

НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ОДНОКАСКАДНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлев Ю. И.

1. Введение

Ужесточение требований к современной радиоэлектронной аппаратуре и повышение ее сложности приводит к снижению показателей надежности. Особенно это касается теплонагруженных элементов, которые не могут функционировать без систем обеспечения тепловых режимов, поскольку повышение тепловой нагрузки существенно влияет на их жизнеспособность. Наиболее перспективными системами данного типа являются термоэлектрические охладители (ТЭУ), которые отличаются от воздушных и жидкостных систем малыми габаритами и массой, повышенной надежностью. Это обусловлено тем, что в термоэлектрических охладителях отсутствуют подвижные компоненты, что обеспечивает надежное функционирование в условиях вибраций, положения в пространстве, изменении давления внешней среды. Поскольку по модели надежности теплонагруженный элемент и термоэлектрический охладитель включены последовательно, показатели надежности охладителя непосредственно сказываются на интенсивности отказов теплонагруженных элементов и всей системы в целом. Результатом может стать не только выход из строя электронной системы управления объектом, но и аварии объекта, приводящие к значительным материальным затратам и человеческим жертвам. Поэтому вопросы повышения показателей надежности термоэлектрических охладителей как систем обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов являются актуальными.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования является модель связи показателя надежности с энергетическими показателями и конструктивными параметрами термоэлементов термоэлектрического охладителя.

В термоэлектрическом приборостроении используются различные унифицированные конструкции модулей и устройства на их основе с различной геометрией (отношением длины к сечению) ветвей термоэлементов. Поэтому перед разработчиком аппаратуры возникает вопрос выбора оптимальной геометрии ветвей термоэлементов с учетом весомости каждого из ограничительных факторов и различных условий функционирования. Вопросы влияния геометрии термоэлементов на холодопроизводительность рассмотрены достаточно детально [1], однако связь с показателями надежности термоэлектрического охладителя не исследована. Перспективность проблемы состоит в выявлении связи геометрии термоэлементов с показателями надежности, как одной из составляющих эксплуатационной надежности термоэлектрических охладителей.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является сравнительный анализ моделей взаимосвязи показателей надежности и геометрии ветвей термоэлементов для повышения показателей надежности однокаскадного ТЭУ в различных условиях функционирования.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести исследование взаимосвязи показателей надежности с энергетическими показателями и конструктивными параметрами ТЭУ.
2. Проанализировать влияние геометрии термоэлементов на энергетические и конструктивные показатели термоэлектрического охладителя для обеспечения выбора лучшего варианта по критерию минимума интенсивности отказов.

4. Исследование существующих решений проблемы

Перспективность термоэлектрических устройств охлаждения для фундаментальных приложений в системах обеспечения тепловых режимов основана на высоком быстродействии и простоте управления охладителем [2]. Одним из основных факторов, сдерживающих распространение термоэлектрического способа охлаждения, является более низкая холодопроизводительность по сравнению с компрессионными системами. Поэтому существенное внимание уделяется разработке материалов с повышенной термоэлектрической эффективностью [3]. Однако наиболее важным показателем ТЭУ является надежность [4], и, в первую очередь, эксплуатационная. Показатели надежности охладителя определяются значением тепловой нагрузки [5], режимом работы в диапазоне от максимальной холодопроизводительности до минимума интенсивности отказов [6], количеством термоэлементов [7], динамикой изменения рабочего тока [8]. Существенное влияние на показатели надежности оказывают и конструктивные особенности термоэлектрического охладителя [9]. Переход от объемной технологии построения термоэлектрических устройств к планарной представляет собой перспективное направление, однако при этом существенно ухудшается холодопроизводительность, что обусловлено повышением тепловых потерь между обкладками через термоэлементы [10]. Это привело к тому, что подавляющее большинство выпускаемых современных термоэлектрических охладителей изготавливаются по объемной технологии [11].

5. Методы исследования

В качестве методов исследования воспользуемся математическим моделированием [12], поскольку именно аналитический надежно-ориентированный подход позволит получать решения, которые могут быть использованы на этапе проектирования. Это позволяет уже на этапе проектирования прогнозировать показатели надежности и сопоставлять проектные решения по критериям надежности и энергетическим показателям. Результатом является не только удешевление производства термоэлектрических охлаждающих устройств, но и повышение их эксплуатационной надежности.

5.1. Анализ моделей взаимосвязи показателей надежности с энергетическими показателями и конструктивными параметрами

Проведем анализ влияния геометрии ветвей термоэлементов на основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ для различных перепадов температуры ΔT в диапазоне от 0 до 60 К. Для этого воспользуемся соотношениями [12].

Холодопроизводительность ТЭУ Q_0 можно записать в виде выражения:

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

где n – количество термоэлементов, шт.;

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

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

\bar{e} , $\bar{\sigma}$ – усредненные значения коэффициента термо-эдс, В/К, и электропроводности, См/см, ветви термоэлемента соответственно;

T_0 – температура теплопоглощающего спая, К;

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

I – величина рабочего тока, А;

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

T – температура тепловыделяющего спая, К;

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

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

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

Мощность потребления ТЭУ W и холодильный коэффициент E определяются выражениями [12]:

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

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

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

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

где λ_0 – номинальная интенсивность отказов, 1/ч;

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 [13]:

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

где t – назначенный ресурс, ч.

