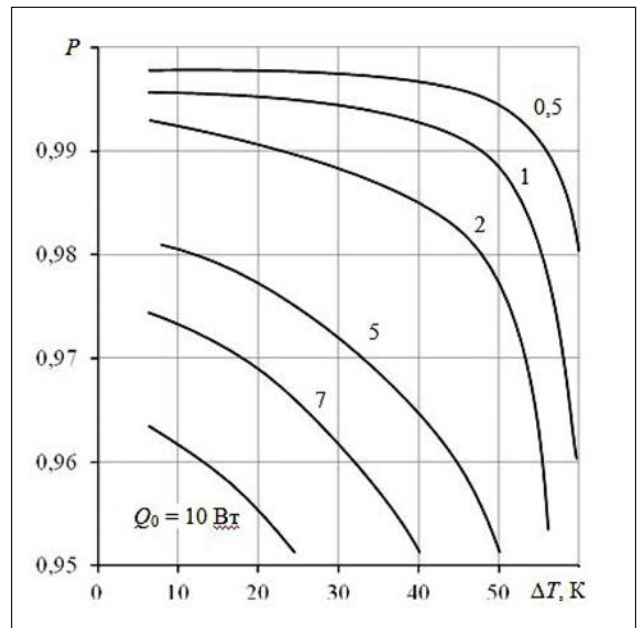


Рис. 6. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, t = 10^4 \text{ ч}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $Q_{0\max}$

(рис. 10); с ростом тепловой нагрузки Q_0 вероятность безотказной работы P уменьшается;

– увеличивается отношение $\beta = \lambda_k/\lambda_n$ интенсивности отказов в начале λ_n и в конце λ_k процесса охлаждения (рис. 7, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 .

Режим $(Q_0/I^2)_{\max}$ ($B = \Theta$). Результаты расчетов основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных перепадов температуры ΔT в диапа-

зоне от 5 до 60 К и тепловой нагрузки Q_0 от 5 до 20 Вт для случая, когда $m_0 C_0 \rightarrow 0$, приведены в табл. 3.

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 3, показал, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

– увеличивается время выхода на стационарный режим τ (рис. 1, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

– увеличивается величина рабочего тока I (рис. 2, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

Таблица 4

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } \lambda_{\min} (B = \eta\Theta); m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum_i m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

