

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, к. т. н. Л. А. КИНШОВА,
Л. Д. КАЗАНЖИ, Л. Ф. ХРАМОВА

Украина, г. Одесса, НИИ «Шторм»

Дата поступления в редакцию
29.04 2009 г.

Оппонент К. х. н. Л. Т. СТРУТИНСКАЯ
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ДВУХКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В РЕЖИМЕ $Q_{0\max}$

Получены соотношения для оценки показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различной конструкции в зависимости от их основных значимых параметров в режиме $Q_{0\max}$.

В последнее время в термоэлектрическом приборостроении все более широкое применение находят унифицированные ряды модулей и собранные на их основе каскадные термоэлектрические охлаждающие устройства (ТЭУ) различных конструкций.

Интерес к применению каскадных ТЭУ вызван не только необходимостью достижения максимально возможного уровня охлаждения, но и повышением экономичности охлаждения при заданном перепаде температуры.

В ряде случаев при проектировании в распоряжении разработчика имеется ряд конструкций каскадных ТЭУ либо ряд унифицированных (стандартных) модулей, отличающихся друг от друга количеством термоэлементов заданной геометрии.

При компоновке каскадного ТЭУ необходимо оценить величину максимальной холодопроизводительности при заданном перепаде температуры ΔT на устройстве. Для этой цели необходимо при заданной величине ΔT и выбранной конструкции ТЭУ, т. е. при заданном количестве термоэлементов в каскадах (в первом, «холодном» — n_1 , во втором, «горячем» — n_2), определить основные значимые параметры, а именно значения относительного рабочего тока и относительного перепада температуры в каскадах, и затем оценить показатели надежности ТЭУ, чему и посвящена настоящая статья.

Рассмотрим двухкаскадные ТЭУ с последовательным электрическим соединением каскадов, которые, как правило, собираются на базе унифицированных и одинаковых ветвей термоэлементов или стандартных модулей с такими ветвями. Поэтому при определении показателей надежности каскадного ТЭУ (интенсивности отказов λ и вероятности безотказной работы P) полагаем, что все ветви термоэлементов ТЭУ, в том числе и каскады, соединены электрически последовательно, причем выход из строя любого термоэлемента (ветви) приводит к выходу из строя модуля, каскада и устройства в целом.

События, заключающиеся в выходе термоэлементов из строя, принимаются независимыми [1]. Кроме

того, каждый каскад работает в различных температурных условиях, что необходимо учитывать при оценке показателей надежности каскадного ТЭУ заданной конструкции в режиме $Q_{0\max}$.

Для решения поставленной задачи воспользуемся известными соотношениями, в которые с соответствующими каскадами индексами входят следующие величины:

$I_{\max}$ — максимальный рабочий ток;
 e — коэффициент термоэдс ветви термоэлемента;
 R — электрическое сопротивление ветви термоэлемента;
 B — относительный рабочий ток, $B = I/I_{\max}$;
 Q — относительный перепад температуры;
 $\Delta T_{\max}$ — максимальный перепад температуры.

Характерными температурами двухкаскадного ТЭУ являются:

T_0 — температура теплопоглощающего спая первого каскада;
 T_1 — промежуточная температура (температура между каскадами);
 T — температура тепловыделяющего спая второго каскада.

Холодопроизводительность двухкаскадного ТЭУ определяется первым каскадом и вычисляется по формуле

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

$$\text{где } I_{\max 1} = \frac{e_1 T_0}{R_1};$$

$$\Theta_1 = \frac{T_1 - T_0}{\Delta T_{\max 1}}.$$

Последовательное электрическое соединение каскадов определяет равенство рабочих токов в каскадах, т. е.