В табл. 1–4 приведены результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ, полученные для различных отношений I/S режимах работы от $Q_{0\max}$ до λ_{\min} .

При одинаковой тепловой нагрузке Q_0 и перепаде температуры ΔT для различной геометрии ветви термоэлемента I/S величина:

$$n\gamma = \text{const}. \quad (6)$$

Таблица 1

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности термоэлектрического устройства, полученные для различных отношений I/S при $Q_0=2,0$ Вт; $T=300$ К; $\Delta T=10$ К; $\Delta T_{\max}=101$ К; $\Theta=0,1$; $\bar{z}_m=2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\bar{e}=1,99 \cdot 10^{-4}$ В/К; $\bar{\sigma}=920$ См/см; $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t=10^4$ ч

I/S , см ⁻¹	Режим ра- боты	B , отн. ед.	I , А	U , В	W , Вт	n , шт.	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P	$a \times b$, мм
40,0	$I_{\max}=1,33$ А; $R=43,5 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\gamma=0,077$ Вт										
	$Q_{0\max}$	1,0	1,33	3,4	4,60	28,9	0,435	29,1	87,3	0,9913	1,0×1,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,316	0,42	2,45	1,03	60,2	1,94	0,37	1,11	0,999889	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,10	0,133	4,51	0,60	289	3,33	0,0094	0,028	0,9999972	
λ_{\min}	0,071	0,094	8,64	0,812	709	2,46	0,0052	0,0155	0,99999845		
20,0	$I_{\max}=2,66$ А; $R=21,7 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\gamma=0,154$ Вт										
	$Q_{0\max}$	1,0	2,66	1,73	4,60	14,5	0,435	14,6	43,8	0,9956	1,41×1,41
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,316	0,82	1,23	1,03	30,2	1,94	0,185	1,555	0,999944	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,10	0,266	2,26	0,60	144,7	3,33	0,0047	0,0141	0,9999986	
λ_{\min}	0,071	0,189	4,30	0,812	336	2,46	0,00245	0,00735	0,99999926		
10,0	$I_{\max}=5,29$ А; $R=10,9 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\gamma=0,305$ Вт										
	$Q_{0\max}$	1,0	5,29	0,87	4,60	7,30	0,435	7,35	22,0	0,9978	2,0×2,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,316	1,67	0,62	1,03	15,1	1,94	0,093	0,28	0,999970	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,10	0,53	1,13	0,60	72,2	3,33	0,00235	0,0070	0,9999993	
λ_{\min}	0,071	0,376	2,16	0,812	167,0	2,46	0,00122	0,00366	0,99999963		
4,5	$I_{\max}=11,8$ А; $R=4,89 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\gamma=0,681$ Вт										
	$Q_{0\max}$	1,0	11,8	0,39	4,60	3,3	0,435	3,32	9,97	0,9990	3,0×3,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,316	3,73	0,28	1,03	6,8	1,94	0,042	0,125	0,999997	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,10	1,18	0,51	0,60	32,6	3,33	0,00106	0,0032	0,99999970	
λ_{\min}	0,071	0,84	0,97	0,812	75,1	2,46	0,00055	0,00164	0,99999984		
2,0	$I_{\max}=26,6$ А; $R=2,17 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\gamma=1,54$ Вт										
	$Q_{0\max}$	1,0	26,6	0,173	4,60	1,45	0,435	1,46	4,38	0,99956	4,5×4,5
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,316	8,40	0,123	1,03	3,0	1,94	0,019	0,057	0,9999943	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,10	2,66	0,23	0,60	14,5	3,33	0,00047	0,00141	0,99999986	
λ_{\min}	0,071	1,89	0,43	0,812	33,4	2,46	0,00024	0,00073	0,99999993		

Таблица 2

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности термоэлектрического устройства, полученные для различных отношений l/S при $Q_0=2,0$ Вт; $T=300$ К; $\Delta T=20$ К; $\Delta T_{\max}=93,3$ К; $\Theta=0,214$; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\bar{e}=1,97 \cdot 10^{-4}$ В/К; $\bar{\sigma}=940$ См/см; $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t=10^4$ ч