Q_0 , Вт	n , шт.	W , Вт	U , В	E	I , А	β	$(\lambda/\lambda_0)_H$	γ , отн.ед.	τ , с	$(\lambda/\lambda_0)_K$	$\lambda_K \cdot 10^4$, 1/ч	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,34 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,0336; B_H = 0,03335$												
0,5	360	0,095	2,13	5,26	0,045	8,36	0,0000766	1,024	11,9	0,000064	0,00019	→1,0
1,0	720	0,19	4,26				0,000153			0,000127	0,00038	→1,0
2,0	1440	0,38	8,52				0,000306			0,00025	0,00076	→1,0
5,0	3600	0,95	21,3				0,000765			0,00064	0,0019	0,9999981
7,0	5040	1,33	29,8				0,00107			0,00089	0,0027	0,9999973
10,0	7200	1,90	42,6				0,00153			0,00127	0,0038	0,9999962
20,0	14400	3,80	85,2				0,00031			0,0025	0,0076	0,9999924
$\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,33 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,072; B_H = 0,071$												
0,5	176	0,20	2,15	2,46	0,096	8,10	0,000157	1,052	11,5	0,00127	0,0038	0,9999962
1,0	351	0,40	4,30				0,000314			0,0025	0,0076	0,9999924
2,0	700	0,80	8,60				0,00063			0,0051	0,0152	0,9999985
5,0	1755	2,0	21,5				0,00157			0,0127	0,0381	0,9999962
7,0	2457	2,80	30,1				0,0022			0,0178	0,0533	0,9999947
10,0	3510	4,0	43,0				0,00314			0,0254	0,0762	0,9999924
20,0	7020	8,0	86,0				0,0063			0,0508	0,152	0,999985
$\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,31 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,16; B_H = 0,155$												
0,5	93,8	0,478	2,39	1,05	0,210	6,65	0,00361	1,11	11,4	0,024	0,072	0,9999928
1,0	188	0,956	4,78				0,0072			0,048	0,144	0,9999856
2,0	375	1,91	9,56				0,0144			0,096	0,288	0,999971
5,0	938	4,78	23,9				0,036			0,24	0,72	0,999928
7,0	1313	6,69	33,5				0,0504			0,34	1,0	0,999900
10,0	1876	9,56	47,8				0,072			0,48	1,44	0,999856
20,0	3752	19,1	95,6				0,144			0,96	2,88	0,99971
$\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,30 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,277; B_H = 0,267$												
0,5	62,1	0,864	2,49	0,58	0,360	7,62	0,0319	1,18	11,0	0,243	0,730	0,999927
1,0	124	1,73	5,0				0,0638			0,486	1,46	0,99985
2,0	248	3,46	10,0				0,1276			0,972	2,92	0,99971
5,0	621	8,65	25,0				0,319			2,43	7,29	0,99927
7,0	869	12,1	35,0				0,4466			3,40	10,2	0,99898
10,0	1242	17,3	50,0				0,638			4,86	14,6	0,9985
20,0	2484	34,6	100,0				1,276			9,72	29,2	0,9971
$\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,25 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,425; B_H = 0,394$												
0,5	59,6	1,63	3,32	0,31	0,530	8,87	0,1522	1,28	11,2	1,35	4,05	0,99960
1,0	119	3,26	6,64				0,3044			2,70	8,10	0,99920
2,0	238	6,52	13,3				0,609			5,40	16,2	0,9984
5,0	595	16,3	33,2				1,522			13,5	40,5	0,9960
7,0	833	22,8	46,5				2,131			18,9	56,7	0,9943
10,0	1190	32,6	66,4				3,044			27,0	81,0	0,9919
20,0	2380	65,2	133				6,088			54,0	162	0,9839
$\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,22 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,612; B_H = 0,553$												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	71,4	3,46	5,12	0,145	0,750	11,8	0,594	1,39	12,6	7,0	21,0	0,9979
1,0	143	6,91	10,2				1,188			14,0	42,0	0,9958
2,0	286	13,8	20,4				2,376			28,0	84,0	0,9916
5,0	714	34,6	51,0				5,94			70,0	210	0,9792
7,0	1000	48,4	71,4				8,32			98,0	294	0,9710
10,0	1428	69,1	102,0				11,88			140	420	0,9589
20,0	2856	138	204,0				23,76			280	840	0,9194
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$ $I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,873; B_H = 0,766$												
0,5	215	18,1	20	0,028	1,00	36,7	2,2	1,50	17,0	80,8	242	0,9760
1,0	431	36,2	40				4,4			162	485	0,9527
2,0	862	72,4	80				8,8			323	969	0,9076
5,0	2155	181	200				22,0			808	2424	0,7847
7,0	3017	253	280				30,8			1131	3394	0,7122
10,0	4310	362	400				44,0			1616	4848	0,6158
20,0	8620	724	800				88,0			3232	9696	0,3792