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

Общий перепад температуры на двухкаскадном ТЭУ складывается из перепадов температуры в каскадах $\Delta T_1 = T_1 - T_0$ и $\Delta T_2 = T - T_1$:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T_{\max 1} Q_1 + \Delta T_{\max 2} Q_2, \quad (3)$$

$$\text{где } \Theta_2 = \frac{T - T_1}{\Delta T_{\max 2}}.$$

Условие теплового сопряжения каскадов можно записать в виде

$$Q_{02} = W_1 + Q_0, \quad (4)$$

где Q_{02} — холодопроизводительность второго каскада,

$$Q_{02} = n_2 I_{\max 2}^2 R_2 (2B_2 - B_2^2 - \Theta_2);$$

W_1 — мощность потребления первого каскада,

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

Подставив выражения (1)–(3) в (4), получим

$$C_1 = \frac{2B_1 b - B_1^2 c + 2B_1^3 a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}}}{d - 2B_1 a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0}}, \quad (5)$$

где C_1 — относительная тепловая нагрузка первого каскада,

$$C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1};$$

$$a = \frac{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

$$b = \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}};$$

$$c = \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + 4a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} + \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + 2a;$$

$$d = \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a.$$

Из условия $\frac{dC_1}{dB_1} = 0$ получим уравнение для оп-

ределения оптимального относительного рабочего тока первого каскада $B_{1\text{опт}}$, соответствующего максимуму холодопроизводительности двухкаскадного ТЭУ заданной конструкции:

$$AB_1^3 - BB_1^2 + LB_1 - D = 0, \quad (6)$$

где $A = 4a^2 \left(\frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right)^2$;

$$B = a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \left[4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a \left(5 + 4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) + \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} \right];$$

$$L = \left(\frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a \right) c;$$

$$D = \left(\frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right) \left(\frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a \right) - a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}}.$$

С погрешностью не более 1% выражение (6) можно упростить и представить в виде квадратного уравнения

$$BB_1^2 - LB_1 + D = 0. \quad (7)$$

Точное значение T_1 можно получить используя метод последовательных приближений, уточняя основные значимые параметры двухкаскадного ТЭУ B_1 , B_2 , Θ_1 , Θ_2 с учетом температурной зависимости па-

раметров. Для получения результата достаточно двух-трех приближений.

С учетом [2, 3] относительную величину интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2} k_{T1} + \frac{n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2} k_{T2}, \quad (8)$$

где λ_0 — номинальная интенсивность отказов;

C_2 — относительная тепловая нагрузка второго каскада,

$$C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

k_{T1} , k_{T2} — коэффициент значимости, учитывающий влияние пониженной температуры.

Расчеты основных значимых параметров ТЭУ проводились для конфигурации ветвей $l/s=10$ (l , s — длина и площадь поперечного сечения ветви, соответственно) при усредненном значении эффективности термоэлектрического модуля $z_m = 2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К. Результаты расчетов для различных значений отношения числа термоэлементов в каскадах n_1/n_2 при постоянном n_1 сведены в таблицу.

Анализ полученных данных показал, что с уменьшением величины n_1/n_2 основные параметры ТЭУ изменяются следующим образом:

- промежуточная температура T_1 уменьшается (рис. 1);
- величина относительного рабочего тока в каскадах увеличивается;
- относительный перепад температуры в первом каскаде уменьшается, во втором — увеличивается;
- максимальная относительная холодопроизводительность первого каскада $C_{1\text{max}}$ увеличивается;
- интенсивность отказов увеличивается;
- вероятность безотказной работы уменьшается.

С ростом перепада температуры на ТЭУ в диапазоне $\Delta T=60$ —80 К при $n_1/n_2=\text{const}$ происходит следующее:

- промежуточная температура T_1 и относительный перепад температуры во втором каскаде Θ_2 практически не изменяются;
- относительный перепад температуры в первом каскаде Θ_1 увеличивается;
- величина $C_{1\text{max}}$ уменьшается;
- интенсивность отказов незначительно увеличивается;
- вероятность безотказной работы ТЭУ уменьшается.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Основные параметры двухкаскадного ТЭУ при $T=300$ К, $Q_0=0,1$ Вт, $n_1=9$