$l/S, \text{см}^{-1}$	Режим работы	$B, \text{отн. ед.}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$W, \text{Вт}$	$n, \text{шт.}$	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8, \text{1/ч}$	P	$a \times b, \text{мм}$
40,0	$I_{\max}=1,295 \text{ А}; R=42,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,071 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	1,295	4,2	5,45	35,4	0,367	35,4	106,2	0,9894	1,0×1,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,463	0,60	3,33	2,0	55,8	1,0	1,35	4,0	0,99960	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,214	0,28	5,3	1,45	166,4	1,38	0,21	0,63	0,999937	
λ_{\min}	0,146	0,19	11,7	2,23	493	0,90	0,118	0,354	0,999965		
20,0	$I_{\max}=2,6 \text{ А}; R=21,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,144 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	2,6	2,10	5,45	17,8	0,367	17,8	53,4	0,9947	1,40×1,40
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,463	1,20	1,67	2,0	28,2	1,0	1,08	3,2	0,99968	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,214	0,56	2,64	1,45	83,2	1,38	0,104	0,31	0,999970	
λ_{\min}	0,146	0,38	5,90	2,23	247	0,90	0,059	0,177	0,999982		
10,0	$I_{\max}=5,2 \text{ А}; R=10,64 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,288 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	5,2	1,05	5,45	8,9	0,367	10,8	32,3	0,9968	2,0×2,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,463	2,41	0,83	2,0	14,1	1,0	0,54	1,62	0,99984	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,214	1,11	1,31	1,45	41,6	1,38	0,52	0,156	0,999984	
λ_{\min}	0,146	0,76	2,90	2,23	123	0,90	0,030	0,089	0,9999911		
4,5	$I_{\max}=11,5 \text{ А}; R=4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,635 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	11,5	0,47	5,45	4,0	0,367	4,0	12,1	0,9988	3,0×3,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,463	5,32	0,38	2,0	6,0	1,0	0,23	0,68	0,999932	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,214	2,46	0,59	1,45	17,6	1,38	0,022	0,066	0,9999934	
λ_{\min}	0,146	1,68	0,33	2,23	52,2	0,90	0,0125	0,038	0,9999963		
2,0	$I_{\max}=25,9 \text{ А}; R=2,13 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=1,53 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	25,9	0,21	5,45	1,8	0,367	1,82	4,46	0,99945	4,5×4,5
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,463	12,0	0,17	2,0	2,8	1,0	0,11	0,32	0,999968	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,214	5,54	0,26	1,45	8,3	1,38	0,010	0,03	0,999997	
λ_{\min}	0,146	3,78	0,60	2,23	24,7	0,90	0,0059	0,018	0,9999982		

Таблица 3

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности термоэлектрического устройства, полученные для различных отношений l/S при $Q_0=2,0$ Вт; $T=300$ К; $\Delta T=40$ К; $\Delta T_{\max}=79,8$ К; $\Theta=0,5$; $\bar{z}_m = 2,37 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\bar{e}=1,94 \cdot 10^{-4}$ В/К; $\bar{\sigma}=980$ См/см

$l/S, \text{см}^{-1}$	Режим работы	$B, \text{отн. ед.}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$W, \text{Вт}$	$n, \text{шт.}$	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8, \text{1/ч}$	P	$a \times b, \text{мм}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40,0	$I_{\max}=1,295 \text{ А}; R=42,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,071 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	1,24	7,45	9,24	64,0	0,216	65,4	196,2	0,9806	1,0×1,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,71	0,88	6,7	5,90	76,7	0,34	20,4	61,2	0,9939	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,50	0,62	8,4	5,21	128,0	0,38	7,98	23,6	0,9976	
λ_{\min}	0,40	0,49	12,8	6,34	229	0,315	5,52	16,6	0,99		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20,0	$I_{\max}=2,6 \text{ A}; R=21,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,144 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	2,47	3,74	9,24	32,0	0,216	32,7	98,1	0,9902	1,40×1,4 0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,71	1,75	3,40	5,90	38,5	0,34	10,2	30,6	0,9969	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,50	1,24	4,22	5,21	64,0	0,38	3,94	11,8	0,9988	
λ_{\min}	0,40	1,0	6,40	6,27	114,3	0,32	2,76	8,30	0,99917		
10,0	$I_{\max}=5,2 \text{ A}; R=10,64 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,288 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	4,95	1,87	9,24	16,1	0,216	16,45	49,4	0,9951	2,0×2,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,71	3,50	1,70	5,90	19,3	0,34	5,1	15,4	0,9985	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,50	2,48	2,10	5,21	32,1	0,38	1,98	5,94	0,99941	
λ_{\min}	0,40	2,0	3,20	6,27	57,4	0,32	1,39	4,20	0,99958		
4,5	$I_{\max}=11,5 \text{ A}; R=4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,635 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	11,0	0,84	9,24	7,2	0,216	7,40	22,1	0,9978	3,0×3,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,71	7,8	0,76	5,90	8,7	0,34	2,30	6,9	0,99931	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,50	5,50	0,95	5,21	14,4	0,38	0,89	2,67	0,99973	
λ_{\min}	0,40	4,4	1,44	6,27	25,8	0,32	0,625	1,87	0,99981		
2,0	$I_{\max}=25,9 \text{ A}; R=2,13 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=1,53 \text{ Вт}$										
	$Q_{0\max}$	1,0	25,2	0,37	9,24	3,2	0,216	3,27	3,27	0,9990	4,5×4,5
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,71	17,5	0,34	5,90	3,9	0,34	1,02	1,02	0,99970	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,50	12,4	0,42	5,21	6,4	0,38	0,40	0,40	0,99988	
λ_{\min}	0,40	10,0	0,64	6,27	11,5	0,32	0,28	0,28	0,999917		

Таблица 4

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности термоэлектрического устройства, полученные для различных отношений l/S при $Q_0=2,0 \text{ Вт}; T=300 \text{ К}; \Delta T=60 \text{ К}; \Delta T_{\max}=66,8 \text{ К}; \Theta=0,9; \bar{z}_m = 2,32 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}; \bar{e}=1,89 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}; \bar{\sigma} = 1030 \text{ См/см}; \lambda_0=3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}; t=10^4 \text{ ч}$

