

К. т. н. В. Ф. МОИСЕЕВ, к. т. н. В. П. ЗАЙКОВ

Украина, г. Одесса, НИИ «Шторм»

Дата поступления в редакцию
26.02 2001 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. И. БОДНАРУК

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА НА ЕГО НАДЕЖНОСТЬ

Предложена и рассмотрена физическая модель, связывающая показатели надежности и основные значимые параметры термоэлектрического устройства.

Одним из наиболее приемлемых способов обеспечения теплового режима элементов и составных частей РЭА является термоэлектрический, к числу основных преимуществ которого следует отнести примерное соответствие показателей надежности и массогабаритных характеристик термоэлектрического устройства (ТЭУ) и элементов электроники.

Использование термоэлектрических устройств позволяет повысить надежность РЭА за счет обеспечения тепловых режимов термозависимых элементов. При этом следует стремиться к тому, чтобы вносимый дополнительный элемент обладал более высоким показателем надежности и не снижал надежность аппаратуры в целом. Поэтому целью настоящей работы является поиск режимов работы термоэлектрического устройства, обеспечивающих максимальные показатели надежности.

При определении показателей надежности ТЭУ в условиях эксплуатации, а именно, интенсивности отказов (λ) и вероятности безотказной работы (P), полагаем, что все элементы ТЭУ соединены последовательно, выход из строя любого термоэлемента приводит к выходу из строя модуля и устройства в целом. События, заключающиеся в выходе термоэлементов из строя, принимаются независимыми.

При данных допущениях надежность ТЭУ (P_n) может быть представлена в виде произведения надежностей входящих в него элементов [1, с. 61]:

$$P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

где $P_i(t)$ — надежность i -го элемента к моменту времени t .

Величина надежности i -го элемента в течение времени t определяется выражением

$$P_i(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_i(x) dx \right], \quad (2)$$

где $\lambda_i(x)$ — интенсивность отказов i -го элемента.

Подставляя значение $P_i(t)$ из уравнения (2) в (1), получим общую формулу для надежности устройства

$$P_n(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(x) dx \right]. \quad (3)$$

Математическое ожидание времени до появления первого отказа устройства, состоящего из n элементов, определяется как

$$m_{nt} = \int_0^{\infty} t \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(x) dx \right] dt. \quad (4)$$

Для определения показателя надежности $P_i(t)$ необходимо знать функцию интенсивности отказов $\lambda_i(t)$, которая может быть задана аналитически, в виде графиков либо средним значением за определенный промежуток времени. Это не только упрощает аппарат вычисления надежности, но и дает возможность изучить влияние на надежность различных факторов, в т. ч. и режимов работы ТЭУ.

Одним из типичных отказов, характерных для ТЭУ, являются внезапные отказы. Они носят сравнительно редкий характер и распределены во времени почти с одинаковой плотностью. Поэтому с достаточной для практических расчетов точностью можно считать их интенсивность величиной постоянной. В таком случае распределение отказов описывается экспоненциальным законом (особенно при длительных сроках эксплуатации ТЭУ [2, с. 34]). Таким образом, при $\lambda = \text{const}$ из (2) получим:

$$P_i = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] = \exp[-\lambda t]. \quad (5)$$

Для случая, когда $\lambda_i < 0,1$, можно использовать упрощенное выражение для $P(t)$, разложив выражение (5) в степенной ряд и взяв два первых члена разложения:

$$P(t) \approx 1 - \lambda t. \quad (6)$$

Вероятность наступления отказа

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda t). \quad (7)$$

Плотность вероятности отказов

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \lambda \exp(-\lambda t). \quad (8)$$

Средняя наработка до отказа

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t)dt = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

Экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла – Гнеденко.

Допустим, что термоэлектрические модули и ТЭУ на их основе относятся к нерезервируемым и невозстановливаемым изделиям. Тогда интенсивность отказов модуля можно записать в виде

$$\lambda = \sum_i \lambda_i n_i, \quad (10)$$

где n_i – количество термоэлементов.

Так как термоэлементы в модуле одинаковы по геометрическим и физическим параметрам, то интенсивность отказов модуля можно записать в виде

$$\lambda = \lambda_i n, \quad (11)$$

где λ_i – интенсивность отказов одного термоэлемента;
 n – количество термоэлементов.

Таким образом, рассмотрим показатели надежности термоэлектрического модуля при следующих допущениях:

- отказы термоэлементов – внезапные;
- интенсивность отказов отдельных термоэлементов не зависит от времени;
- отказ любого термоэлемента приводит к отказу модуля либо ТЭУ;
- время до отказа распределяется по экспоненциальному закону.

