

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

Украина, г. Одесса, НИИ «Штурм»

Дата поступления в редакцию
27.12 2002 г. — 23.07 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Л. Н. ВИХОП
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА НА ЕГО НАДЕЖНОСТЬ

Полученные соотношения позволяют вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием термоэлектрических устройств на основе прогнозируемых показателей надежности.

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, массогабаритных характеристик элементов электроники и термоэлектрических устройств (ТЭУ).

Использование ТЭУ призвано повысить надежность РЭА за счет обеспечения тепловых режимов термозависимых элементов. При этом ТЭУ как дополнительно вводимый элемент должен обладать более высоким показателем надежности, чтобы не снизить надежность аппаратуры в целом.

Надежность ТЭУ, как и РЭА в целом, зависит от эксплуатационных факторов, которые вызывают до 30% всех отказов [1, с. 151].

Различают следующие режимы работы ТЭУ во времени: непрерывный (стационарный), кратковременный и циклический (периодический) [2, с. 7, 8].

В первом случае ТЭУ, как и РЭА, в течение достаточно большого промежутка времени потребляет и рассеивает постоянную по величине мощность, при этом тепловой режим РЭА с ТЭУ полностью устанавливается. Такой режим работы ТЭУ рассмотрен в [3].

Во втором случае ТЭУ включается на небольшой промежуток времени, в течение которого тепловой режим не устанавливается. В данном случае тепловой режим будет зависеть не только от величины подводимой мощности и условий теплообмена, но и от длительности включения.

В третьем случае включение и выключение происходят через определенный промежуток времени (цикл). Циклический режим — это режим, связанный со сравнительно частыми включениями и отключениями аппаратуры.

Целью настоящей работы является определение влияния циклического режима работы термоэлемента (перепад температур $\Delta T > 0$) на основные показатели надежности. При рассмотрении показателей надежности, а именно, интенсивности отказов (λ) и

вероятности безотказной работы (P), используются основные положения и допущения, аналогичные принятым в [3].

Основным параметром циклического режима является скважность работы ТЭУ φ , которую можно представить в виде соотношения

$$\varphi = \frac{\tau_{\text{вкл}}}{\tau_{\text{вкл}} + \tau_{\text{выкл}}} = \frac{1}{1 + \mu}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{вкл}}$ — время включения (работы) ТЭУ;

$\tau_{\text{выкл}}$ — время выключения (паузы) ТЭУ;

$$\mu = \tau_{\text{выкл}} / \tau_{\text{вкл}}$$

При непрерывном режиме работы ТЭУ [3] $\tau_{\text{выкл}} \rightarrow 0$; $\varphi \rightarrow 1, 0$; $K_3 \rightarrow 1, 0$; $\mu \rightarrow 0$ (K_3 — коэффициент эксплуатации, учитывающий зависимость интенсивности отказов элементов от условий эксплуатации).

При отключенном ТЭУ $\tau_{\text{вкл}} \rightarrow 0$; $\tau_{\text{выкл}} \rightarrow \infty$; $\varphi \rightarrow 0$; $K_3 \rightarrow 0$; $\mu \rightarrow \infty$.

При циклическом режиме работы ТЭУ $\tau_{\text{вкл}} \neq 0$; $\tau_{\text{выкл}} \neq 0$; $\varphi \neq 0$; $K_3 \neq 0$; $\mu \neq 0$. Диапазон изменения скважности φ находится в пределах от 0 до 1,0.

Опыт эксплуатации ТЭУ в циклическом режиме показывает, что частые включения и выключения приводят к достаточно большому числу отказов. Можно предположить, что физическая природа отказов ТЭУ при включениях и выключениях, по аналогии с полупроводниковыми элементами электроники [1, с. 155], заключается в том, что во время переходных процессов в термоэлементах возникают токи и напряжения, величина которых во много раз превышает номинальные значения, хотя и кратковременно, т. е. коэффициент нагрузки (режима) намного больше 1. Кроме того, при прохождении тока через термоэлемент возникает разность температур на спаях, что приводит к появлению термомеханических напряжений в модуле. Многократные включения и выключения, в свою очередь, могут привести к разрушению спая (металл — полупроводник), а значит, к отказу ТЭУ, т. к. все термоэлементы в модуле соединены последовательно.