$l/S, \text{ см}^{-1}$	Режим работы	$B, \text{ Отн. ед.}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$W, \text{ Вт}$	$n, \text{ шт.}$	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8, \text{ 1/ч}$	P	$a \times b, \text{ мм}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40,0						$I_{\max}=1,295 \text{ A}; R=42,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,071 \text{ Вт}$					
	$Q_{0\max}$	1,0	1,17	42,7	50,0	378	0,040	391	1172	0,8894	1,0×1,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,95	1,11	42,3	47,0	389	0,043	333	998	0,9050	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,90	1,05	43,9	46,1	420	0,043	295	884	0,9154	
	λ_{\min}	0,855	1,0	47,9	47,9	477,8	0,042	277	830	0,9204	
20,0						$I_{\max}=2,6 \text{ A}; R=21,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,144 \text{ Вт}$					
	$Q_{0\max}$	1,0	2,34	21,4	50,0	189	0,040	195	586	0,9431	1,40×1,40
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,95	2,22	21,2	47,0	195	0,043	166	500	0,9512	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,90	2,10	22,0	46,1	210	0,043	147	442	0,9568	
	λ_{\min}	0,855	2,0	24,0	47,9	239	0,042	138	415	0,9594	
10,0						$I_{\max}=5,2 \text{ A}; R=10,64 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,288 \text{ Вт}$					
	$Q_{0\max}$	1,0	4,67	10,7	50,0	94,3	0,040	97,6	293	0,9711	2,0×2,0
	$(Q_0/I)_{\max}$	0,95	4,44	10,6	47,0	97,3	0,043	83,2	250	0,9753	
	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,90	2,20	11,0	46,1	105	0,043	73,7	221,1	0,9781	
	λ_{\min}	0,855	4,0	12,0	47,9	119,4	0,042	69,2	207,5	0,9795	
4,5						$I_{\max}=11,5 \text{ A}; R=4,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=0,635 \text{ Вт}$					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Q_{0max}	1,0	10,4	4,81	50,0	42,5	0,040	44,0	132,0	0,9869	3,0×3,0	
	$(Q_0/D)_{max}$	0,95	9,88	4,76	47,0	43,8	0,043	37,5	112,4	0,9888		
	$(Q_0/I^2)_{max}$	0,90	9,36	4,93	46,1	47,2	0,043	33,2	99,6	0,9901		
	λ_{min}	0,855	8,89	5,39	47,9	53,8	0,042	31,1	93,3	0,9907		
2,0						$I_{max}=25,9 \text{ A}; R=2,13 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \gamma=1,53 \text{ Вт}$						
	Q_{0max}	1,0	23,4	2,14	50,0	18,9	0,040	19,6	58,7	0,9941	4,5×4,5	
	$(Q_0/D)_{max}$	0,95	22,2	2,12	47,0	19,5	0,043	16,6	50,0	0,9950		
	$(Q_0/I^2)_{max}$	0,90	21,1	2,18	46,1	21,0	0,043	14,8	44,4	0,9956		
	λ_{min}	0,855	20,0	2,40	47,9	23,9	0,042	13,8	41,4	0,9959		

По приведенным в таблицах данным проведем сопоставительный анализ и представим результаты в виде графических зависимостей.

5.2. Анализ результатов моделирования

Анализ расчетных данных показал следующее.

Во всех исследованных режимах работы однокаскадного ТЭУ с уменьшением отношения l/S ветви термоэлемента при фиксированном перепаде температуры ΔT и заданной тепловой нагрузке Q_0 :

- увеличивается максимальная мощность охлаждения γ (рис. 1, кривая 1);
 - уменьшается необходимое количество термоэлементов n (рис. 1, кривая 4);
 - увеличивается величина максимального рабочего тока I_{max} (рис. 1, кривая 2);
 - уменьшается величина электрического сопротивления R (рис. 1, кривая 3);
 - уменьшается величина падения напряжения U ;
 - уменьшается интенсивность отказов λ (рис. 2);
 - увеличивается вероятность безотказной работы P (рис. 3).
- Такие величины, как γ , R , I_{max} , не зависят от режима работы.

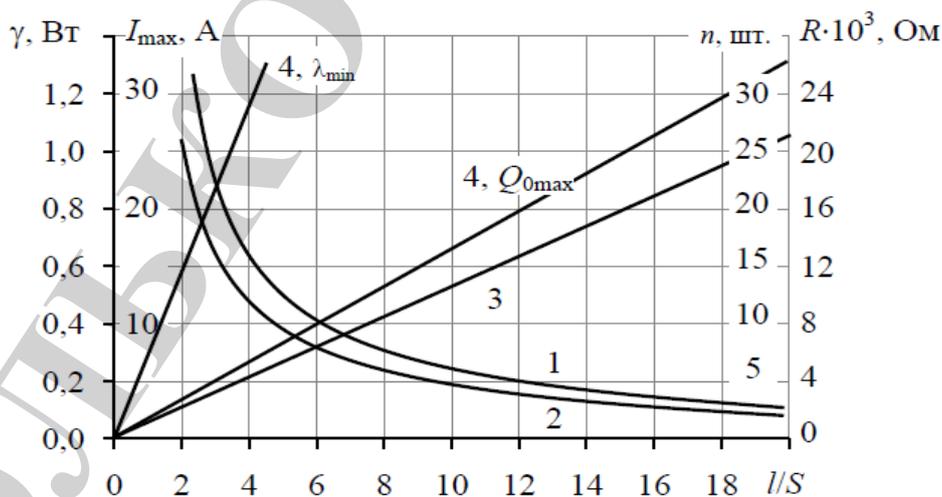


Рис. 1. Зависимость величин γ , I_{max} , n , R однокаскадного охладителя от отношения l/S при $T=300 \text{ К}$; $Q_0=2,0 \text{ Вт}$; $\Delta T=40 \text{ К}$; $l=4 \text{ мм}$ для различных режимов работы: Q_{0max} и λ_{min} . 1 — γ , 2 — I_{max} , 3 — R , 4 — n

