

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ¹, к. т. н. Ю. И. ЖУРАВЛЁВ²

Украина, ¹Одесский государственный экологический университет,

²Национальный университет «Одесская морская академия»

E-mail: gradan@ua.fm

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОИСКУ ТОКОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Рассмотрены возможности критериального подхода к определению токового режима работы однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства (ТЭУ) при использовании в качестве базового параметра надежности интенсивности отказов. Получены соотношения, позволяющие определить токовый режим работы ТЭУ с заданной геометрией ветвей для различных условий эксплуатации с учетом различных ограничительных требований. Проведен сравнительный анализ токовых режимов, близких к режимам максимальной энергоэффективности и минимальной интенсивности отказов, который позволяет выбрать компромиссные варианты.

Ключевые слова: термоэлектрическое охлаждающее устройство, режим работы, показатели надежности, геометрия ветвей термоэлементов, электронные компоненты.

Для обеспечения нормального теплового режима современных теплонагруженных электронных компонентов все более широкое применение находят системы охлаждения на основе термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭУ) [1–6]. Среди прочих требований, предъявляемых к используемым для этих целей ТЭУ, важным является требование повышенной надежности работы.

При проектировании ТЭУ повышенной надежности обычно задаются холодопроизводительность Q_0 , температура теплопоглощающего спая T_0 и температура тепловыделяющего спая T . Кроме этого, накладываются различные ограничения: по энергопотреблению, габаритам, массе, величине рабочего тока и напряжения и наиболее важные и критичные по надежности, с учетом которых необходимо выбрать режим работы охлаждающего термоэлемента.

В литературе по термоэлектрическому охлаждению описаны характерные и компромиссные токовые режимы работы охлаждающего термоэлемента [7–11]. Рациональная область использования токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента ограничена характерными режимами максимальной холодопроизводительности $Q_{0\max}$ и тепловой изоляции $Q_0 = 0$. При проектировании ТЭУ в режиме $Q_{0\max}$ обеспечивается минимальное количество термоэлементов при заданном сечении ветвей и их высоты, однако при этом велики энергозатраты и рабочий ток, что приводит к росту интенсивности отказов λ . Режим $Q_0 = 0$ обеспечивает только необходимый перепад температуры, что заметно сужает область его рационального использования.

Проектирование ТЭУ в режиме максимальной энергоэффективности $E_{\max}$ позволяет свести к минимуму потребляемую мощность W , но при этом растет количество термоэлементов n и интенсивность отказов.

Проектирование ТЭУ в режиме минимальной интенсивности отказов $\lambda_{\min}$ обеспечивает максимальную надежность, однако приводит к росту количества термоэлементов и потребляемой мощности.

Область токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента, в которой $B < \Theta$ (B — относительный рабочий ток; Θ — относительный перепад температуры), ранее считалась нерациональной, т. к. здесь вместе с холодильным коэффициентом E уменьшается и холодопроизводительность, что приводит к росту количества термоэлементов. Однако в некоторых случаях, когда основным требованием является уменьшение величины рабочего тока при повышенном напряжении питания и незначительном увеличении энергозатрат, такие режимы могут оказаться предпочтительными.

Таким образом, очевидно, что на выбор токового режима работы ТЭУ влияет много факторов, и в большинстве случаев необходимо учитывать взаимное влияние и весомость каждого из них. В этом случае появляется необходимость использования критериального подхода с учетом основных значимых параметров. Так, условия проектирования могут быть весьма разнообразными, изменяя одновременно несколько задаваемых величин (Q_0 , n , λ , W и т.д.), можно выбирать компромиссные режимы работы

ТЭУ. Среди ограничительных требований наиболее значимым и критичным является требование по надежности.

Целью настоящей работы является разработка критериального подхода к определению токовых режимов работы охлаждающего термоэлектрического устройства повышенной надежности при заданном сечении ветвей.

Для дальнейших вычислений будем использовать следующие известные соотношения для холодопроизводительности и относительной интенсивности отказов:

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

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

где n — количество термоэлементов;
 $I_{\max}$ — максимальный рабочий ток, $I_{\max} = \bar{\epsilon} T_0 / R$;
 R — электрическое сопротивление ветви термоэлемента, $R = l / (\bar{\sigma} S)$;
 l/S — отношение высоты ветви к площади ее поперечного сечения;
 $\bar{\epsilon}, \bar{\sigma}$ — усредненные значения коэффициента термоэдс и электропроводности ветви термоэлемента соответственно;
 B — относительный рабочий ток, $B = I/I_{\max}$;
 I — рабочий ток;
 Θ — относительный перепад температуры, $\Theta = (T - T_0)/\Delta T_{\max}$;
 $\Delta T_{\max}$ — максимальный перепад температуры, $\Delta T_{\max} = 0,5 \bar{z} T_0^2$;
 $\bar{z}$ — усредненный показатель термоэлектрической эффективности ветви термоэлемента;
 C — относительная тепловая нагрузка, $C = Q_0 / (nI_{\max}^2 R)$;
 K_T — коэффициент, учитывающий влияние пониженной температуры;
 λ_0 — номинальная интенсивность отказов ($\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч).

