

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, к. т. н. Л. А. КИНШОВА, к. т. н. В. Ф. МОИСЕЕВ,
к. т. н. В. И. ЕФРЕМОВ, Ю. В. МЕЛЬНИК

Украина, г. Одесса, НИИ «Шторм»
E-mail: shtorm@te.net.ua

Дата поступления в редакцию
27.12.2007 г.

Оппонент д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

ВЫБОР РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО МИНИМАЛЬНУЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

Выполнен сравнительный анализ показателей надежности ТЭУ для различных токовых режимов. Показана возможность прогнозирования показателей надежности на стадии проектирования устройств.

Одним из применяемых способов обеспечения теплового режима элементов и составных частей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является термоэлектрическое охлаждение. К числу его основных преимуществ следует отнести примерное соответствие показателей надежности и массогабаритных характеристик термоэлектрических устройств (ТЭУ) и охлаждаемых элементов электроники.

При выборе режима работы ТЭУ необходимо учитывать взаимное влияние и весомость каждого из основных значимых параметров, к которым относятся величина относительного рабочего тока B , относительный перепад температуры Θ , количество термоэлементов n , холодильный коэффициент E , холодопроизводительность Q_0 и т. д.

К числу основных значимых параметров следует отнести и показатели надежности ТЭУ — интенсивность отказов λ либо вероятность безотказной работы P .

В [1] предложена и рассмотрена физическая модель, устанавливающая связь между показателями надежности и основными значимыми параметрами ТЭУ.

В литературе по термоэлектрическому охлаждению описаны различные режимы работы ТЭУ — характерные, такие как $Q_{0\max}$, $E_{\max}$, $Q_0=0$ и пр., и, так называемые, промежуточные [2—7].

Проектирование ТЭУ в режиме максимальной холодопроизводительности $Q_{0\max}$, хотя и обеспечивает уменьшение количества термоэлементов (а следовательно и величины интенсивности отказов), однако приводит к росту величины B , уменьшению холодильного коэффициента E , увеличению энергозатрат W и т. д., что, в свою очередь, приводит к значительному увеличению интенсивности отказов.

Проектирование ТЭУ в режиме $E_{\max}$ позволяет свести энергозатраты к минимуму, уменьшив этим интенсивность отказов, но в то же время требует увеличения количества термоэлементов, что вызывает рост интенсивности отказов.

При работе охлаждающего термоэлемента в режимах, близких к $Q_0=0$, с увеличением количества термоэлементов резко уменьшается величина рабочего тока, что приводит к уменьшению интенсивности отказов.

На основании изложенного можно сделать предположение о существовании такого режима работы ТЭУ, при котором интенсивность отказов была бы минимальной.

Поэтому целью настоящей работы является поиск режима работы охлаждающего термоэлемента, промежуточного между режимами $E_{\max}$ и $Q_0=0$, обеспечивающего минимальную величину λ .

В соответствии с [1, 7], относительную величину интенсивности отказов $\frac{\lambda}{n\lambda_0}$ можно представить в виде:

$$\frac{\lambda}{n\lambda_0} = \frac{B^2 \Theta (B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta)^2}{(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta)^2}, \quad (1)$$

где λ_0 — номинальная интенсивность отказов,

$\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч;

$\Delta T_{\max}$ — максимальный перепад температур;

T_0 — температура теплопоглощающего спая.

Расчетное количество термоэлементов можно записать в следующем виде [2]:

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max}^2 R (2B - B^2 - \Theta)}, \quad (2)$$

где Q_0 — заданная холодопроизводительность;

$I_{\max} = \frac{eT_0}{R}$ — максимальная величина рабочего тока;

e — коэффициент термоэдс;

R — электрическое сопротивление ветви термоэлемента.

Подставив (2) в (1), получим:

$$A = \frac{\lambda_{\max}^2 R}{\lambda_0 Q_0} (1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta)^2 = \frac{B^2 \Theta (B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta)^2}{(2B - B^2 - \Theta)}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена зависимость интенсивности отказов ТЭУ от величины относительного рабочего тока для различных значений относительного перепада температуры при $T=300$ К.

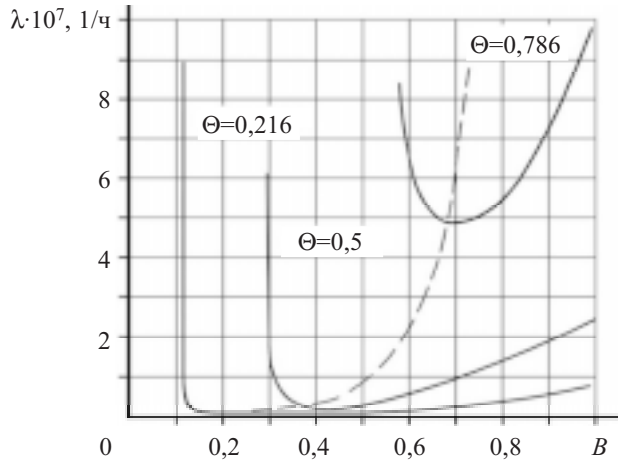


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов ТЭУ от величины относительного рабочего тока для различных значений относительного перепада температуры при $T=300$ К (--- геометрическое место точек, соответствующих режимам работы ТЭУ, обеспечивающим минимальное значение λ при различных величинах Θ)

Как видно из рисунка, характерной особенностью всех приведенных кривых является наличие минимума функции $\lambda=f(B)$.