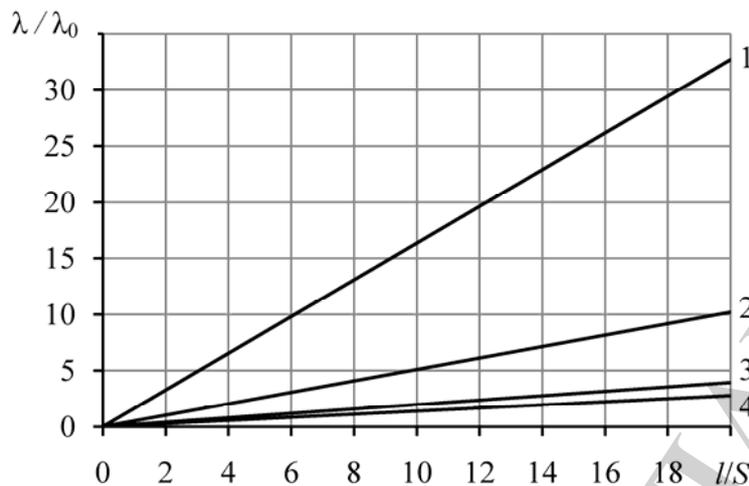


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного охладителя от отношения l/S при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $\Delta T=40$ К для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

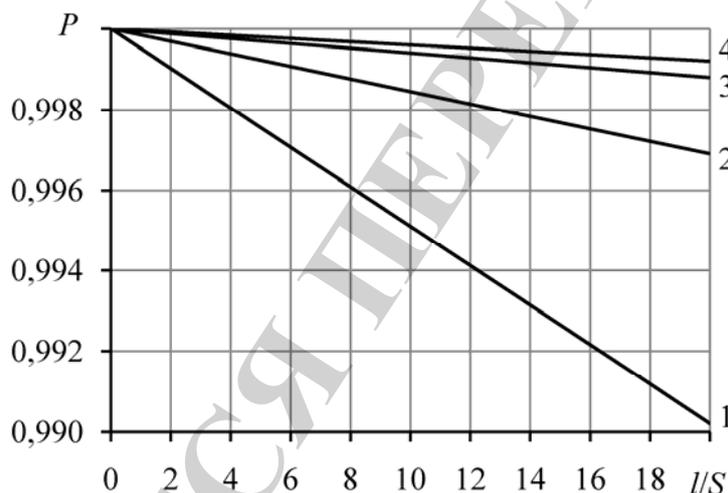


Рис. 3. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного охладителя от отношения l/S при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $\Delta T=40$ К для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

Во всех исследованных режимах работы однокаскадного ТЭУ с ростом перепада температуры ΔT при заданной тепловой нагрузке Q_0 для различных фиксированных значений отношения l/S ветви термоэлемента:

- уменьшается максимальная мощность охлаждения γ (рис. 4);
- функциональная зависимость $n=f(\Delta T)$ в ТЭУ имеет ярко выраженный минимум (кроме режима $Q_{0\max}$), что можно объяснить наличием максимума холодопроизводительности при оптимальном значении ΔT (рис. 5);
- увеличивается величина максимального рабочего тока I_{\max} (рис. 6);
- уменьшается холодильный коэффициент E (рис. 7);

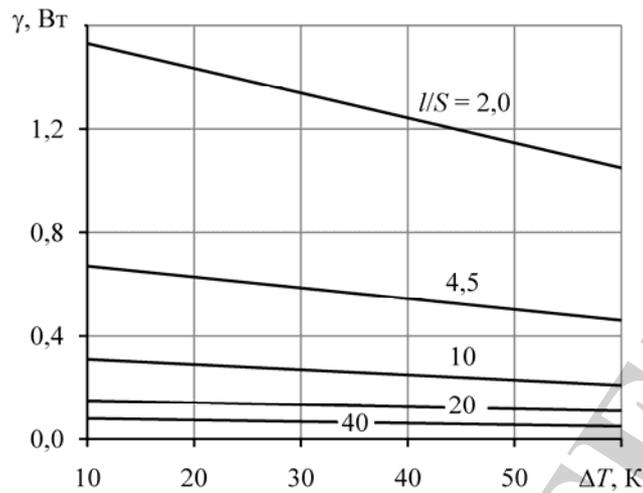


Рис. 4. Зависимость максимальной мощности охлаждения γ однокаскадного охладителя от перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/S при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $l=4$ мм

- увеличивается (кроме режима $Q_{0\max}$) относительный рабочий ток B (рис. 8);
- увеличивается интенсивность отказов λ/λ_0 (рис. 9);
- уменьшается вероятность безотказной работы P (рис. 10).