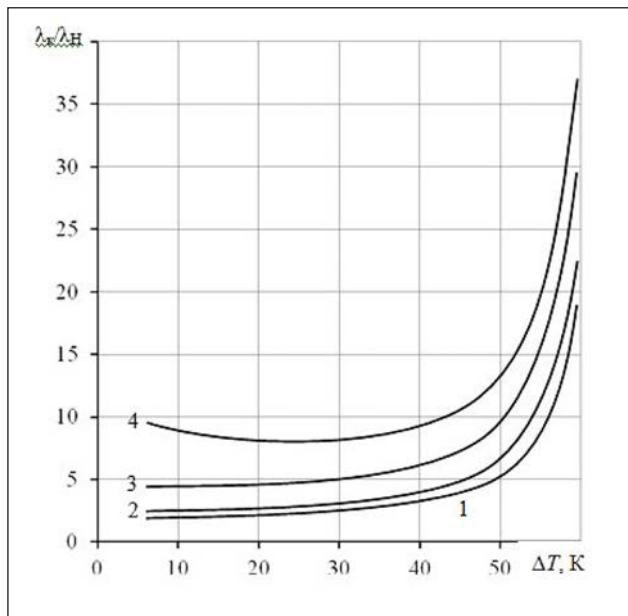


Рис. 7. Зависимость отношения λ_k/λ_n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, Q_0 = 0,5 \text{ Вт}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$; $\sum m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/P)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

- уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;
- функциональная зависимость количества термоэлементов $n = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 30 \text{ K}$ (рис. 11); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов увеличивается;
- увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;
- увеличивается относительная величина

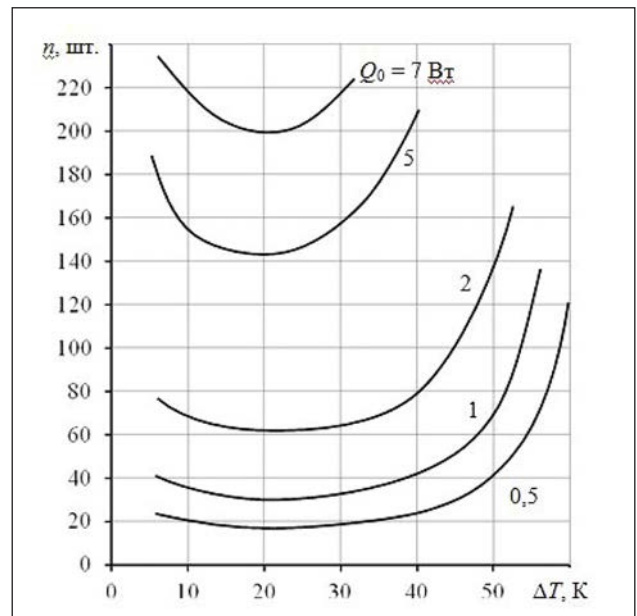


Рис. 8. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/I)_{\max}$

- интенсивности отказов λ/λ_0 (рис. 12) для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;
- уменьшается вероятность безотказной работы P для различной тепловой нагрузки Q_0 (рис. 13); с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;
- увеличивается отношение $\beta = \lambda_k/\lambda_n$ интенсивности отказов в начале λ_n и в конце λ_k процесса охлаждения (рис. 7, п. 3).

Таблица 5

Режим работы	B_K	B_H	τ, c	I, A	$n, шт.$	U, B	$W, Вт$	E	λ / λ_0	$\lambda \cdot 10^8, 1/ч$	P
Q_{0max}	1,0	0,93	5,4	1,2	32,0	3,50	4,0	0,25	24,4	73,2	0,9927
$(Q_0/I)_{max}$	0,707	0,655	6,4	0,82	41,6	3,40	2,80	0,36	7,9	23,7	0,9976
$(Q_0/P)_{max}$	0,50	0,46	9,0	0,58	74,8	4,7	2,70	0,37	2,80	8,50	0,99915
λ_{min}	0,425	0,39	11,4	0,49	120	6,60	3,30	0,31	2,70	8,10	0,99920