Таким образом, работа ТЭУ в циклическом режиме при частых включениях и отключениях значительно увеличивает интенсивность отказов, т. е. снижает вероятность безотказной работы. При этом следует отметить, что наибольшая плотность отказов имеет место в начальный период времени работы ТЭУ, причем число отказов растет с увеличением частоты циклов.

Исходя из данных по эксплуатации ТЭУ в циклическом режиме следует отметить следующее: при одной и той же скважности ϕ частота включений и выключений ТЭУ может изменяться в достаточно широких пределах в зависимости от времени цикла ($\tau_{\text{вкл}} + \tau_{\text{выкл}}$). В этом случае коэффициент эксплуатации можно представить в виде

$$K_3 = \phi + \psi, \quad (2)$$

причем величина ψ может аппроксимироваться эмпирической зависимостью, полученной по результатам эксплуатации ТЭУ в составе РЭА и испытаний на безотказность:

$$\Psi = aN,$$

где $a=8,5$; N — частота включений и выключений, 1/ч.

При $N < 0,1$ $\Psi \rightarrow 0$ и $K_3 \rightarrow \phi$, это наиболее часто встречающийся режим при эксплуатации РЭА с ТЭУ. В этом случае частота включений и выключений практически не влияет на величину интенсивности отказов и целиком определяется величиной ϕ .

Для циклического режима ($K_3 = \phi$) и в соответствии с [3] рассмотрим соотношение, описывающее функциональную зависимость интенсивности отказов $\lambda_{\text{ц}}$ от значимых параметров ТЭУ, работающих в режимах максимальной холодопроизводительности ($Q_{0\text{max}}$) и максимального холодильного коэффициента (E_{max}).

а) Для режима $Q_{0\text{max}}$ ($B=1,0$)

$$\frac{\lambda_{\text{ц}}}{n\lambda_0} = \Theta \phi, \quad (3)$$

где n — количество термоэлементов, шт.;

λ_0 — номинальное значение интенсивности отказов одного термоэлемента, 1/ч;

Θ — относительный перепад температур, отн. ед.;

B — относительный рабочий ток, отн. ед.

На рис. 1, а представлена зависимость $\lambda_{\text{ц}}/(n\lambda_0) = f(\phi)$ при заданных значениях Θ для режима $Q_{0\text{max}}$. Анализ зависимостей показывает возможность с уменьшением скважности ϕ уменьшить интенсивность отказов в циклическом режиме более чем на порядок по сравнению с непрерывным режимом ($\phi=1,0$). Так,

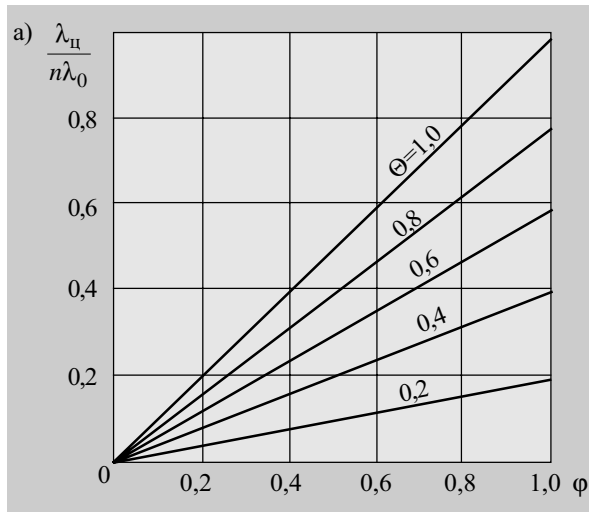


Рис. 1. Зависимость относительной величины интенсивности отказов $\lambda_{\text{ц}}/(n\lambda_0)$ от скважности ϕ при заданных значениях Θ в режиме $Q_{0\text{max}}$ (а) и в режиме E_{max} (б)

при $\Theta=0,6$ и изменении ϕ от 1,0 до 0,5 интенсивность отказов уменьшается вдвое. С ростом Θ интенсивность отказов увеличивается при заданном ϕ , достигая максимальных значений при $\phi=1,0$.