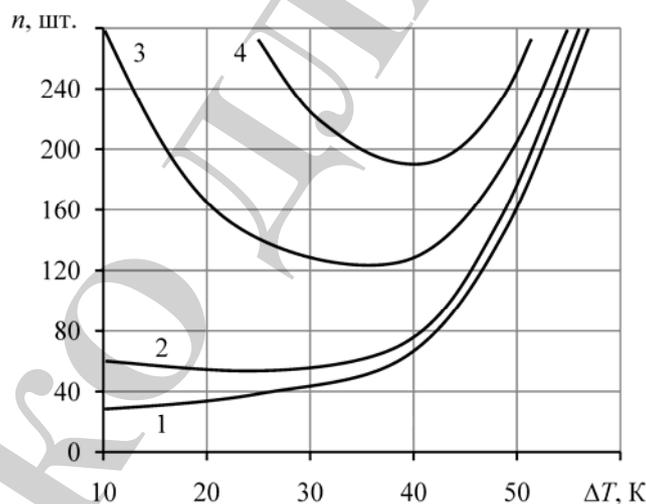


Рис. 5. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $l/S=40$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

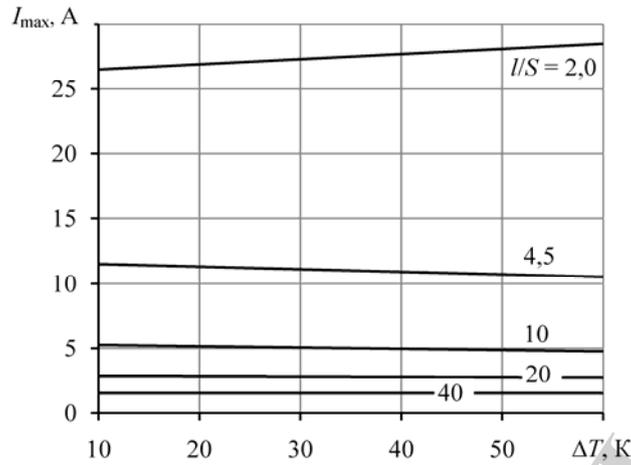


Рис. 6. Зависимость максимального рабочего тока I_{\max} однокаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $l=4$ мм для различных значений l/S

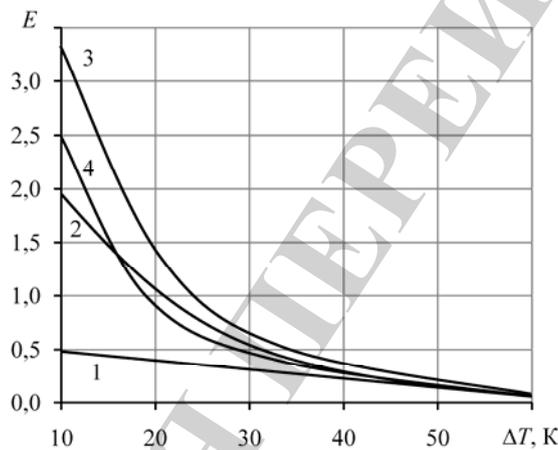


Рис. 7. Зависимость холодильного коэффициента E однокаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $l=4$ мм для различных значений l/S и различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

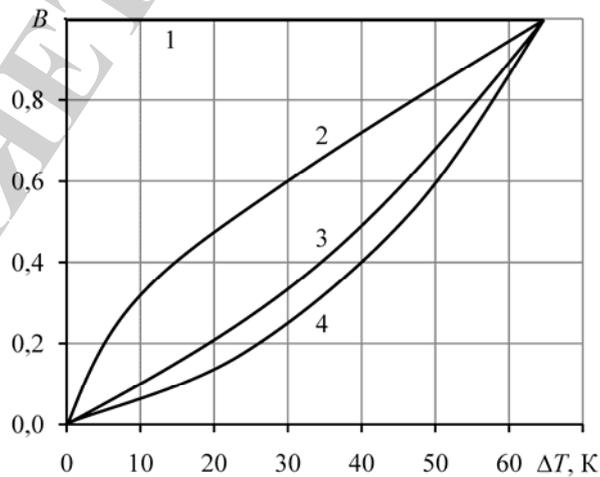


Рис. 8. Зависимость относительного рабочего тока B однокаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт; $l/S=\text{var}$ для различных режимов работы: 1 – $Q_{0\max}$ ($B=1$); 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

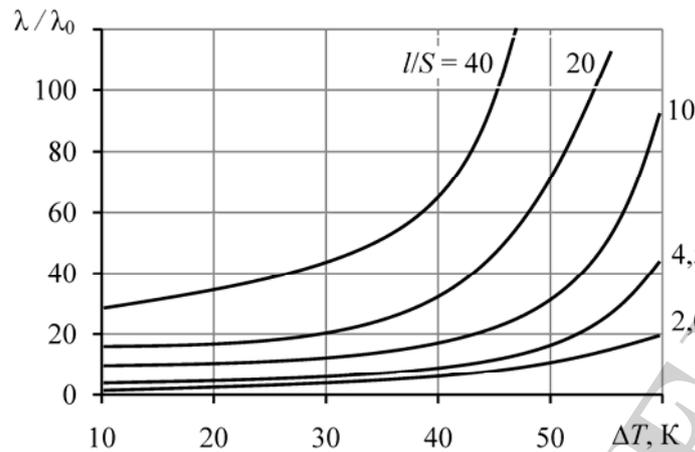


Рис. 9. Зависимость относительной интенсивности отказов λ/λ_0 однокаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт для различных значений l/S в режиме $Q_{0\max}$