Из условия $\frac{dA}{dB} = 0$ получим уравнение для определения величины $B_{\text{опт}}$, соответствующей минимальному значению λ для различных значений Θ :

$$B^4 - B^3 \left(3 - \Theta \frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0} \right) + 2\Theta B^2 \left(1 - 2 \frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0} \right) + B\Theta^2 \frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0} \left(3 - \frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0} \right) + \Theta^3 \left(\frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0} \right)^2 = 0. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены зависимости относительного рабочего тока B от относительного перепада температур Θ для различных режимов работы ТЭУ.

Для построения кривых 4, 5 и 6 соответственно были использованы критериальные соотношения Γ , L и F , а именно:

$$1. \Gamma = \frac{Q_0}{I^4};$$

$$\frac{2\Gamma I_{\text{max}}^2}{R} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^4}, \quad (5)$$

где Q_0 определяется из (2), а $B=I/I_{\text{max}}$.

$$\text{Из условия } \frac{d\left(\frac{2\Gamma I_{\text{max}}^2}{R}\right)}{dB} = 0 \text{ получим}$$

$$B = \frac{3}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{8\Theta}{9}} \right]. \quad (6)$$

$$2. L = \frac{Q_0}{I^6};$$

$$\frac{2I_{\text{max}}^4 L}{R} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^6}. \quad (7)$$

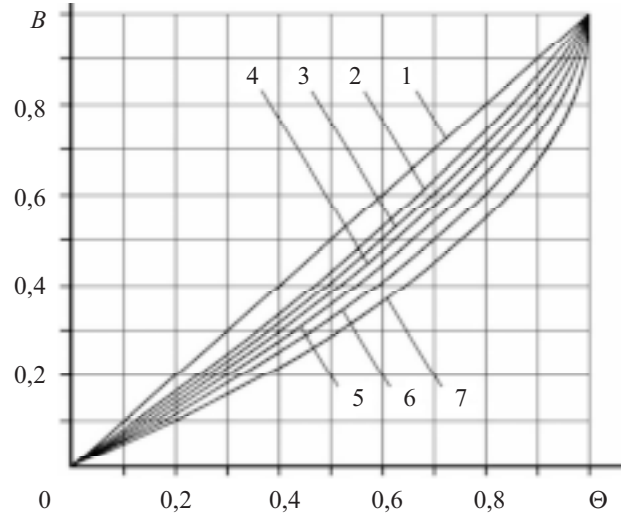


Рис. 2. Зависимость величины относительного рабочего тока от относительного перепада температуры для различных режимов работы ТЭУ:

1 — Q_0/I^2 ; 2 — B ; 3 — λ_{min} ; 4 — Γ ; 5 — L ; 6 — F ; 7 — $Q_0=0$

$$\text{Из условия } \frac{d\left(\frac{2I_{\text{max}}^4}{R}\right)}{dB} = 0 \text{ получим}$$

$$B = \frac{5}{4} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{24\Theta}{25}} \right]. \quad (8)$$

$$3. F = \frac{Q_0}{I^8};$$

$$\frac{2I_{\text{max}}^6}{R} F = \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^8}. \quad (9)$$

$$\text{Из условия } \frac{d\left(\frac{2I_{\text{max}}^6}{R} F\right)}{dB} = 0 \text{ получим}$$

$$B = \frac{7}{6} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{48\Theta}{49}} \right]. \quad (10)$$

Из рисунка видно, что режим, обеспечивающий минимальную интенсивность отказов (λ_{min}), находится между режимами Б [7] и Г.

В таблице приведены данные расчета основных параметров ТЭУ для различных режимов работы, в том числе для режимов А и П, описанных в [3, 4, 6], при следующих исходных данных:

- требуемая холодопроизводительность $Q_0=2$ Вт;
- температура теплопоглощающего слоя $T_0=260$ К;
- температура тепловыделяющего спая $T=300$ К.

При этом

$$\Delta T_{\text{max}}=80 \text{ К}; \Theta=0,5; \frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0} = 0,3; l/s=10; I_{\text{max}}=4,9 \text{ А};$$

$R=1,04 \cdot 10^{-2}$ Ом; $e=1,97 \cdot 10^{-4}$ В/К; электропроводность ветви термоэлемента $\sigma=960$ См/см.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Основные параметры ТЭУ для различных режимов работы при $Q_0=2 \text{ Вт}$, $T_0=260 \text{ К}$, $T=300 \text{ К}$