б) Для режима E_{max} ($B=\Theta$)

$$\frac{\lambda_{\text{ц}}}{n\lambda_0} = \frac{\Theta^4 \left(1 + \frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0}\right) \phi}{1 + \frac{\Delta T_{\text{max}}}{T_0} \Theta}, \quad (4)$$

где ΔT_{max} — максимальный перепад температур, К;
 T_0 — температура теплопоглощающего спая, К.

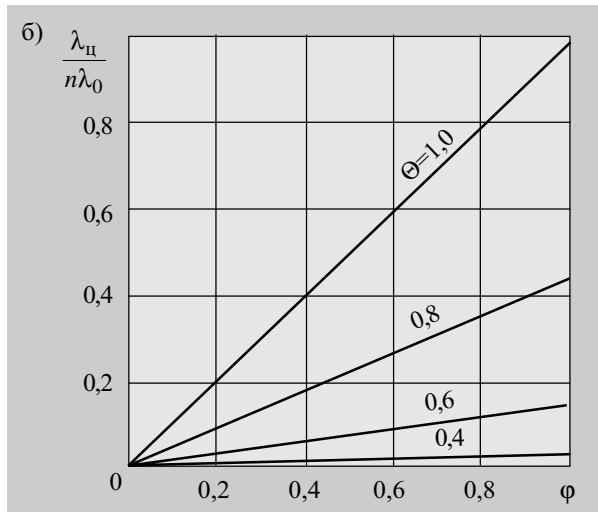
На рис. 1, б представлена зависимость $\lambda_{\text{ц}}/(n\lambda_0) = f(\phi)$ при заданных значениях Θ для режима E_{max} . Анализ зависимостей показывает возможность уменьшения интенсивности отказов с уменьшением скважности ϕ (так, при изменении ϕ от 1,0 до 0,5 при $\Theta=0,6$ интенсивность отказов уменьшается вдвое). С ростом Θ интенсивность отказов увеличивается при заданном значении ϕ .

Максимальное значение интенсивности отказов соответствует непрерывному режиму работы ($\phi=1,0$). Следует отметить, что при заданных значениях Θ и ϕ интенсивность отказов в режиме E_{max} значительно меньше, чем в режиме $Q_{0\text{max}}$ (так, при $\phi=0,5$ и $\Theta=0,6$ $(\lambda_{\text{ц}}/(n\lambda_0))_{Q_{0\text{max}}} = 0,3$, а $(\lambda_{\text{ц}}/(n\lambda_0))_{E_{\text{max}}} = 0,07$, т. е. интенсивность отказов в режиме E_{max} в 4,3 раза меньше, чем в режиме $Q_{0\text{max}}$).

Зависимость отношения $\left(\frac{\lambda_{\text{ц}}}{n\lambda_0}\right)_{E_{\text{max}}} / \left(\frac{\lambda_{\text{ц}}}{n\lambda_0}\right)_{Q_{0\text{max}}}$ от

относительного перепада температур Θ аналогична приведенной в [3] и показывает возможность уменьшения интенсивности отказов более чем на порядок при $\Theta < 0,4$ при работе охлаждающего термоэлемента в режиме E_{max} .

Отношение интенсивности отказов в циклическом режиме к интенсивности отказов в непрерывном



режиме λ_n для режима Q_{0max} (и для режима E_{max}) можно представить в виде

$$\frac{\lambda_{ц}}{\lambda_n} = \varphi. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы ТЭУ в циклическом режиме $P_{ц}$ в течение $t=10000$ ч для режима Q_{0max} можно записать в виде

$$P_{ц} = e^{-\lambda_{ц}t}, \text{ где } \lambda_{ц} = n\lambda_0\Theta\varphi; \quad (6)$$

а вероятность безотказной работы ТЭУ в непрерывном режиме —

$$P_n = e^{-\lambda_n t}, \text{ где } \lambda_n = n\lambda_0\Theta. \quad (7)$$

Отношение вероятности безотказной работы ТЭУ для режима Q_{0max} будет иметь вид

$$\frac{P_n}{P_{ц}} = \exp[-n\lambda_0\Theta t(1-\varphi)]. \quad (8)$$

На рис. 2, а представлена зависимость отношения вероятностей безотказной работы ТЭУ в непрерывном и циклическом режимах $P_n/P_{ц}$ от скажности φ при заданных значениях Θ (для модулей типа М4,5-27 и М10-27, $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч, $t=10000$ ч) для режима Q_{0max} . При уменьшении скажности φ от 1,0 до 0 отношение $P_n/P_{ц}$ уменьшается за счет роста $P_{ц}$. При $\varphi=1,0$ $P_n=P_{ц}$.