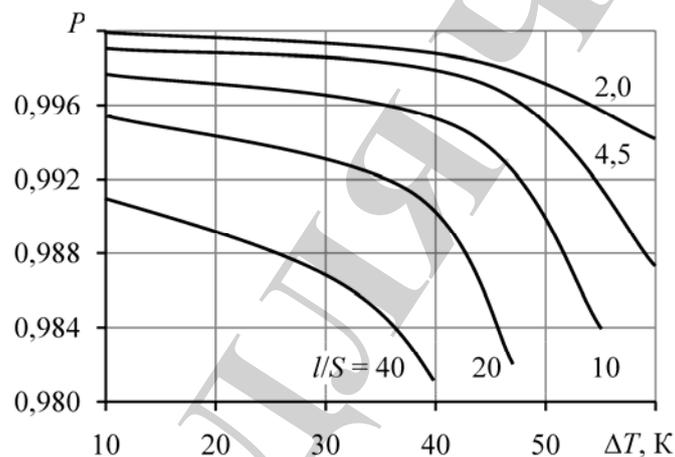


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного охладителя от перепада температуры ΔT при $T=300$ К; $Q_0=2,0$ Вт для различных значений l/S в режиме $Q_{0\max}$

Величины максимальной термоэлектрической мощности охлаждения γ и максимального рабочего тока I_{\max} не зависят от режима работы.

6. Результаты исследования

Рассмотрим возможность выбора варианта конструкции однокаскадного ТЭУ, обеспечивающего повышенные показатели надежности при приемлемом энергопотреблении и массогабаритных характеристиках.

В табл. 5 приведены результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ, полученные для режимов максимальной энергетической эффективности $(Q_0/I^2)_{\max}$ и минимальной интенсивности отказов λ_{\min} . Исходные данные и ограничивающие факторы:

- тепловая нагрузка $Q_0=2,0$ Вт;
- рабочий перепад температуры $\Delta T=40$ К;
- температура тепловыделяющего спая $T=300$ К;

- величина рабочего тока I не более 5 А;
- интенсивность отказов λ не более $10 \cdot 10^{-8}$ 1/ч;
- падение напряжения U не менее 1,5 В.

Таблица 5

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности охладителя, полученные для режимов $(Q_0/I^2)_{\max}$ и λ_{\min} при $Q_0=2,0$ Вт; $T=300$ К; $\Delta T_{\max}=40$ К; $\Theta=0,5$; $l=4$ мм

$l/S, \text{ см}^{-1}$	Режим работы	$B, \text{ отн. ед.}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$W, \text{ Вт}$	$n, \text{ шт.}$	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8, \text{ 1/ч}$	P	$a \times b, \text{ мм}$	Наименование модулей и их количество в ТЭУ
20	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,5	1,2	4,2	5,2	64,0	0,38	3,9	11,8	0,9988	1,4×1,4	2 М20-27 2 М20-5
	λ_{\min}	0,4	1,0	6,4	6,3	114	0,32	2,8	8,3	0,99917		4 М20-27
10	$(Q_0/I^2)_{\max}$	0,5	2,5	2,1	5,2	32	0,38	2,0	6,0	0,99941	2,0×2,0	1 М10-27 1 М10-5
	λ_{\min}	0,4	2,0	3,2	6,3	57	0,32	1,4	4,2	0,99958		2 М20-27
4,5	λ_{\min}	0,4	4,4	1,5	6,3	26	0,32	0,63	1,9	0,99981	3,0×3,0	1 М4,5-27

Из анализа данных следует, что с точки зрения надежности, энергопотребления и массогабаритных характеристик наиболее приемлемым вариантом является конструкция с одним унифицированным модулем М4,5-27. Геометрия ветвей термоэлементов модуля составляет $l=4,5$ мм, $a \times b=3 \times 3$ мм. В этом случае ТЭУ состоит из одного модуля, что упрощает конструкцию термоэлектрической системы обеспечения тепловых режимов. Основные параметры термоэлектрического охладителя удовлетворяют выдвинутым требованиям:

- рабочий ток $I=4,4$ А, что не превышает 5 А;
- падение напряжения соответствует требованию $U \geq 1,5$ В;
- интенсивность отказов составляет $\lambda=1,9 \cdot 10^{-8}$ 1/ч, что меньше требуемой величины $10 \cdot 10^{-8}$ 1/ч.

При этом потребляемая мощность составляет $W=6,3$ Вт, что на 20 % больше, чем в режиме наибольшей энергетической эффективности при минимальных массогабаритных характеристиках.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильной стороной данного исследования является доказательство возможности повышения показателей надежности термоэлектрического охладителя путем вариации геометрии термоэлементов. Подход не требует изменения технологии изготовления охладителей и материала термоэлементов. Процесс расчета геометрии термоэлементов можно производить на стадии автоматизированного проектирования термоэлектрических охладителей. Это поз-

воляет прогнозировать показатели надежности термоэлектрических охладителей еще до производства изделий.