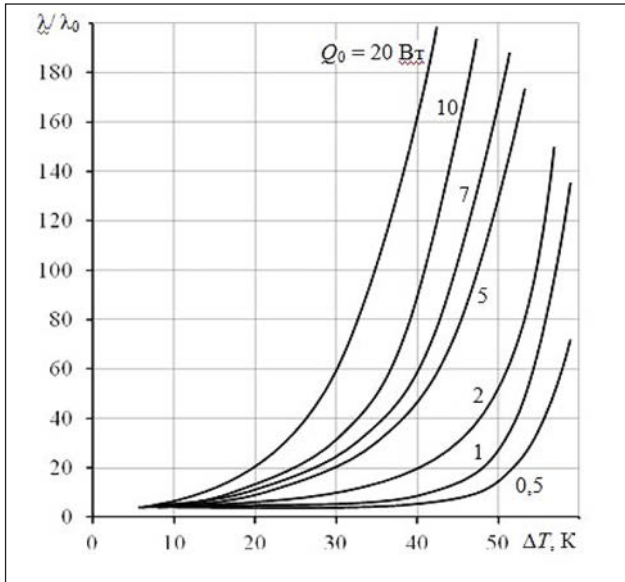


Рис. 9. Зависимость относительной величины интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3Ч$

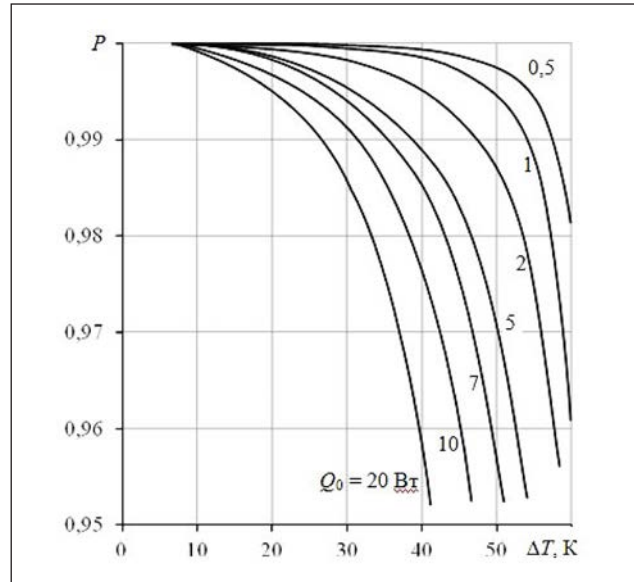


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, t = 10^4 \text{ ч}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/I)_{max}$