В соответствии с качественной аналогией по ряду физических параметров между твердотельными элементами электроники и полупроводниковыми термоэлементами, используемыми в РЭА [3, с. 16], интенсивность отказов модуля либо ТЭУ можно записать в виде

$$\lambda = \lambda_{от/э} k_p k_э k_\phi n, \quad (12)$$

где $\lambda_{от/э}$ – номинальное значение интенсивности отказов одного термоэлемента;

k_p – коэффициент режима, характеризующий зависимость надежности изделий от относительных величин значимых параметров;

$k_э$ – коэффициент эксплуатации, учитывающий зависимость интенсивности отказов элементов от условий эксплуатации;

k_ϕ – коэффициент, зависящий от функционального назначения.

При дальнейшем рассмотрении принимаем $k_э = 1$ и $k_\phi = 1$.

Для ТЭУ коэффициент k_p можно записать в виде отношения значений рабочего напряжения, тока, холодопроизводительности, перепада температур к их предельному допустимому значению.

Рассмотрим модель зависимости показателей надежности ТЭУ от значимых параметров [4, с. 273, 274]. Так как предлагаемая модель качественно описывает явления, наблюдаемые на практике, то можно считать, что шадящими режимами для термоэлектрических устройств будут режимы, при которых реализуются ограничения по току (I), напряжению

(U), перепаду температур (ΔT) и холодопроизводительности (Q_0). Используя известное соотношение [5], коэффициент режима можно записать в следующем виде:

$$k_p = k_U k_I k_{Q_0} k_{\Delta T}. \quad (13)$$

Здесь

$$k_U = U/U_{\max} = \frac{B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta}{1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta}; \quad (14)$$

$$k_I = I/I_{\max} = B; \quad (15)$$

$$k_{Q_0} = Q_0/Q_{0\max} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{1 - \Theta}; \quad (16)$$

$$k_{\Delta T} = \Theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}, \quad (17)$$

где B – относительный рабочий ток;

ΔT_{\max} – максимальный перепад температур, К;

$\Delta T = T - T_0$ – перепад температур, К;

T_0, T – температуры соответственно теплопоглощающего и тепловыделяющего спаев, К;

Θ – относительный перепад температур.

Подставив (13), с учетом (14) – (17), в формулу (12), получим соотношение, описывающее функциональную зависимость интенсивности отказов от значимых параметров ТЭУ:

$$\frac{\lambda}{n\lambda_0} = \frac{B\Theta(2B - B^2 - \Theta)(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta)}{(1 - \Theta)(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta)}. \quad (18)$$

В режиме максимальной холодопроизводительности $Q_{0\max}$ ($B=1$)

$$\lambda/n\lambda_0 = \Theta. \quad (19)$$

В режиме максимального холодильного коэффициента ϵ_{\max} ($B=\Theta$)

$$\frac{\lambda}{n\lambda_0} = \frac{\Theta^4(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0})}{1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta}. \quad (20)$$

На рис. 1 представлена зависимость $\lambda/n\lambda_0 = f(\Theta)$ для этих режимов. Анализ зависимостей показывает возможность уменьшения интенсивности отказов

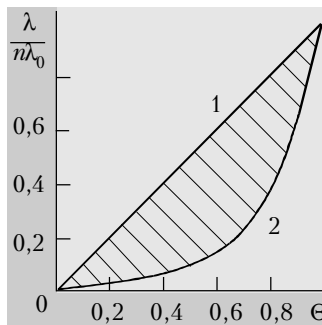


Рис. 1. Зависимость величины относительного изменения интенсивности отказов от относительного перепада температур для различных режимов: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – ϵ_{\max}

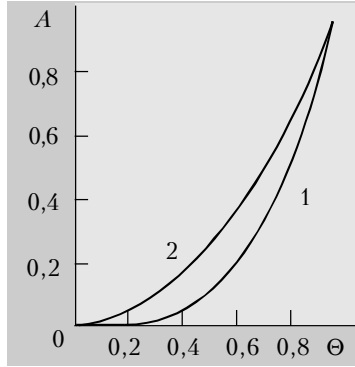


Рис. 2. Зависимость отношения A от относительного перепада температур: 1 – $n=\text{const}$, $Q_0=\text{var}$; 2 – $Q_0=\text{const}$, $n=\text{var}$

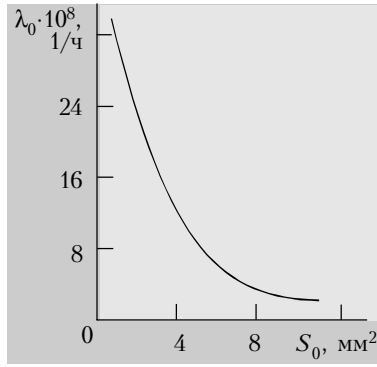


Рис. 3. Зависимость усредненного значения интенсивности отказов от площади сечения ветви термоэлемента