B_1	B_2	I , А	Θ_1	Θ_2	n_2/n_1	T_1 , К	$\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_0 n_1}$	λ_Σ , 10^{-8} 1/ч	P	C_1	$Q_{0\max}$, Вт
$\Delta T=60$ К											
0,48	0,42	2,1	0,65	0,19	1,00	282	0,08	2,04	0,9998	0,07	0,12
0,59	0,55	2,7	0,46	0,35	0,67	270	0,18	4,87	0,9995	0,23	0,41
0,66	0,63	3,0	0,38	0,44	0,50	264	0,41	11,13	0,9989	0,33	0,59
0,72	0,76	3,4	0,25	0,59	0,33	255	1,16	31,33	0,9969	0,50	0,88
0,82	0,84	3,8	0,14	0,72	0,20	249	2,76	74,49	0,9926	0,68	1,19
0,91	0,92	4,3	0,04	0,84	0,10	242	7,67	207,11	0,9795	0,87	1,52
$\Delta T=70$ К											
0,58	0,54	2,7	0,70	0,33	0,67	271	0,23	6,21	0,9994	0,09	0,15
0,69	0,61	3,1	0,62	0,43	0,50	265	0,46	12,33	0,9988	0,20	0,32
0,73	0,73	3,3	0,46	0,57	0,33	256	1,07	29,00	0,9971	0,35	0,56
0,88	0,79	3,6	0,34	0,69	0,20	249	2,33	63,00	0,9937	0,55	0,82
0,92	0,90	4,2	0,22	0,84	0,10	242	7,20	194,00	0,9808	0,71	1,14
$\Delta T=80$ К											
0,70	0,61	3,0	0,84	0,42	0,50	264	0,54	14,60	0,9985	0,07	0,10
0,79	0,72	3,5	0,70	0,57	0,33	256	1,19	32,18	0,9968	0,21	0,31
0,86	0,81	3,8	0,57	0,71	0,20	249	2,70	72,80	0,9927	0,35	0,52
0,92	0,90	4,1	0,45	0,84	0,10	242,5	7,40	199,60	0,9802	0,50	0,72
$\Delta T=0$ К											
0,41	0,46	2,2	-0,32	0,40	1,00	266	0,13	3,42	0,9997	0,40	1,16
0,59	0,69	3,3	-0,40	0,54	0,50	258	0,99	26,80	0,9973	0,75	2,20
0,68	0,80	3,8	-0,45	0,63	0,33	252	2,33	62,80	0,9937	0,97	2,90
0,76	0,92	4,2	-0,50	0,73	0,20	247	5,65	152,50	0,9849	1,18	3,38
0,82	1,02	4,5	-0,55	0,85	0,10	243	14,20	382,00	0,9625	1,37	3,85

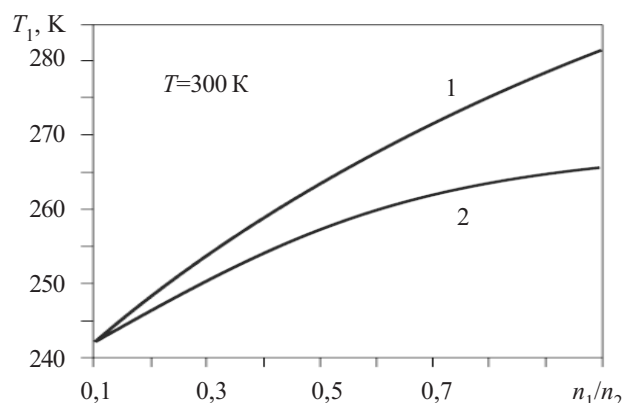


Рис. 1. Зависимость промежуточной температуры от величины отношения n_1/n_2 при $\Delta T=60$ —80 К в режиме $Q_{0\max}$ (1) и в режиме теплового насоса (2)

Так как выражение для относительной величины максимальной холодопроизводительности носит обобщенный характер, оно позволяет определить величину максимальной холодопроизводительности при любом значении n_1 и l/s . Так, при $n_1=9$, $l/s=10$ и $n_1/n_2=0,5$:

$$\begin{aligned} \Delta T=60 \text{ К, } Q_{0\max} &=0,6 \text{ Вт;} \\ \Delta T=70 \text{ К, } Q_{0\max} &=0,33 \text{ Вт;} \\ \Delta T=80 \text{ К, } Q_{0\max} &=0,1 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