Weakness. Слабой стороной данного исследования является тот факт, что при определении показателей надежности не учитываются адгезионные свойства связи термоэлемента с подложкой, которые должны меняться при уменьшении площади среза термоэлемента. Проведенные ранее экспериментальные исследования не выявили количественной связи между площадью среза термоэлемента и показателями надежности термоэлектрического охладителя. Эта составляющая не учитывается используемой моделью и требует дополнительных исследований.

Opportunities. Дополнительные возможности по повышению показателей надежности термоэлектрических охладителей состоят в учете в алгоритме автоматизированного проектирования, кроме геометрии термоэлементов, влияния тепловой нагрузки, термоэлектрической эффективности материала, режимов работы. Результатом такого подхода является повышение качественных показателей (эксплуатационной надежности) выпускаемых предприятием термоэлектрических охлаждающих устройств без изменения технологии изготовления и используемых термоэлектрических материалов.

Threats. Сложности практического использования полученных результатов связаны с необходимостью включения в цикл автоматизированного проектирования алгоритмов оптимизационных расчетов геометрии термоэлементов и энергетических показателей функционирования термоэлектрического охладителя. Поэтому в дальнейшем представляется необходимым создание комплексной надежно-ориентированной модели и алгоритма проектирования охладителей на ее основе. Предприятие несет затраты лишь на приобретение дополнительного программного продукта для системы автоматизированного проектирования термоэлектрических охладителей.

Таким образом, SWOT-анализ позволяет определить основные этапы для повышения качества проектирования, используя и предложенный вариант повышения показателей эксплуатационной надежности термоэлектрических охладителей.

8. Выводы

1. Представлена аналитическая модель, связывающая геометрию ветвей термоэлементов с основными параметрами и показателями надежности однокаскадного термоэлектрического охладителя. Модель применима для режимов работы охладителя от максимума холодопроизводительности до минимума интенсивностей отказов, перепада температуры от 0 до 60 К, диапазонов рабочего тока от 0,1 до 12 А, напряжения питания 0,1–8 В, холодильного коэффициента от 0,43 до 3,3.

2. Показана возможность выбора варианта геометрии термоэлемента в диапазоне от 4,5 до 20, обеспечивающего снижение интенсивности отказов термоэлектрического охладителя более чем в 3 раза при приемлемом энергопотреблении и габаритных размерах.

Литература

1. Gromov, G. Obimnye ili tonkoplenochnye termoelektricheskie moduli [Text] / G. Gromov // Components & Technologies. – 2014. – № 8. – P. 108–113.
2. Zebarjadi, M. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications [Text] / M. Zebarjadi, K. Esfarjani, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren, G. Chen // Energy Environ. Sci. – 2012. – Vol. 5, № 1. – P. 5147–5162. doi:10.1039/c1ee02497c
3. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques [Text] / A. L. Jurgensmeyer. – Colorado State University, 2011. – 54 p.
4. Zhang, L. Approach on thermoelectricity reliability of board-level backplane based on the orthogonal experiment design [Text] / L. Zhang, Z. Wu, X. Xu, H. Xu, Y. Wu, P. Li, P. Yang // International Journal of Materials and Structural Integrity. – 2010. – Vol. 4, № 2/3/4. – P. 170–185. doi:10.1504/ijmsi.2010.035205
5. Zaykov, V. Thermal load influence on reliability parameters of two-stage thermoelectric cooling devices [Text] / V. Zaykov, V. Mescheryakov, V. Ignatovskaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2011. – № 4/9 (52). – P. 34–38. – Available at: \www/URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1477>
6. Rowe, D. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics [Text] / ed. by D. Rowe // Thermoelectrics and its Energy Harvesting, 2 Volume Set. – CRC Press, 2012. – 1120 p. doi:10.1201/b11891
7. Sootsman, J. R. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials [Text] / J. R. Sootsman, D. Y. Chung, M. G. Kanatzidis // Angewandte Chemie International Edition. – 2009. – Vol. 48, № 46. – P. 8616–8639. doi:10.1002/anie.200900598
8. Choi, H.-S. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics-of-failure [Text] / H.-S. Choi, W.-S. Seo, D.-K. Choi // Electronic Materials Letters. – 2011. – Vol. 7, № 3. – P. 271–275. doi:10.1007/s13391-011-0917-x
9. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability [Text] / A. A. Wereszczak, H. Wang // Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. – Oak Ridge National Laboratory, 2011. – 18 p.
10. Singh, R. Experimental characterization of thin film thermoelectric materials and film deposition via molecular beam epitaxy [Text] / R. Singh. – Santa Cruz: University of California, 2008. – 158 p.
11. Thermoelectric modules market. Analytical review [Text]. – Moscow: RosBusinessConsulting, 2009. – 92 p.
12. Zaykov, V. P. Prognozovanie pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh ohlazhdaiushchih ustroystv [Text]. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva / V. P. Zaykov, L. A. Kinshova, V. F. Moiseev. – Odessa: Politehperiodika, 2009. – 120 p.
13. Yampurin, N. P. Osnovy nadezhnosti elektronnyh sredstv [Text] / N. P. Yampurin, A. V. Baranova. – Moscow: Akademiia, 2010. – 240 p.