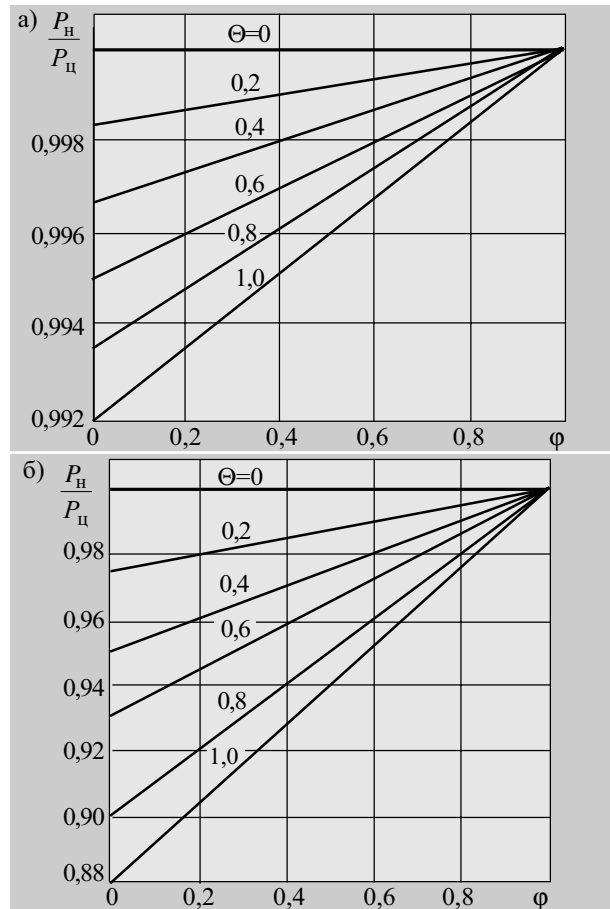


Рис. 2. Зависимость отношения вероятностей безотказной работы ТЭУ $P_n/P_{ц}$ от скажности φ при заданном Θ в режиме Q_{0max} для модулей типа М4,5-27, М10-27 (а) и типа М8-127 (б)

На рис. 2, б представлена та же зависимость для модулей типа М8-127 ($\lambda_0=1 \cdot 10^{-7}$ 1/ч, $t=10000$). Наблюдается более резкая зависимость $P_n/P_{ц}$ от скажности φ .

Вероятность безотказной работы ТЭУ в тех же условиях для режима E_{max} можно записать в виде

$$P_{ц} = e^{-\lambda_{ц}t}, \text{ где } \lambda_{ц} = n\lambda_0 \frac{\Theta^4 \left(1 + \frac{\Delta T_{max}}{T_0}\right) \varphi}{1 + \frac{\Delta T_{max}}{T_0} \Theta}, \quad (9)$$

а вероятность безотказной работы ТЭУ в непрерывном режиме —

$$P_n = e^{-\lambda_n t}, \text{ где } \lambda_n = n\lambda_0 \frac{\Theta^4 \left(1 + \frac{\Delta T_{max}}{T_0}\right)}{1 + \frac{\Delta T_{max}}{T_0} \Theta}. \quad (10)$$

Отношение вероятности безотказной работы ТЭУ для режима E_{max} будет иметь вид

$$\frac{P_n}{P_{ц}} = \exp \left[-n\lambda_0 t \frac{\Theta^4 \left(1 + \frac{\Delta T_{max}}{T_0}\right)}{1 + \frac{\Delta T_{max}}{T_0} \Theta} (1-\varphi) \right]. \quad (11)$$