С точки зрения распределения температурного поля наибольший интерес представляет режим теплового насоса, т. е. при $\Delta T=0$ К. В этом режиме при уменьшении величины n_1/n_2 происходит следующее:

- промежуточная температура T_1 уменьшается (см. рис. 1);
- величина относительного рабочего тока в каскадах увеличивается (рис. 2);

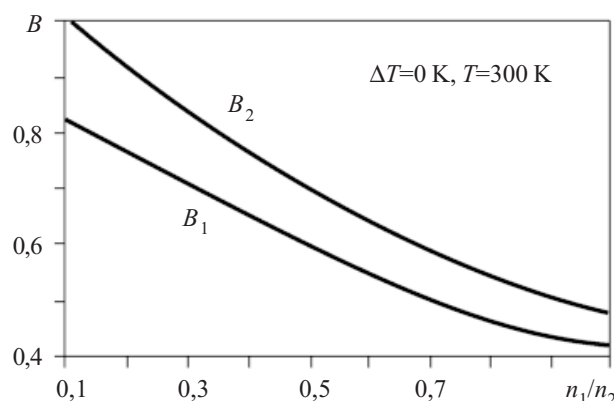


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока в каскадах от величины отношения n_1/n_2 в режиме теплового насоса

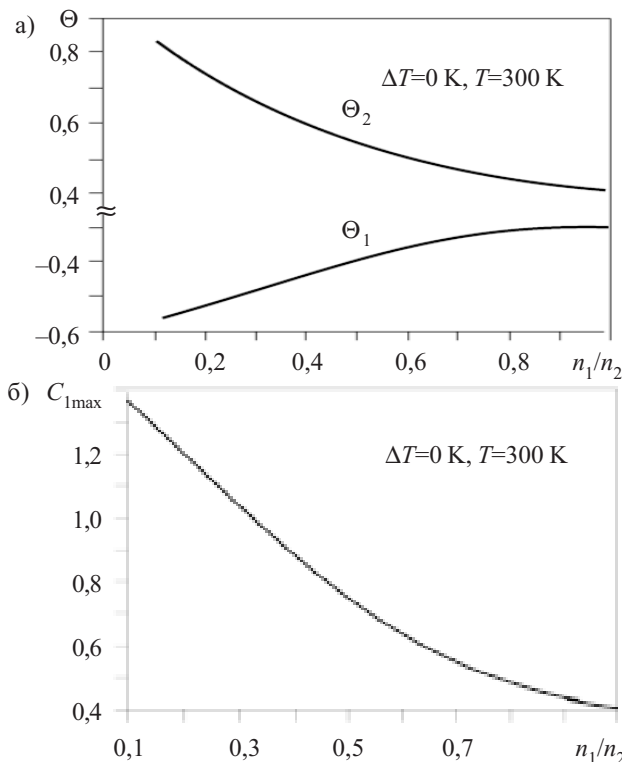


Рис. 3. Зависимость относительных значений перепада температуры в каскадах (а) и максимальной холодопроизводительности (б) двухкаскадного ТЭУ от величины отношения n_1/n_2 в режиме теплового насоса

— относительный перепад температуры в первом каскаде, хотя и имеет отрицательное значение (из-за обратного перепада температуры), уменьшается по абсолютной величине, а во втором каскаде увеличивается (рис. 3, а);

— величина C_{lmax} увеличивается и при $n_1/n_2 = 0,1$ достигает значения 1,37 (рис. 3, б), что превышает максимальную холодопроизводительность однокаскадного ТЭУ на 37% (для однокаскадного ТЭУ при $T = 300$ К, $\Delta T = 0$, $l/s = 10$: $B = 1$, $\theta = 0$, $n = 9$, $E = 0,5$, $C_{max} = 1$, $Q_{0max} = 3$ Вт);

