

Д. П. СОЧЕСЛАВ

Украина, Одесская государственная академия холода  
E-mail: Vutys78@mail.ruДата поступления в редакцию  
31.08 2010 г.Оппонент к. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ  
(ЧНУ им. Ю. Федьковича, г. Черновцы)РЕЖИМ РАБОТЫ ДВУХКАСКАДНОГО  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО  
УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ  
МИНИМАЛЬНУЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

*Рассмотрена модель взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства с последовательным электрическим соединением каскадов.*

Одним из основных требований, предъявляемых при проектировании термоэлектрических устройств (ТЭУ), является обеспечение заданных значений показателей надежности. В качестве основного показателя надежности ТЭУ выбрано время безотказной работы.

При определении показателей надежности каскадных ТЭУ (КТЭУ) в условиях эксплуатации, а именно интенсивности отказов  $\lambda$  и вероятности безотказной работы  $P$ , полагаем:

- все термоэлементы соединены электрически последовательно, включая каскады;
- выход из строя любого термоэлемента приводит к выходу из строя модуля и устройства в целом;
- события, заключающиеся в выходе термоэлементов из строя, принимаются независимыми;
- каждый термоэлемент в каскадах работает в одном и том же токовом режиме при различных температурных условиях;
- термоэлектрические модули и КТЭУ на их основе относятся к невосстанавливаемым изделиям.

Таким образом, показатели надежности ТЭУ рассматриваются при следующих допущениях:

- отказы термоэлементов происходят внезапно;
- интенсивность отказов отдельных термоэлементов не зависит от времени;
- время наработки до отказа распределяется по экспоненциальному закону.

Анализ зависимости показателей надежности от времени по данным испытаний и эксплуатации для различных законов распределения показывает, что для описания показателей надежности КТЭУ при  $P > 0,95$  оправданно применение экспоненциального закона распределения (так как отказы КТЭУ сравнительно редки и распределены во времени с почти одинаковой плотностью при длительной эксплуатации, в связи с чем можно считать их интенсивность величиной постоянной) как наиболее простого для количественной оценки показателей надежности.

При проектировании КТЭУ обычно задаются: холодопроизводительность  $Q_0$ , т. е. суммарная тепловая нагрузка, температура теплопоглощающего спая  $T_0$  и температура тепловыделяющего спая  $T$ . Кроме того накладываются различные ограничения (по количеству термоэлементов в каскадах, потребляемой мощности, величине рабочего тока, интенсивности отказов и т. д.), с учетом которых необходимо определить токовый режим работы охлаждающего термоэлемента.

Определим режим работы КТЭУ с последовательным электрическим соединением каскадов при условии обеспечения минимальной интенсивности отказов и максимальной вероятности безотказной работы.

Рассматриваемые КТЭУ собираются, как правило, на базе унифицированных и одинаковых ветвей термоэлементов или стандартных модулей на их основе, и поэтому для всех  $N$  каскадов должно соблюдаться условие

$$B_i I_{\max_i} = B_{i+1} I_{\max_{i+1}} = \dots = B_N I_{\max_N}, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где для  $i$ -го каскада:

$B_i$  — относительный рабочий ток,  $B_i = I/I_{\max_i}$ ;

$I_{\max_i}$  — максимальный рабочий ток,  $I_{\max_i} = \frac{e_i T_{i-1}}{R_i}$ ;

$e_i$  — коэффициент термо-эдс ветви термоэлемента;

$T_{i-1}$  — температура теплопоглощающего спая;

$R_i$  — электрическое сопротивление ветви термоэлемента.