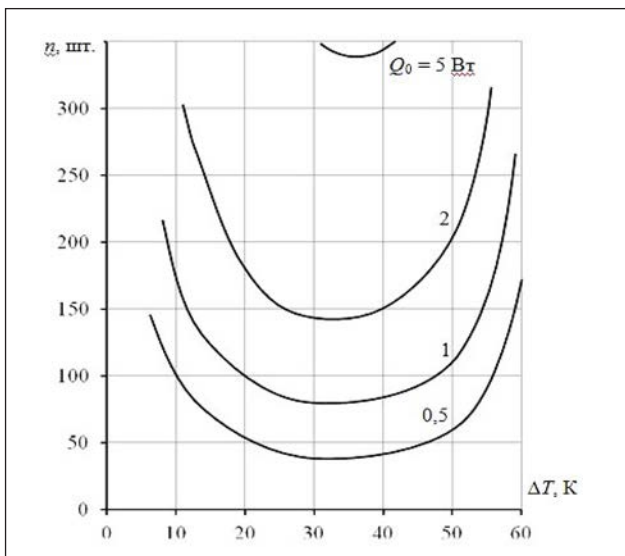


Рис. 11. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/P)_{max}$

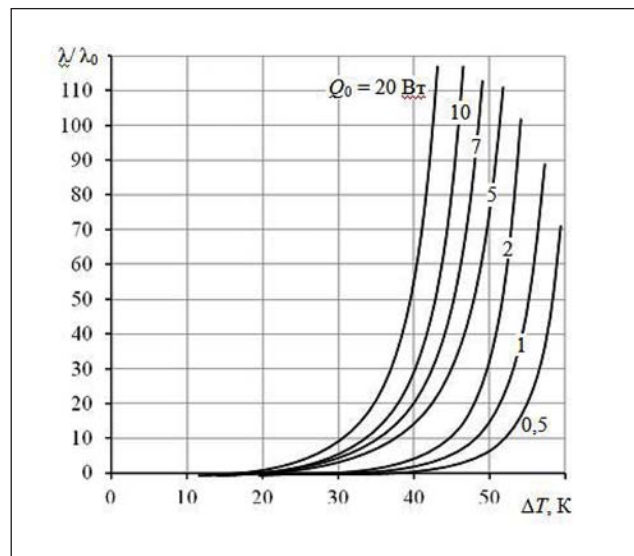


Рис. 12. Зависимость относительной величины интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3Ч$

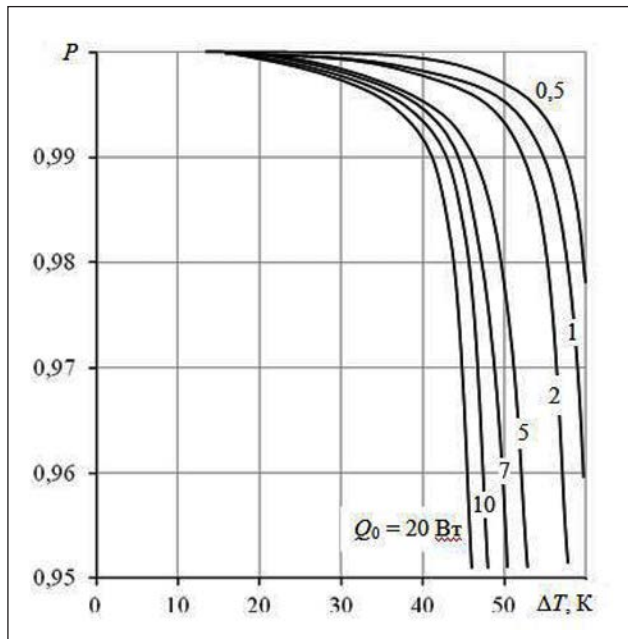


Рис. 13. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$, $t = 10^4$ ч для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме $(Q_0/P)_{\max}$

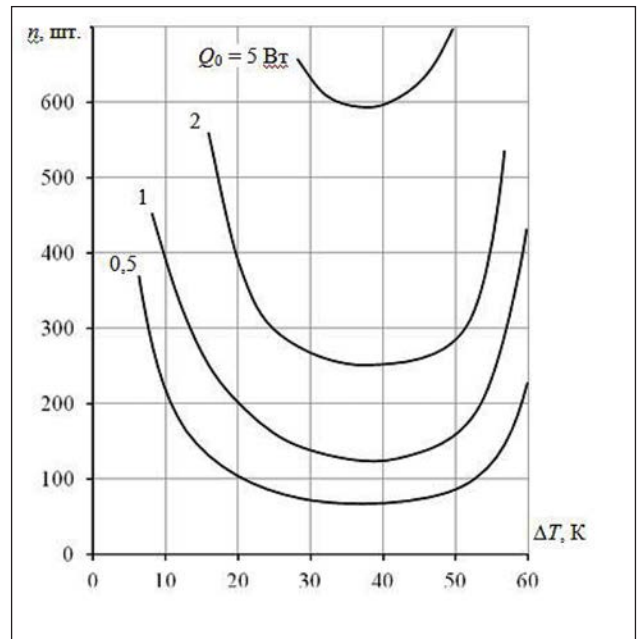


Рис. 14. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$ для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме λ_{\min}