Поиск токовых режимов, отвечающих различным критериям

1. Определим токовый режим работы охлаждающего ТЭУ, при котором достигается максимум отношения холодопроизводительности Q_0 к интенсивности отказов λ/λ_0 либо при заданном Q_0 достигается минимум λ/λ_0 . Это требование можно записать в виде критерия

$$K_1 = \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{nI_{\max}^2 R (2B - B^2 - \Theta) \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{nB^2(\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 K_T}. \quad (3)$$

Для упрощения дальнейших вычислений перейдем от критерия K_1 к критерию Π , оперирование которым даст практически тот же результат:

$$\begin{aligned} \Pi &= K_1 \frac{K_T (\Theta + C)}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 I_{\max}^2 R} = \\ &= \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из условия $\frac{d\Pi}{dB} = 0$ получим соотношение для определения оптимального рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия Π для заданного относительного перепада температуры:

$$B_{\text{опт}}^3 - 3B_{\text{опт}}^2 + B_{\text{опт}} \Theta \left(2 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (5)$$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима $\Pi_{\max}$ представлена кривой 1 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия Π , приведены в табл. 1 и на рис. 2.

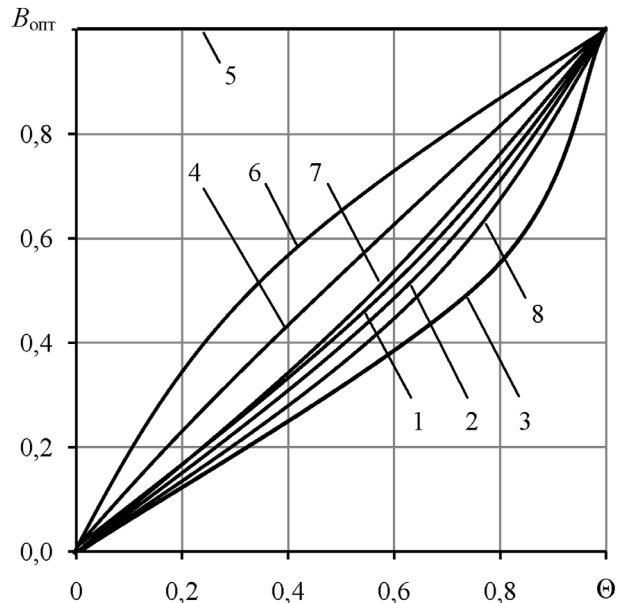


Рис. 1. Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры Θ при $T = 300$ К для различных режимов работы:

1 — $\Pi_{\max}$; 2 — $\lambda_{\min}$; 3 — $Q_0 = 0$; 4 — $\Phi_{\max}$; 5 — $Q_{0\max}$; 6 — $I_{\max}$; 7 — $D_{\max}$; 8 — $Y_{\max}$

Таблица 1

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме $\Pi_{\max}$ для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	$\Delta T_{\max}$, К	$I_{\max}$, А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,64	101,0	5,395	0,099	0,07	0,378	88,5	0,405	1,07	2,47	0,0006	0,0018	0,99999982
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,16	0,842	42,1	0,910	1,08	1,1	0,0149	0,0447	0,9999955
30	10,2	86,8	5,19	0,346	0,27	1,40	30,0	1,69	1,21	0,59	0,122	0,367	0,999963
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,40	2,02	28,1	3,17	1,57	0,315	0,681	2,04	0,999796
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,58	2,84	30,4	6,46	2,27	0,155	3,65	11,0	0,99890
60	9,6	66,8	4,74	0,90	0,84	4,0	60,7	24,1	20,0	0,0415	32,9	98,7	0,9902