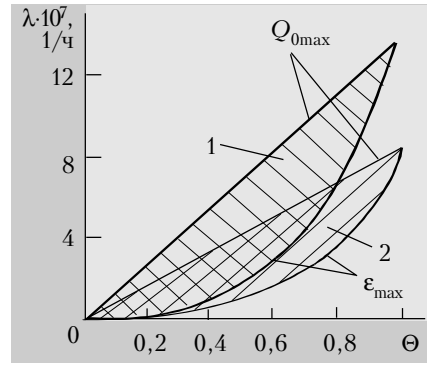


Рис. 4. Зависимость интенсивности отказов от относительного перепада температур для модулей типа М8-127 (1) и М4,5-27 (2)

при работе охлаждающего термоэлемента в режиме ϵ_{max} по сравнению с режимом $Q_{0\text{max}}$. Так, при работе охлаждающего термоэлемента в режиме ϵ_{max} при относительном перепаде температур $\Theta=0,5$ можно уменьшить интенсивность отказов в 5–7 раз по сравнению с режимом $Q_{0\text{max}}$. С ростом Θ величина $\lambda/n\lambda_0$ постепенно увеличивается и при $\Theta \rightarrow 1$ $\lambda/n\lambda_0 \rightarrow 1$.

При оценке интенсивности отказов возможны два подхода:

- исследуется ТЭУ с заданным количеством термоэлементов ($n=\text{const}$), и тогда холодопроизводительность изменяется в зависимости от режима работы охлаждающего термоэлемента;

- при заданной холодопроизводительности ($Q_0=\text{const}$) изменяется количество термоэлементов в ТЭУ в зависимости от режима работы.

На рис. 2 представлена зависимость отношения $(\lambda/n\lambda_0)_{\epsilon_{\text{max}}} / (\lambda/n\lambda_0)_{Q_{0\text{max}}}$ (обозначим его A) от относительного перепада температур Θ для таких двух типов исследований. Здесь видна возможность уменьшения интенсивности отказов более чем на порядок при $\Theta < 0,4$ при работе охлаждающего термоэлемента в режиме ϵ_{max} по сравнению с режимом $Q_{0\text{max}}$.

Среднее значение интенсивности отказов из расчета на один термоэлемент по результатам эксплуатации модулей составляет для модуля типа М

при $l/s=4,5; 10$ $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч;
при $l/s=8; 20$ $\lambda_0=1 \cdot 10^{-7}$ 1/ч.

(Здесь l – высота ветви термоэлемента, мм; S – площадь поперечного сечения ветвей термоэлемента, мм².)

Для модуля М4,5-27 получили:
 $l/s=4,5$, $n=27$, $l=4$ мм, $S=9$ мм².

Следует отметить, что по результатам эксплуатации наблюдается увеличение усредненного значения интенсивности отказов (λ_0) с уменьшением площади поперечного сечения ветвей термоэлементов S (см. рис. 3).

На рис. 4 и 5 представлены зависимости интенсивности отказов (λ) и вероятности безотказной работы (P) в течение 10000 ч от относительного перепада температур для модулей типа М4,5-27 и М8-127 в интервале режимов от $Q_{0\text{max}}$ до ϵ_{max} .

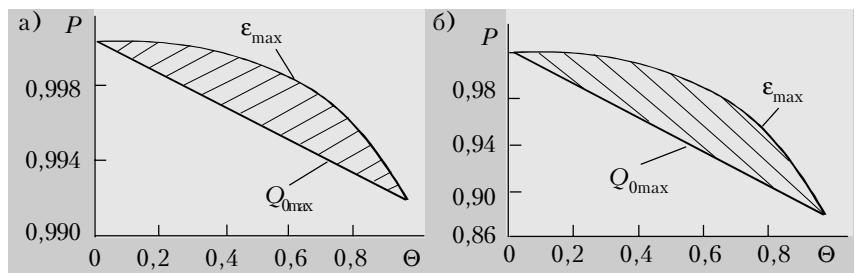


Рис. 5. Зависимость вероятности безотказной работы от относительного перепада температуры для модулей типа М4,5-27 (а) и М8-127 (б)

Таким образом, предложена и рассмотрена физическая модель, связывающая показатели надежности и основные значимые параметры ТЭУ. В рамках принятой модели получена функциональная зависимость показателей надежности (λ и P) от основных значимых параметров ТЭУ (Θ , B , Q_0 , U). Показано, что для повышения надежности функционирования ТЭУ следует выбирать режим работы ТЭУ, близкий к режиму ϵ_{max} .

Полученное соотношение позволяет оценить влияние достаточно широкого круга физических параметров на показатели надежности ТЭУ и вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием ТЭУ на основе прогнозируемых показателей надежности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонтьев Л. П. Введение в теорию надежности радиоэлектронной аппаратуры. – Рига: Изд-во. АН ЛССР, 1963.
2. Чернышов А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1988.
3. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976.
4. Бердичевский Б. Е. Вопросы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при разработке. – М.: Сов. радио, 1977.
5. Зайков В. П., Сомкин М. Н., Вайнер А. А. Возможности единого подхода к режимам работы охлаждающего термоэлемента // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1984. – Вып. 1. – С. 95–106.