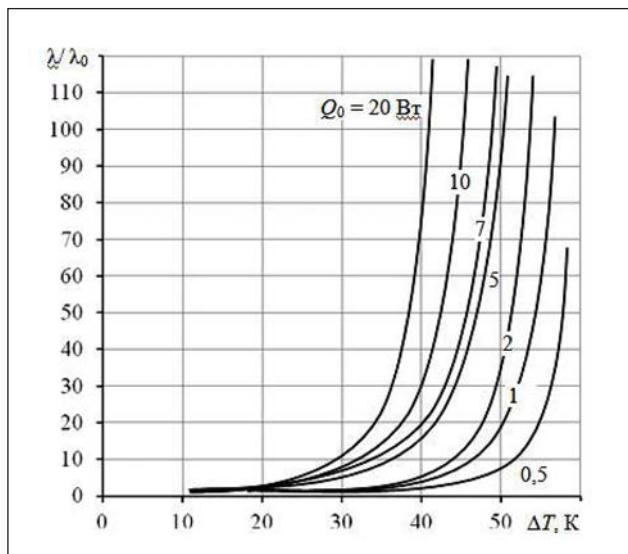


Рис. 15. Зависимость относительной величины отказов λ/λ_0 однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$, $\lambda_0 = 3$ Ч

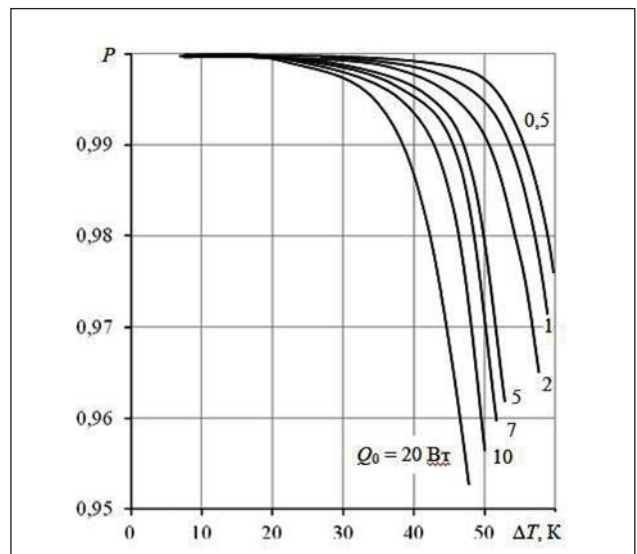


Рис. 16. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К, $l/S = 40$ см $^{-1}$, $t = 10^4$ ч для различной тепловой нагрузки Q_0 в режиме λ_{\min}

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 4, показывает, что с ростом перепада температуры ΔT при $m_0 C_0 \rightarrow 0$:

- увеличивается время выхода на стационарный режим работы τ (рис. 1, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- увеличивается величина рабочего тока I (рис. 2, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 3, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки Q_0 ;

- функциональная зависимость количества термоэлементов $n = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 40$ К (рис. 14); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов n увеличивается;

- увеличивается падение напряжения U для различной тепловой нагрузки Q_0 ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжения увеличивается;

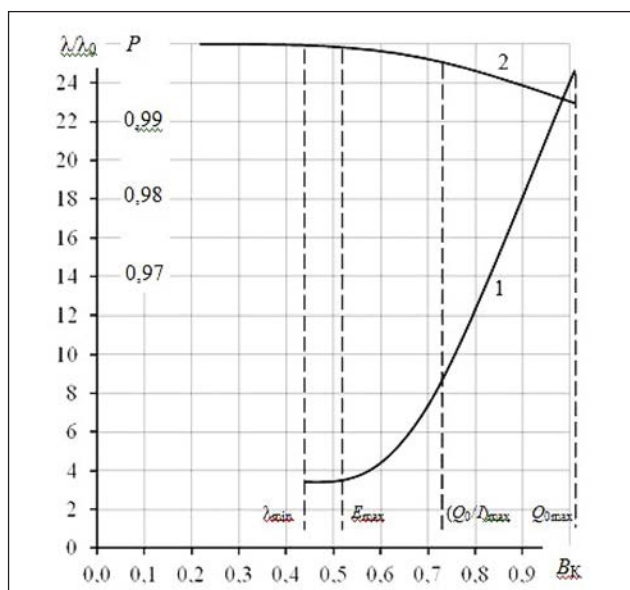


Рис. 17. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы τ , количества термоэлементов n , величины рабочего тока I и холодильного коэффициента E однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока B_K при $T = 300$ К, $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1$ Вт; $l/S = 40$ см⁻¹: 1 – $\tau = f(B_K)$; 2 – $n = f(B_K)$; 3 – $I = f(B_K)$; 4 – $E = f(B_K)$