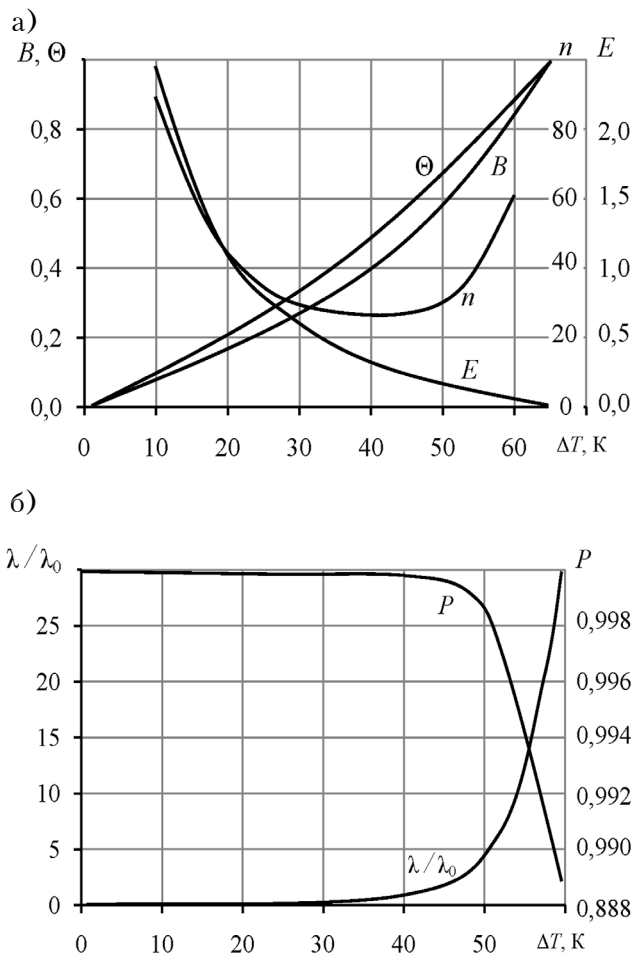


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме $\Pi_{\max}$

2. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_2 = \frac{Q_0}{n} \frac{Q_0}{\lambda / \lambda_0} = \frac{Q_0^2 \lambda_0}{n \lambda} = \frac{n^2 I_{\max}^4 R^2 (2B - B^2 - \Theta)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max} \Theta}{T_0}\right)^2}{n^2 B^2 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max} \Theta}{T_0}\right)^2 K_T} \quad (6)$$

Для удобства проведения дальнейших вычислений перейдем от критерия K_2 к критерию Φ :

$$\Phi = K_2 \frac{K_T (\Theta + C)}{I_{\max}^4 R^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max} \Theta}{T_0}\right)^2} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max} \Theta}{T_0}\right)^2} \quad (7)$$

Из условия $\frac{d\Phi}{db} = 0$ получим соотношение для определения относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия Φ для заданного относительного перепада температуры Θ :

$$B_{\text{опт}}^2 \left(2 - \frac{\Delta T_{\max} \Theta}{T_0}\right) - 2B_{\text{опт}} \Theta - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (8)$$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима $\Phi_{\max}$, который совпадает с режимом $E_{\max}$, представлена кривой 4 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в

Таблица 2

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме $\Phi_{\max}$ для различных значений перепада температуры при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$; $l/S = 10 \text{ 1/см}$; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$; $t = 10^4 \text{ ч}$

$\Delta T, \text{ K}$	$R \cdot 10^3, \text{ Ом}$	$T_{\max}, \text{ K}$	$I_{\max}, \text{ A}$	Θ	$B_{\text{опт}}$	$I, \text{ A}$	$n, \text{ шт.}$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8, \text{ 1/ч}$	P
10	10,75	101,0	5,395	0,099	0,112	0,604	28,4	0,292	0,48	3,42	0,00152	0,0046	0,99999954
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,237	1,25	16,7	0,712	0,57	1,40	0,037	0,110	0,999989
30	10,2	86,8	5,188	0,346	0,376	1,95	13,8	1,39	0,97	0,72	0,233	0,07	0,999930
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,532	2,68	14,0	2,60	0,97	0,385	1,12	3,36	0,99966
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,709	3,48	18,4	5,57	1,60	0,18	5,0	15,0	0,9985
60	9,62	66,8	4,74	0,898	0,908	4,30	49,5	22,5	5,24	0,044	36,1	108,2	0,9892