Условное обозначение режима	B , отн. ед.	I , А	U , В	E , отн. ед.	W , Вт	n , шт	$\lambda \cdot 10^7$, 1/ч	$\frac{\lambda_{\min}}{\lambda}$	P , отн. ед.
$Q_{0\max}$	1,00	4,92	1,87	0,22	9,23	15,9	2,40	0,13	0,9976
A	0,87	4,28	1,72	0,27	7,40	16,4	1,44	0,22	0,9986
П	0,77	3,79	1,68	0,31	6,37	17,8	1,10	0,28	0,9989
$I_{\min}$	0,71	3,48	1,70	0,34	5,90	19,2	0,80	0,39	0,9992
$E_{\max}$	0,53	2,61	1,98	0,39	5,17	28,4	0,42	0,74	0,9996
$\frac{Q_0}{I^2}$	0,50	2,46	2,13	0,38	5,23	31,8	0,38	0,82	0,9996
Б	0,42	2,07	2,83	0,34	5,85	48,5	0,316	0,98	0,9997
$\lambda_{\min}$	0,40	1,97	3,21	0,316	6,33	56,8	0,31	1,00	0,9997
Г	0,38	1,87	3,71	0,288	6,94	68,5	0,32	0,97	0,9997
L	0,35	1,70	5,40	0,216	9,24	104,8	0,36	0,86	0,9996
F	0,33	1,64	7,62	0,16	12,50	155,5	0,45	0,69	0,9996

Режимы работы охлаждающего термоэлемента в области значений $B < \Theta$ (см. рис. 2) ранее считали нерациональными для использования при проектировании ТЭУ, т. к. здесь наряду с уменьшением холодильного коэффициента уменьшается холодопроизводительность, что вызывает необходимость увеличения количества термоэлементов. Однако в случаях, когда преобладающим условием является обеспечение максимальной надежности функционирования ТЭУ, следует использовать режим $\lambda_{\min}$. Так, например, при $\Theta=0,5$ и указанных исходных данных (см. таблицу) режим $\lambda_{\min}$ обеспечивает интенсивность отказов на 25% меньше, чем режим $E_{\max}$, который традиционно используется при проектировании ТЭУ.

На рис. 3 представлена зависимость величины $\lambda_{\min}/\lambda$ от относительного перепада температуры для различных режимов работы охлаждающего термоэлемента при $Q_0=2 \text{ Вт}$ и $T=300 \text{ К}$.

Анализ кривых, представленных на рис. 3, показывает, что плотность интенсивности отказов в режи-

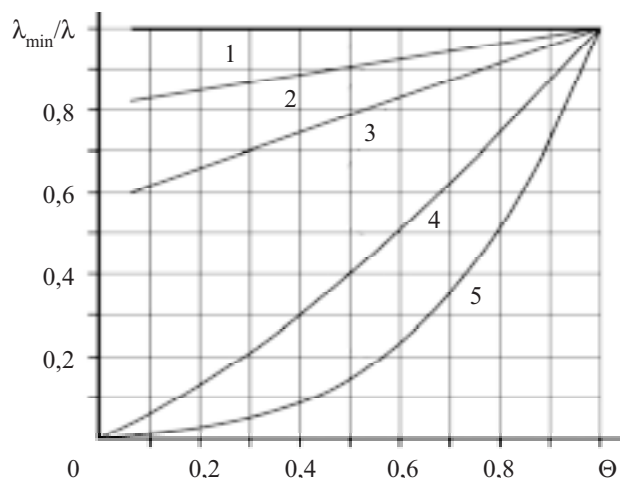


Рис. 3. Зависимость величины $\lambda_{\min}/\lambda$ от относительного перепада температуры при $Q_0=2 \text{ Вт}$, $T=300 \text{ К}$ для различных режимов работы:

1 — $\lambda_{\min}$; 2 — L; 3 — $E_{\max}$; 4 — $I_{\min}$; 5 — $Q_{0\max}$

ме $Q_{0\max}$ максимальна по сравнению с другими режимами. С ростом Θ величина $\lambda_{\min}/\lambda$ увеличивается и по мере приближения Θ к 1, также приближается к 1.

Таким образом, приведенные соотношения позволяют определить величину относительного рабочего тока при заданной величине относительного перепада температур, т. е. определить режим работы охлаждающего термоэлемента, обеспечивающего минимальную величину интенсивности отказов.

Сравнительный анализ показателей надежности и основных параметров ТЭУ для различных режимов работы показал целесообразность использования режима $\lambda_{\min}$ в качестве основного при проектировании ТЭУ повышенной надежности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Моисеев В. Ф., Зайков В. П. Влияние режима работы термоэлектрического устройства на его надежность // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 4–5. — С. 30–32.
- Сомкин М. Н., Зайков В. П., Вайнер А. Л. Возможности единого подхода к режимам работы охлаждающего термоэлемента // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. — 1984. — Вып. 1. — С. 95–106.
- 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.
- Зайков В. П., Ефремов В. И. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического устройства для систем термостабилизации // Там же. — 2001. — Вып. 1. — С. 47–50.
- Зайков В. П., Дейнега В. Т., Коноплев И. Д., Водолагин В. Ю. Режим работы термоэлектрического устройства, обеспечивающий минимальное остаточное газовыделение // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР (ТРТО). — 1989. — Вып. 4. — С. 91–95.
- Зайков В. П., Киншова Л. А., Быкадоров В. В., Храмова Л. Ф. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 5. — С. 37–41.
- 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.