Общий перепад температуры на КТЭУ можно представить в виде

$$\Delta T = \sum_{i=1}^N \Delta T_i = \sum_{i=1}^N \Delta T_{\max_i} \Theta_i, \quad (2)$$

где для  $i$ -го каскада:

$\Delta T_{\max_i}$  — максимальный перепад температуры,

$$\Delta T_{\max_i} = 0,5 Z_i T_{i-1}^2;$$

$Z_i$  — усредненный показатель термоэлектрической эффективности модуля;

$\Theta_i$  — относительный перепад температуры,

$$\Theta_i = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{\max_i}};$$

$\Delta T$  — рабочий перепад температуры,  $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$ .

При построении КТЭУ необходимо соблюдать условие стационарности процесса охлаждения (теплового сопряжения каскадов) — количество отводимого

го тепла от предыдущего каскада должно быть равно холодопроизводительности последующего. Воспользуемся следующими известными соотношениями.

Из условия стационарности отношение количества термоэлементов в соседних каскадах можно записать как

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{I_{\max i}^2 R_i}{I_{\max i+1}^2 R_{i+1}} \frac{2B_i(1 + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-q}} \Theta_i) + B_i^2 - \Theta_i}{2B_{i+1} - B_{i+1}^2 - \Theta_{i+1}}, \quad (3)$$

Холодопроизводительность КТЭУ определяется «холодным» (первым) каскадом и равна

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1). \quad (4)$$

Мощность потребления  $i$ -го каскада КТЭУ определяется по формуле

$$W_i = 2n_i I_{\max i}^2 R_i B_i (B_i + \frac{\Delta T_{\max i}}{T_{i-1}} \Theta_i), \quad (5)$$

а холодильный коэффициент КТЭУ

$$E^N = \frac{Q_0}{\sum_{i=1}^N W_i}. \quad (6)$$

Суммарную интенсивность отказов КТЭУ можно представить в виде суммы интенсивностей отказов каждого каскада:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i. \quad (7)$$

С учетом влияния температурных условий работы каждого каскада и тепловой нагрузки можно записать соотношения для определения относительной величины суммарной интенсивности отказов двух-каскадного ТЭУ:

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) (B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1)^2}{(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1)^2} K_{T_1} + \frac{n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) (B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2)^2}{(1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2)^2} K_{T_2}, \quad (8)$$

где  $\lambda_0$  — номинальная интенсивность отказов;

$C_1, C_2$  — относительная тепловая нагрузка первого и второго каскада, соответственно,

$$C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}, \quad C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

$K_{T_1}, K_{T_2}$  — коэффициенты значимости, учитывающие влияние пониженных температур [1, с. 67].

Для оценки вероятности безотказной работы  $P$  КТЭУ можно записать соотношение

$$P = \exp \left[ - \sum_{i=1}^N \lambda_i t \right], \quad (9)$$

где  $t$  — назначенный ресурс.

Так как каждый термоэлемент в каскадах работает в одном и том же токовом режиме в различных

температурных условиях, выражение для определения оптимального относительного рабочего тока в режиме  $\lambda_{\min}$  можно представить в виде

$$B_1 = \eta_1 \Theta_1, \quad (10)$$

где  $\eta_1$  — поправочный коэффициент токового режима первого каскада (рис. 1).

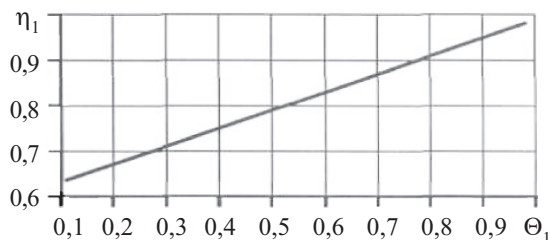


Рис. 1. Зависимость коэффициента токового режима от относительного перепада температуры в первом каскаде при  $T=300$  К