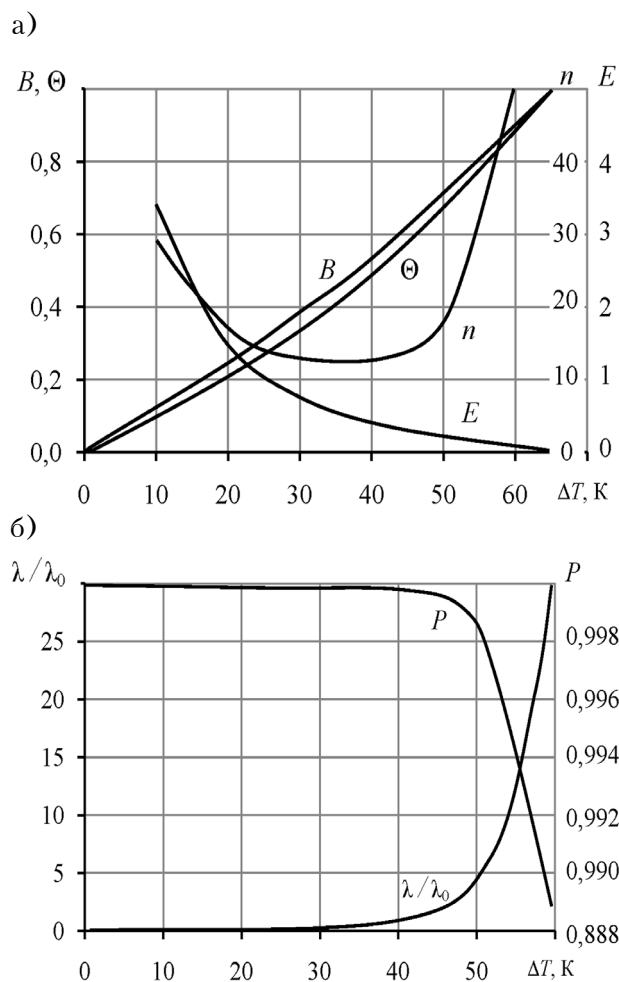


Рис. 3. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$; $l/S = 10 \text{ 1/см}$; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$; $t = 10^4 \text{ ч}$ в режиме $\Phi_{\max}$

режиме, соответствующем максимуму критерия Φ , приведены в табл. 2 и на рис. 3.

3. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_3 = \frac{Q_0^2}{n^2} \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{Q_0^3 \lambda_0}{n^2 \lambda} = \frac{n^3 I_{\max}^6 R^3 (2B - B^2 - \Theta)^3 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{n^3 B^2 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 K_T}. \quad (9)$$

Отметим, что этот критерий составлен для случая, когда преобладающим требованием является увеличение холодопроизводительности по сравнению с режимом $\Phi_{\max}$ ($E_{\max}$).

Для удобства проведения дальнейших вычислений перейдем от критерия K_3 к критерию И:

$$I = K_3 \frac{K_T (\Theta + C)}{I_{\max}^6 R^3 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^3}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}. \quad (10)$$

Из условия получим соотношение для определения относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия И для заданного относительного перепада температуры Θ :

$$B^3 + B^2 \left(1 + 2 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) - B \Theta \left(2 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (11)$$

Таблица 3

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме $I_{\max}$ для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	$T_{\max}$, К	$I_{\max}$, А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,75	101,0	5,395	0,10	0,20	1,08	12,2	0,36	0,33	2,78	0,0016	0,0048	0,99999952
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,36	1,90	9,10	0,825	0,435	1,21	0,114	0,342	0,9999658
30	10,2	86,8	5,188	0,346	0,505	2,62	8,90	1,52	0,58	0,66	0,535	1,61	0,99984
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,65	3,28	10,4	2,76	0,84	0,36	1,92	5,76	0,99942
50	9,8	73,1	4,90	0,68	0,795	3,90	15,5	5,76	1,48	0,174	6,62	19,87	0,9980
60	9,62	66,8	4,74	0,898	0,935	4,43	47,3	22,7	5,12	0,044	38,4	115,3	0,9885

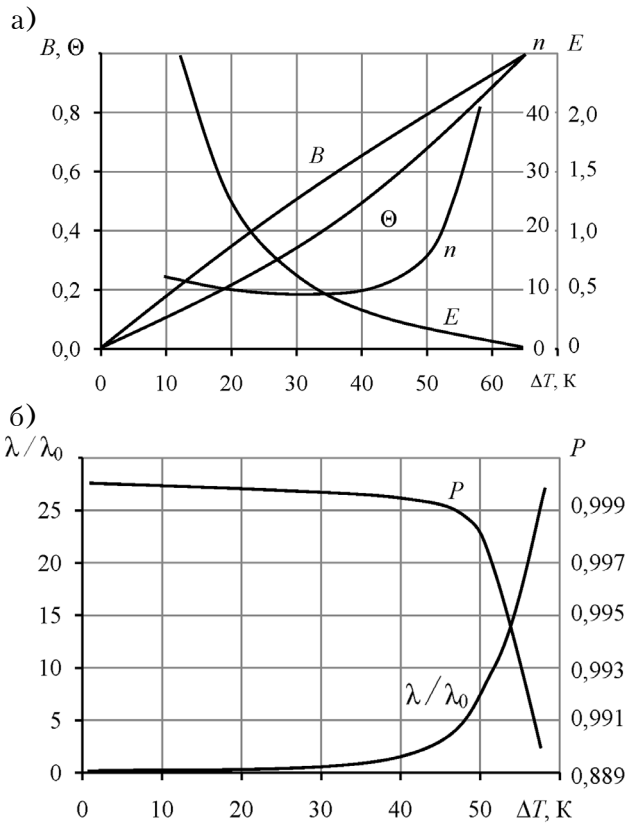


Рис. 4. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме $I_{\max}$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры Θ для режима $I_{\max}$ представлена кривой 6 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия I , приведены в табл. 3 и на рис. 4.

4. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_4 = E \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{Q_0}{W} \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{Q_0^2 \lambda_0}{W \lambda}$$

$$= \frac{n^2 I_{\max}^4 R^2 (2B - B^2 - \Theta)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{2n I_{\max}^2 R B \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) n B^2 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 K_T}$$

$$= \frac{I_{\max}^2 R (2B - B^2 - \Theta)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{2B^3 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^3 K_T}, \quad (12)$$

где $W = 2n I_{\max}^2 R B \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)$ – потребляемая мощность.

Этот критерий составлен для случая, когда преобладающим требованием является уменьшение интенсивности отказов по сравнению с режимом $\Phi_{\max}$ ($E_{\max}$).

Перейдем от критерия K_4 к критерию D :

$$D = K_4 \frac{2K_T (\Theta + C)}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 I_{\max}^2 R B^3 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^3} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^3 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^3}. \quad (13)$$

Из условия dD/dB получим соотношение

для определения оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия D для заданного относительного перепада температуры Θ :

$$2B^3 - B^2 \left(8 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) + 2B\Theta \left(3 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) + 3 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (14)$$

Таблица 4

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме $D_{\max}$ для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	$T_{\max}$, К	$I_{\max}$, А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,75	101,0	5,40	0,10	0,085	0,46	50,1	0,319	0,69	3,1	0,0008	0,0024	0,99999952
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,18	0,95	36,9	0,979	1,03	1,01	0,02	0,061	0,9999658
30	10,2	86,8	5,188	0,346	0,30	1,56	22,2	1,50	0,96	0,67	0,142	0,426	0,99984
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,44	2,22	21,1	2,81	1,265	0,36	0,76	2,28	0,99942
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,627	3,07	24,0	5,84	1,90	0,171	3,62	10,9	0,9980
60	9,62	66,8	4,74	0,898	0,885	4,20	52,1	22,65	5,40	0,0442	34,4	103,1	0,9885

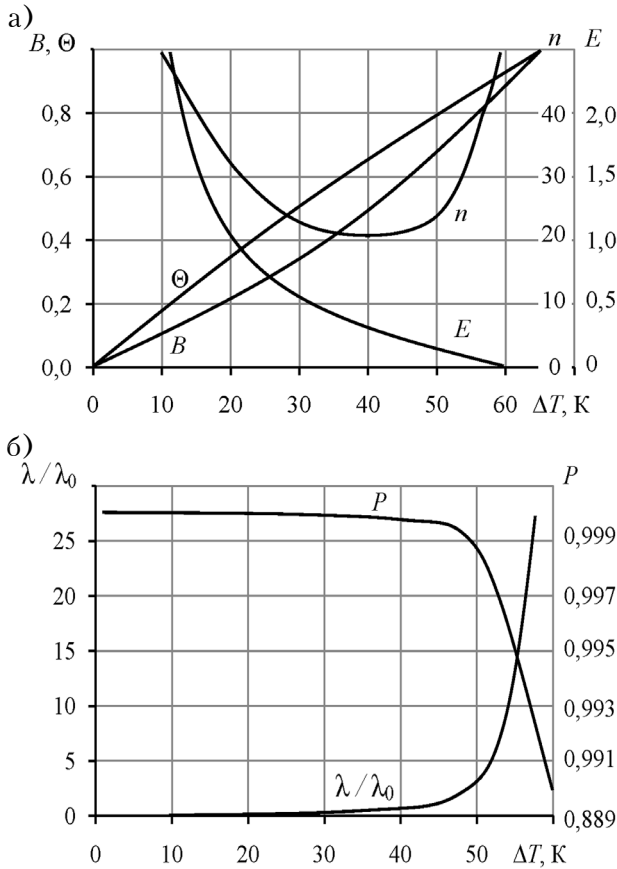


Рис. 5. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме $D_{\max}$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима $D_{\max}$ представлена кривой 7 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия $D_{\max}$, приведены в табл. 4 и на рис. 5.

5. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_5 = \frac{U}{WI} \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2 R \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{B^4 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 (\Theta + C) K_T}. \quad (15)$$

Этот критерий составлен для случая, когда преобладающим требованием является увеличение падения напряжения и уменьшение рабочего тока по сравнению с режимом $\lambda_{\min}$.

Перейдем от критерия K_5 к критерию Y :

$$Y = K_5 \frac{K_T (\Theta + C)}{R \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^4 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}. \quad (16)$$

Из условия $\frac{dY}{dB} = 0$ получим соотношение для определения оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия Y для заданного относительного перепада температуры Θ :

$$2B^3 - B^2 \left(5 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) + 3B\Theta \left(3 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) + 2 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (17)$$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима $Y_{\max}$ представлена кривой 8 на рис. 1.

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме $Y_{\max}$ для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	$T_{\max}$, К	$I_{\max}$, А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,75	101,0	5,40	0,10	0,065	0,35	124	0,50	1,44	2,0	0,00074	0,0022	0,99999977
20	10,42	93,7	5,32	0,213	0,138	0,73	75,3	1,28	1,74	0,78	0,014	0,042	0,9999958
30	10,31	86,8	5,13	0,35	0,235	1,20	57,0	2,52	2,1	0,40	0,129	0,39	0,999961
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,355	1,80	46,9	4,31	2,4	0,232	0,69	2,1	0,99979
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,525	2,57	47,0	8,4	3,27	0,119	3,76	11,28	0,99887
60	9,62	66,8	4,74	0,9	0,790	3,74	82,8	29,1	7,8	0,034	35,3	105,8	0,9895

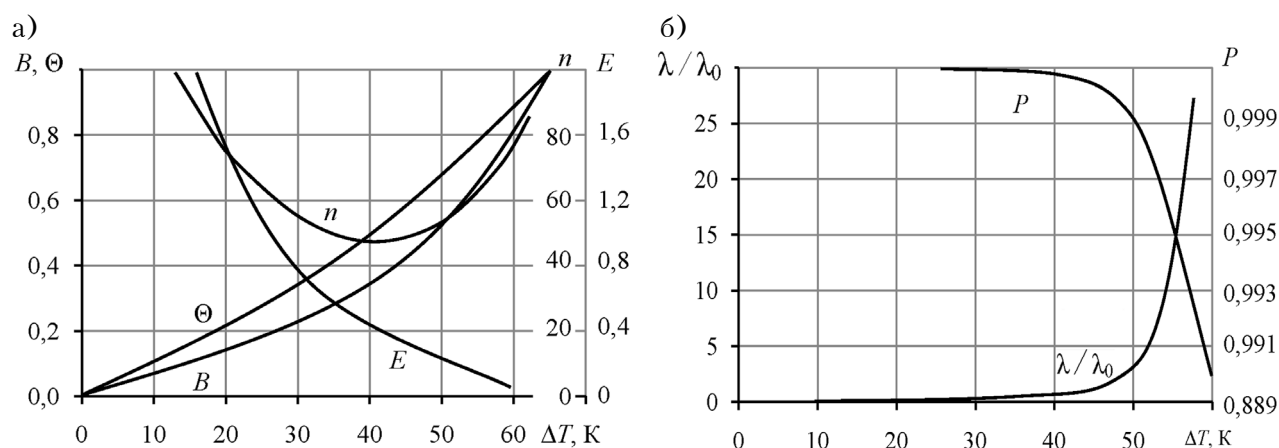


Рис. 6. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме $Y_{\max}$

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия Y , приведены в табл. 5 и на рис. 6.

Обсуждение результатов

Анализ приведенных выше результатов расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режимах, соответствующих максимуму различных рассмотренных критериев, при $Q_0 = 1,0$ Вт, $T = 300$ К, $l/S = 10$ 1/см, $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К показал, что во всех этих случаях с ростом перепада температуры ΔT от 10 до 60 К происходит следующее:

- уменьшаются электрическое сопротивление ветви термоэлемента R , максимальный перепад температуры $\Delta T_{\max}$, максимальный рабочий ток $I_{\max}$, холодильный коэффициент E ;

- увеличиваются относительный рабочий ток B , а следовательно и величина рабочего тока I , относительный перепад температуры Θ , падение напряжения U ;

- зависимость количества термоэлементов n от ΔT проходит через минимум в области значений $\Delta T = 30 - 40$ К;

- увеличивается интенсивность отказов λ/λ_0 и, соответственно, уменьшается вероятность безотказной работы P .

Для возможности сравнения характеристик однокаскадного ТЭУ, работающего в различных токовых режимах, в табл. 6 приведены основные параметры и показатели надежности, полученные при $\Delta T = 40$ К.