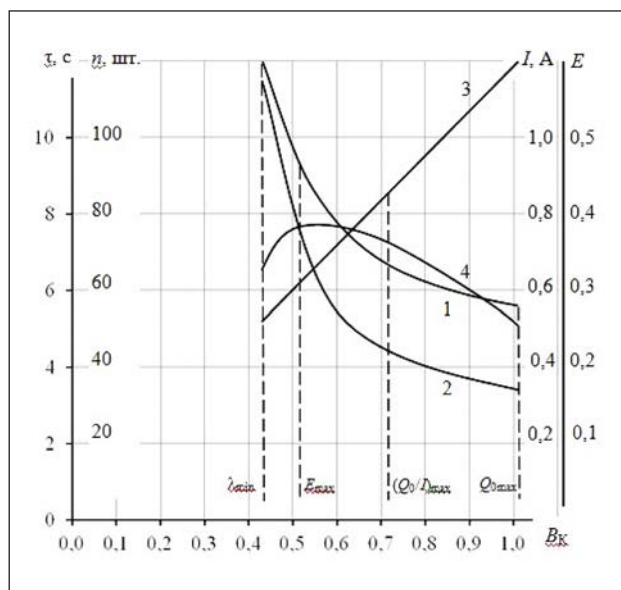


Рис. 18. Зависимость относительной величины отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока B_K при $T = 300$ К, $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1$ Вт; $l/S = 40$ см⁻¹; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч: 1 – $\lambda/\lambda_0 = f(B_K)$; 2 – $P = f(B_K)$

- увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 (рис. 15); с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;
- уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 16); с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;
- функциональная зависимость $\beta = f(\Delta T)$ имеет минимум при $\Delta T = 20$ К (рис. 7, п. 4).

Для сравнительного анализа основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных характерных токовых режимов воспользуемся данными расчетов, приведенных в табл. 5 при перепаде температуры $\Delta T = 40$ К, тепловой нагрузке $Q_0 = 1,0$ Вт и геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40$ см⁻¹.

Анализ результатов расчетов показывает, что с ростом относительного рабочего тока B_K :

- уменьшается время выхода на стационарный режим от $\tau = 11,4$ с в режиме λ_{min} до $\tau = 5,4$ с в режиме Q_{0max} (рис. 17, п. 1);
- уменьшается количество термоэлементов n от $n = 120$ шт. в режиме λ_{min} до $n = 32$ шт. в режиме Q_{0max} (рис. 17, п. 2);
- увеличивается величина рабочего тока I от $I = 0,49$ А в режиме λ_{min} до $I = 1,2$ А в режиме Q_{0max} (рис. 17, п. 3);
- функциональная зависимость холодильного коэффициента $E = f(B)$ имеет максимум при $B = 0,5$ (рис. 17, п. 4);

- уменьшается падение напряжения U от $U = 6,6$ В в режиме λ_{min} до $U = 3,5$ В в режиме Q_{0max} ;
- увеличивается относительная величина интенсивности отказов λ/λ_0 от $\lambda/\lambda_0 = 2,7$ в режиме λ_{min} до $\lambda/\lambda_0 = 24,4$ в режиме Q_{0max} (рис. 18);
- уменьшается вероятность безотказной работы P от $P = 0,99920$ в режиме λ_{min} до $P = 0,9927$ в режиме Q_{0max} (рис. 18).