— по сравнению с режимами, когда $\Delta T > 0$, интен-

сивность отказов растёт (соотношение $\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0 n_1}$ носит обобщенный характер, т. к. позволяет определить интенсивность отказов ТЭУ с любым количеством термоэлементов в первом каскаде (рис. 4, а) — так, при $n_1 = 9$, $n_1/n_2 = 0,5$ $\lambda_{\Sigma} = 27 \cdot 10^{-8}$ 1/ч);

— вероятность безотказной работы уменьшается, причем при $n_1/n_2 < 0,33$ наблюдается ее резкое уменьшение (рис. 4, б).

Таким образом, предложена и рассмотрена модель взаимосвязи показателей надежности двухкаскадного ТЭУ заданной конструкции с его основными значимыми параметрами при последовательном электрическом соединении каскадов в режиме Q_{0max} . Полученные соотношения позволяют оценить интенсивность отказов и вероятность безотказной работы,

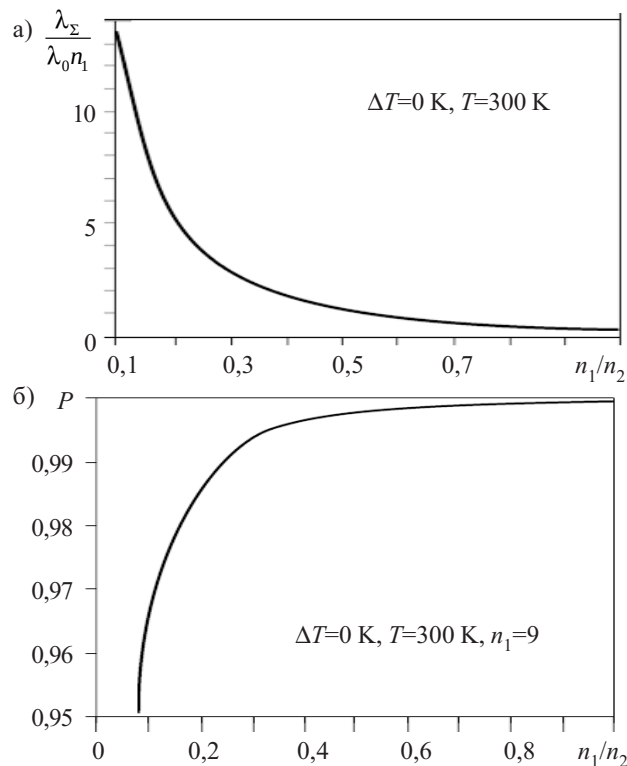


Рис. 4. Зависимость относительной величины интенсивности отказов (а) и вероятности безотказной работы (б) двухкаскадного ТЭУ от величины отношения n_1/n_2 в режиме теплового насоса

определить максимальную холодопроизводительность ТЭУ в зависимости от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах с учетом температурной зависимости основных параметров.

Полученные соотношения позволяют также проанализировать работу двухкаскадного ТЭУ в режиме теплового насоса (при $\Delta T = 0$ К). Установлено, что в таком режиме при использовании двухкаскадного ТЭУ можно получить значительно большую, чем в однокаскадном варианте, холодопроизводительность при $n_1/n_2 < 0,33$. Величина интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ, работающего в режиме теплового насоса, практически в два раза больше, чем при работе в режиме охлаждения при $\Delta T = 60$ К.

Приведенные данные позволяют прогнозировать показатели надежности двухкаскадных ТЭУ заданной конструкции в различных условиях эксплуатации и вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием ТЭУ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонтьев Л. П. Введение в теорию надежности радиоэлектронной аппаратуры.— Рига: АН ЛССР, 1963.
2. Моисеев В. Ф., Зайков В. П. Влияние режима работы охлаждающего термоэлемента на показатели надежности термоэлектрического устройства // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 4–5.— С. 30–32.
3. Зайков В. П., Киншова Л. А., Марченко В. И. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности термоэлектрического устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА.— 2003.— Вып. 1.— С. 56–62.