При выборе токового режима работы однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства необходимо проводить комплексную оценку основных характеристик ТЭУ, таких как холодильный коэффициент E , холодопроизводительность Q_0 , интенсивность отказов λ/λ_0 , количество термоэлементов n , величина рабочего тока I , падение напряжения U и т. д. Поскольку при проектировании ТЭУ часто используется токовый режим работы $E_{\max}$ (в нашем случае это режим $\Phi_{\max}$), обеспечивающий максимальную энергетическую эффективность, в табл. 7 приведены данные, которые отражают отличие основных параметров ТЭУ в различных токовых режимах работы от параметров в режиме $\Phi_{\max}$.

Таблица 6

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в различных токовых режимах при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $l/S = 10 \text{ 1/см}$; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$; $t = 10^4 \text{ ч}$

Режим работы	B	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
$Q_{0\max}$	1,0	5,04	7,9	4,64	0,92	0,22	8,03	24,1	0,9976
$I_{\max}$	0,65	3,3	10,4	2,80	0,84	0,36	5,3	10,5	0,99895
$\Phi_{\max}$	0,53	2,7	14,0	2,60	0,97	0,39	1,12	3,4	0,99966
$D_{\max}$	0,44	2,2	21,1	2,80	1,27	0,36	0,76	2,3	0,99977
$\Pi_{\max}$	0,40	2,0	28,1	3,20	1,57	0,32	0,68	2,0	0,99980
$\lambda_{\min}$	0,39	1,96	30,8	3,33	1,70	0,30	0,665	1,996	0,99980
$Y_{\max}$	0,36	1,81	43,5	4,1	2,27	0,24	0,675	2,03	0,99980

Таблица 7

Процентное отличие параметров однокаскадного ТЭУ в различных токовых режимах от параметров в режиме $\Phi_{\max}$ (или $E_{\max}$)

Режим работы	Отличие в % сравниваемых параметров:				
	B	n , шт.	U , В	E	λ/λ_0
$I_{\max}$	+22	-35	-15	-8	+370
$D_{\max}$	-20	+51	+31	-8	-47
$\Pi_{\max}$	-32	+100	+63	-22	-65
$Y_{\max}$	-47	+210	+130	-62	-66
$\lambda_{\min}$	-36	+120	+75	-30	-68

Из анализа приведенных в табл. 7 данных можно дать следующие рекомендации по выбору токового режима работы однокаскадного ТЭУ вместо традиционно используемого режима $E_{\max}$ в зависимости от преобладающих требований:

- 1) сокращение количества термоэлементов — режим $I_{\max}$;
- 2) уменьшение величины рабочего тока и интенсивности отказов — режим $D_{\max}$;
- 3) уменьшение величины рабочего тока, увеличение падения напряжения и уменьшение интенсивности отказов — режим $\Pi_{\max}$;
- 5) высокая надежность при значительном уменьшении рабочего тока и увеличении падения напряжения — режим $Y_{\max}$;
- 4) максимальная надежность при малом рабочем токе и повышенном напряжении питания — режим $\lambda_{\min}$.

Выводы

Из проведенного исследования можно заключить, что критериальный подход является удобным инструментом поиска компромиссных токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента. Полученные с помощью введенных критериев соотношения позволяют определить основные параметры и показатели надежности однокаскадных ТЭУ повышенной надежности для ряда токовых режимов работы, близких к режиму минимальной интенсивности отказов $\lambda_{\min}$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Huan-Liang Tsai, Phuong Truong Le. Self-sufficient energy recycling of light emitter diode/thermoelectric generator module for its active-cooling application // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 118. — P. 170—178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.077>
2. Semenyuk V.A., Dekhtiaruk R.I. Increase in CPU power by integrating TEC into the standard heat sink: experimental results // Journal of Thermoelectricity. — 2011. — N 32. — P. 69—78.
3. Anatychuk L., Vikhor L., Rozver Yu. et al. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes // Heat Pipe Science and Technology, An International Journal. — 2011. — Vol. 2, iss. 1-4. — P. 115—120. <http://dx.doi.org/10.1615/HeatPipeScieTech.v2.i1-4.120>
4. Анатыхчук Л.И., Вихор Л.Н., Николаенко Ю.Е. и др. Моделирование крупноформатного термоэлектрического модуля охлаждения с тепловыми трубами // Термоэлектричество. — 2010. — № 3. — С. 71—77.
5. Reiyu Chein, Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling. Applied Thermal Engineering. — 2004. — Vol. 24, iss. 14-15. — P. 2207—2217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.001>
6. Li C. et al. Thermoelectric cooling for power electronics circuits: Modeling and applications // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE. — P. 3275—3282.
7. Зайков В. П., Киншова Л. А., Быкадоров В. В., Храмова Л. Ф. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического устройства // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 5. — С. 37—41.
8. Зайков В. П., Киншова Л. А. Комплексный подход при выборе режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. — 1999. — Вып. 1. — С. 47—49.
9. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Выбор режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства, обеспечивающего минимальную интенсивность отказов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 2. — С. 45—47.
10. Зайков В. П., Ефремов В. И. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического устройства для систем термостабилизации // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. — 2001. — Вып. 1. — С. 47—50.
11. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009.