Выводы

1. Время выхода на стационарный режим работы собственно однокаскадного ТЭУ для различных токовых режимов работы и различной тепловой нагрузки Q_0 увеличивается с ростом температуры ΔT при заданной геометрии ветвей термоэлементов $l/S = 40$ см⁻¹ и составляет:

- от $\tau = 0,4$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 15,3$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме Q_{0max} ;
- от $\tau = 1,2$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 15,7$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме $(Q_0/I)_{max}$;
- от $\tau = 6,6$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 16,4$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме $(Q_0/P)_{max}$;
- от $\tau = 11,9$ с при $\Delta T = 5$ К до $\tau = 17,0$ с при $\Delta T = 60$ К в режиме λ_{min} .

2. Время выхода на стационарный режим работы не зависит от количества термоэлементов в ТЭУ при заданной геометрии ветвей термоэлементов.

3. Минимальное время выхода на стационарный режим работы обеспечивается при токе режима Q_{0max} в заданном диапазоне перепадов температуры.

4. При перепаде температуры, близком к максимальному ($\Delta T \rightarrow \Delta T_{\max}$), время выхода на стационарный режим работы отличается незначительно для всех режимов работы.
5. Сравнительный анализ основных параметров, показателей надежности и динамических характеристик дает возможность выбора компромиссных решений при проектировании ТЭУ с учетом весомости каждого из ограничительных факторов.

Список литературы:

1. Zebajadi M., Esfarjani K., Dresselhaus M. S., Ren Z. F., Chen G. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device Applications. *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5. № 1. P. 5147–5162.
2. Kajikawa T. Successes in the field of thermoelectric technology of electricity generation in Japan. *Thermoelectricity*. 2011. № 3. P. 5–19.
3. Ordin S.V, Experimental and Theoretical Expansion of the Phenomenology of Thermoelectricity. *Global Journal of Science Frontier Research- Physics & Space Science (GJSFR-A)*. 2018. Volume 18, Issue 1. P. 1–8.
4. Hyoung–Seuk Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letter*. 2011. № 7. P. 271.
5. 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). P. 170–185.
6. Jurgensmeyer A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. *Colorado State University*. 2011. 54.
7. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxy. *University of California*. 2008. 54.
8. Нестеров С.Б., Холопкин А.И. Оценка возможности увеличения термоэлектрической добротности наноструктурированных полупроводниковых материалов для холодильной техники. *Холодильная техника*. № 5. 2014. С. 40–43.
9. Громов Г. Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули. *Компоненты и технологии*. № 9. 2014. С. 38.
10. Зайков В.П., Мещеряков В.И., Журавлев Ю.И. Определение времени выхода на стационарный режим работы с учетом теплоемкости и массы конструктивных и технологических элементов однокаскадного ТЭУ. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 1. С. 12–24.
11. Зайков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности, термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. Одесса : Политехприодика. 2009. 120 с.

ДИНАМІКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

Розглянуто вплив конструктивних і технологічних елементів на основні параметри, показники надійності і динаміку функціонування термоелектричних охолоджуючих пристроїв у характерних струмових режимах у діапазоні робочих перепадів температури і теплового навантаження при заданій геометрії гілок термоелементів. Проведено оцінку часу виходу на стаціонарний режим охолоджувача у взаємозв'язку з основними параметрами і показниками надійності.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, час виходу на стаціонарний режим, геометрія гілок термоелементів.

FUNCTIONING DYNAMICS OF A SINGLE-STAGE THERMOELECTRIC COOLING DEVICE

It was considered the influence of structural and technological elements on the basic parameters, indicators of reliability and on the functioning dynamics of thermoelectric cooling devices in the characteristic current modes in the range of operating temperature differences and thermal load in a given geometry of thermoelement branches. The estimation of the time to reach the stationary mode of the cooler in relation to the main parameters and reliability indicators has been made.

Key words: thermoelectric cooler, time to reach stationary mode, geometry of thermoelement branches.