Используя условие (1), после несложных преобразований получим соотношение для определения промежуточной температуры в режиме  $\lambda_{\min}$

$$T_1^2 \varphi - T_0 T_1 (\varphi - 1) - T T_0 = 0, \quad (11)$$

где  $\varphi = \frac{\eta_1}{\eta_2} \beta$ ;

$$\beta = \frac{e_1 \sigma_1 Z_2}{e_2 \sigma_2 Z_1}.$$

Промежуточную температуру  $T_1$  определяем методом последовательных приближений. Предварительно приняв условие равенства перепадов температуры по каскадам, определяем  $e, \sigma, Z, \Delta T_{\max}, \Theta, I_{\max}$  для каждого каскада с учетом температурной зависимости параметров. Подставив полученные значения в (11), получим новое значение  $T_1$ . Затем корректируем средние значения температуры по каскадам и вычисляем новые значения указанных величин. Практика показывает, что двух-трех приближений вполне достаточно для того, чтобы значения промежуточной температуры  $T_1$  сошлись в пределах 1%.

Результаты расчетов основных параметров и показателей надежности КТЭУ при  $T=300$  К, перепадах температуры  $\Delta T=60, 70, 80, 90$  К, величине тепловой нагрузки  $Q_0$  от 0 до 1,2 Вт и  $t=10^4$  ч,  $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$  1/ч показаны на рис. 2—5.

Анализ расчетных данных показал, что в рассматриваемом режиме  $\lambda_{\min}$  с ростом общего перепада температуры  $\Delta T$

— величина оптимальной промежуточной температуры  $T_1$  уменьшается по линейной зависимости (рис. 2);

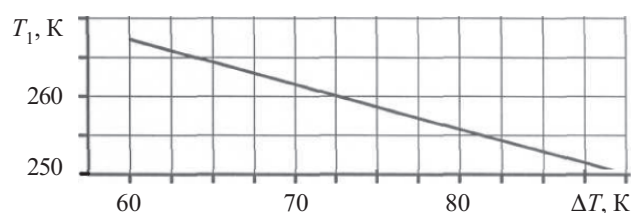


Рис. 2. Зависимость оптимальной промежуточной температуры от общего перепада температуры

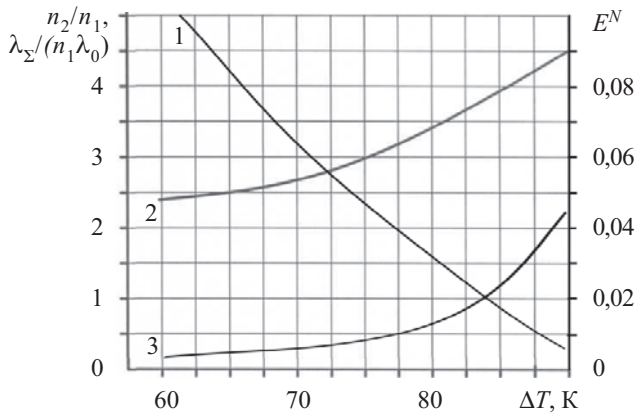


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента  $E^N$  (1), отношения количества термоэлементов в смежных каскадах (2) и относительной величины суммарной интенсивности отказов (3) от общего перепада температуры

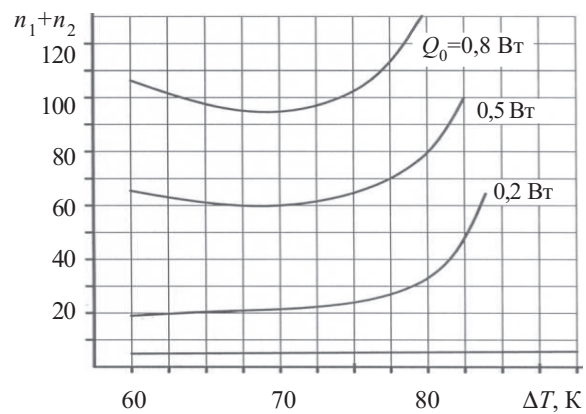


Рис. 4. Зависимость суммарного количества термоэлементов двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры для различных значений  $Q_0$