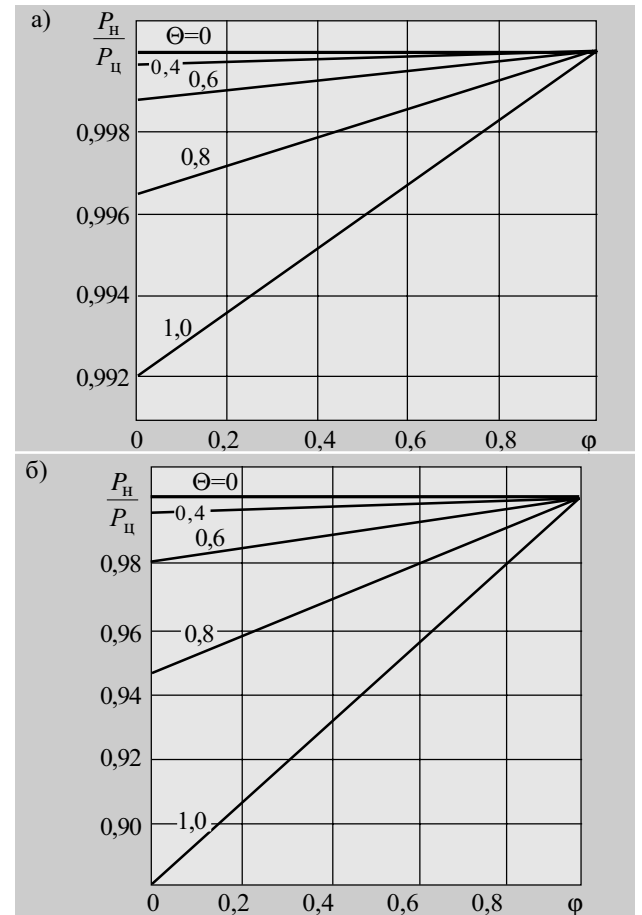


Рис. 3. Зависимость отношения $P_n/P_{ц}$ от скажности φ при заданном Θ в режиме E_{max} для модулей типа М4,5-27, М10-27 (а) и типа М8-127 (б)

На рис. 3, а представлена зависимость отношения вероятностей безотказной работы ТЭУ $P_n/P_{ц}$ от скважности ϕ при заданных значениях Θ для модулей типа М4,5-27 и М10-27 для режима E_{max} . При уменьшении скважности ϕ от 1,0 до 0 отношение $P_n/P_{ц}$ уменьшается за счет роста $P_{ц}$. При $\phi=1,0 P_n=P_{ц}$.

На рис. 3, б представлена та же зависимость для модулей типа М8-127. По сравнению с зависимостями, приведенными на рис. 3, а, наблюдается более резкая зависимость $P_n/P_{ц}$ от скважности ϕ .

При частоте включений и выключений $N>0,1$ интенсивность отказов растет и будет определяться как величиной ϕ , так и величиной Ψ . При $N>1$ интенсивность отказов ТЭУ будет, в основном, определяться величиной Ψ и может значительно (в несколько десятков раз) превысить интенсивность отказов в непрерывном режиме.

Таким образом, предложены соотношения для оценки показателей надежности термоэлектрического устройства, работающего в циклическом режиме. Как следует из сравнительного анализа показателей надежности циклического и непрерыв-

ного режимов работы ТЭУ, для повышения надежности функционирования ТЭУ в циклическом режиме работы следует выбирать:

- а) режим с малым значением ϕ ;
- б) режим, близкий к режиму E_{max} ;
- в) режим с частотой включений и выключений не выше 0,1.

Полученные соотношения позволяют оценить влияние достаточно широкого круга физических параметров на показатели надежности охлаждающего устройства ТЭУ в циклическом режиме и вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием ТЭУ на основе прогнозируемых показателей надежности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кузнецов В. А. Основные вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры.— М.— Л.: Энергия, 1965.
2. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1976.
3. 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.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

LIC Russia
6-я международная специализированная выставка
27-30 января 2004
**ЛАЗЕРЫ
ОПТИКА
ЭЛЕКТРОНИКА**
Москва • Сокольники
www.licexpo.ru

О Р Г А Н И З А Т О Р Ы :

 **MVK**
международная выставочная компания

 **Лазерная ассоциация**
международная научно-техническая организация

 **СОКОЛЬНИКИ**
культуры-выставки-досуг

Оргкомитет выставки: 107113 Москва Сокольнический вал, 1, пав. 4
Тел.: (095) 105-3417, 268-0709, 269-5866 Факс: (095) 268-0891, 105-3489 E-mail: es@mvk.ru