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.01 2017 г.

КРИТЕРИАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ СТРУМОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ

Розглянуто можливості критеріального підходу до визначення струмового режиму роботи однокаскадного термоелектричного охолоджувального пристрою (ТЕП) при використанні інтенсивності відмов як базового параметра надійності. Отримано співвідношення, що дозволяють визначити струмовий режим роботи ТЕП із заданою геометрією гілок для різних умов експлуатації з урахуванням різних обмежувальних вимог. Проведено порівняльний аналіз струмових режимів, близьких до режимів максимальної енергоефективності та мінімальної інтенсивності відмов, який дозволяє вибрати компромісні варіанти.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувальний пристрій, режим роботи, показники надійності, геометрія гілок термоелементів, електронні компоненти.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.38
UDC 621.362–192

V. P. ZAIKOV, V. I. MESHCHERYAKOV¹,
Yu. I. ZHURAVLYOV²

Ukraine, ¹Odessa State Environmental University,
²National University «Odessa Maritime Academy»
E-mail: gradan@ua.fm

CRITERIAL APPROACH TO FINDING THE CURRENT OPERATION MODES OF HIGH RELIABILITY THERMOELECTRIC DEVICES

The authors consider possibilities of the criterial approach to determining the current operating mode of a single-stage thermoelectric cooling unit (TCU), when used reliability failure rate as a basic parameter. The relations were obtained for determining the current operating mode of a TCU with a given geometry of the branches for different operating conditions, taking into account a variety of restrictive requirements. The paper presents a comparative analysis of current conditions close to the maximum energy efficiency and minimum modes failure rate, which allows choosing compromise options.

Keywords: thermoelectric cooling device operation, reliability, thermocouple branches geometry, electronic components.

REFERENCES

1. Huan-Liang Tsai, Phuong Truong Le. Self-sufficient energy recycling of light emitter diode/thermoelectric generator module for its active-cooling application. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 118, pp. 170-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.077>
2. Semenyuk V.A., Dekhtiaruk R.I. Increase in CPU power by integrating TEC into the standard heat sink: experimental results. *Journal of Thermoelectricity*, 2011, no. 32, pp. 69-78.
3. Anatychuk L., Vikhor L., Rozver Yu., Rassamakin B., Khairnasov S., Nikolaenko Yu. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*, 2011, vol. 2, iss. 1-4, pp. 115-120. <http://dx.doi.org/10.1615/HeatPipeScieTech.v2.i1-4.120>
4. Anatychuk L., Vikhor L., Nikolaenko Yu., Rassamakin B., Rozver Yu. [Simulation of large format thermoelectric cooling module with heat pipes]. *Journal of Thermoelectricity*, 2010, no. 3, pp. 71-77.
5. Reiyu Chein, Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2004, vol. 24, iss. 14-15, pp. 2207-2217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.001>
6. Li C. et al. Thermoelectric Cooling for power electronics circuits: Modeling and applications. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, pp. 3275-3282.
7. Zaykov V. P., Kinshova L. A., Bykadorov V. V., Khranova L. F. [Criterial approach to the selection of the operating mode of the thermoelectric device]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2003, no. 5, pp. 37-41. (Rus)
8. Zaykov V. P., Kinshova L. A. [Integrated approach when choosing modes of operation of the thermoelectric cooling device]. *Teplovye Rezhimy i Okhlazhdenie REA*, 1999, iss. 1, pp. 47-49. (Rus)
9. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F., Efremov V. I., Melnik Yu. V. Choice of mode of operations of the thermoelectrical cooling device, ensuring the minimal failure rate. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2008, no. 2, pp. 45-47. (Rus)
10. Zaykov V. P., Efremov B. I. [Criterial approach to the selection of the operating mode of the thermoelectric device for thermal systems]. *Teplovye Rezhimy i Okhlazhdenie REA*, 2001, iss. 1, pp. 47-50. (Rus)
11. Zaykov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognozirovaniye pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Reliability indicators prediction for thermoelectric cooling devices. Book 1. Single-stage unit]. Odessa, Politehperiodika, 2009, 120 p. (Rus)