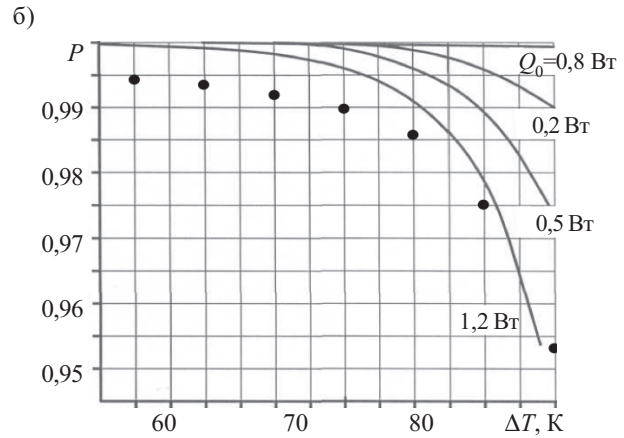
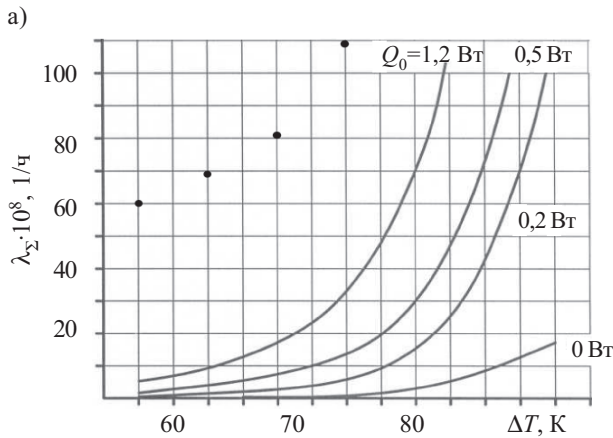


Рис. 5. Зависимость суммарной интенсивности отказов (а) и безотказной работы (б) от общего перепада температуры для различных значений  $Q_0$

— холодильный коэффициент уменьшается (рис. 3, кривая 1);

— растет отношение числа термоэлементов в каскадах  $n_2/n_1$  (рис. 3, кривая 2) и их суммарное количество (рис. 4);

— суммарная величина интенсивности отказов  $\lambda_\Sigma$  (рис. 5, а) и ее относительная величина  $\frac{\lambda_\Sigma}{n_1\lambda_0}$  увеличиваются (рис. 3, кривая 3);

— вероятность безотказной работы  $P$  уменьшается (рис. 5, б).

При заданном перепаде температуры  $\Delta T$  с ростом тепловой нагрузки суммарное количество термоэлементов увеличивается, растет интенсивность отказов, а вероятность безотказной работы уменьшается.

На рис. 5 точками обозначены данные экспериментальных исследований аналогичных конструкций КТЭУ при максимальном значении коэффициента режима  $K_p=1,0$  [1, с. 24]. Ход экспериментальных зависимостей  $\lambda_\Sigma=f(\Delta T)$  и  $P=f(\Delta T)$  практически идентичен теоретическим для режима  $Q_{0\max}$ , т. е. модель взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров можно использовать для других режимов.

Наибольшее отклонение теоретической величины интенсивности отказов от экспериментальной составляет не более 10%, что определяется погрешностью, вносимой измерительными средствами контроля температурного поля, отличием конструктивных и тепловых параметров экспериментальных и теоретических аналогов КТЭУ.

Таким образом, полученные соотношения позволяют определять показатели надежности двухкаскадных ТЭУ в режиме, обеспечивающем минимальную суммарную интенсивность отказов и максимальную вероятность безотказной работы в широком диапазоне изменения перепада температуры и различной тепловой нагрузке.

Применение режима  $\lambda_{\min}$  позволяет построить КТЭУ повышенной надежности при приемлемых энергозатратах.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009. [Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. Prognostirovanie pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva. Odessa. Politekhpriodika, 2009.]