

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МИКРОХОЛОДИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

О.Н. ШИНКАРУК, А.В. КЛЕПИКОВСКИЙ, А.Г. ШАЙКО-ШАЙКОВСКИЙ

В статье приведена методика оценки надежности терморегулирующих систем на основе термоэлектрических элементов, что позволяет учесть наряду с электрической прочностью материала элементов их механическую стойкость в многокаскадных конструкциях.

Ключевые слова: радиотехнические средства, терморегулирующие системы, термоэлектрические элементы, механические напряжения, элементы Пельтье, температурные колебания.

Постоянный рост функциональности и сложности радиотехнических средств (РТО), привело к значительному усложнению методологии оценки и обеспечения их надежности. Особенно актуальным является вопрос обеспечения надежности функционирования РТО в специфических условиях климатической и температурной динамики, характерно многим современным приемопередающим системам (приемо-передатчики в системе сотовой связи, радиолокационные станции и т.д.). Кроме того, миниатюризация и постоянное увеличение вычислительной мощности микро-ЭВМ, применяемых в РТО, привело еще и к появлению значительного внутренне системной температурной динамики, в результате чего возникла необходимость применения дополнительных термостабилизирующих подсистем. В простейшем случае - это воздушные или жидкостные охладители, а в более сложном - термоэлектрические элементы Пельтье, которые дают возможность электронно регулировать температуру в широком диапазоне. Однако, из-за применения элементов Пельтье в виде многокаскадных конструкций, задача оценки их надежности значительно усложняется, поскольку ее необходимо проводить не только по показателям электрической, но и по показателям механической прочности. Это связано с тем, что высокая температурная динамика отдельных элементов приводит к появлению значительных механических напряжений как в самой конструкции элементов Пельтье, так и в элементах узлов РТС, температуру которых они стабилизируют.

Цель данной работы заключается в разработке методики оценки величин температурных напряжений в многокаскадных конструкциях термоэлектрических элементов, что позволяет учесть диапазон возможных значений температурных колебаний, физико-механические характеристики материалов, входящих в состав конструкций, а также учесть допуски на размеры различных элементов.

Оценка механических напряжений в многокаскадных конструкциях термоэлектрических элементов (ТЭЭ), зависит от многих факторов. Основными из них являются свойства материала

самого термоэлемента, его физико-механические характеристики, свойства материала припоя, с помощью которого термоэлемент крепится к токопроводящей полоске на ситаловый подложке, от геометрических размеров и формы элементов конструкции и перепадам температуры ΔT , возникающие на каждом каскаде.

Следует учесть, что разброс значений физико-механических характеристик материалов, колебания размеров элементов, толщины слоев припоя (даже в пределах допуска), может привести, при номинальных размерах конструкции, весьма существенных колебаний исходной функции напряжений, то есть — влияющие на значение усилий, которые возникают по торцам термоэлементов и на величины механических напряжений, которые при этом появляются в материале конструкции [1].

В работе рассмотрены три возможных случая:

а) размеры термоэлемента, а также — слоев припоя находится в номинальных значениях размеров (рис. 1);

б) призмы термоэлементов изготовленные на верхней границе допуска на размер, а толщина каждого из слоев припоя равна половинные расстояния между теплопереходами и является максимальной в пределах допуска длины термоэлемента;

в) призма термоэлемента изготовлена на нижней границе допуска ее длины, а толщина слоев припоя в данном случае является максимальным и равна половине разницы между расстояниями теплопереходов и минимальной длиной призмы термоэлемента.

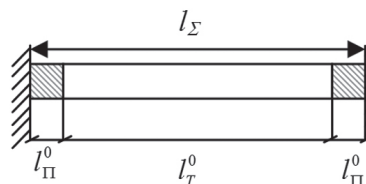


Рис. 1. Расчетная схема размеров термоэлемента при номинальных значениях размеров (l_T^0 — номинальная длина термоэлементов, l_{Π}^0 — номинальная толщина слоев припоя, l_{Σ} — суммарное расстояние между теплопереходами)

Реакцию между теплопереходами и термоэлементами (рис. 1), можно рассчитать по выражению:

$$R = \frac{(t_2 - t_1)(2\alpha_{\Pi}L_{\Pi}^0 + \alpha_T L_T^0)F}{\frac{2L_{\Pi}^0}{E_{\Pi}} + \frac{L_T^0}{E_T}} \quad (1)$$

или напряжения:

$$\sigma = \frac{(t_2 - t_1)(2\alpha_{\Pi}L_{\Pi}^0 + \alpha_T L_T^0)}{\frac{2L_{\Pi}^0}{E_{\Pi}} + \frac{L_T^0}{E_T}} \quad (2)$$

где t_1 и t_2 – значения начальных и конечных величин температур; α_T – коэффициент линейного температурного расширения термоэлектрического материала; E_{Π} – модуль упругости I-го рода материала припоя; α_{Π} – коэффициент линейного температурного расширения материала припоя; E_T – модуль упругости I-го рода материала термоэлемента; L_T^0 – номинальное значение длины термоэлемента; L_{Π}^0 – номинальное значение толщины слоя припоя.

Если учитывать, что в каждом каскаде komponуются термоэлементы разной длины, размеры которых находятся в пределах допуска, но на верхней границе или выше номинального значения, а также ниже номинального значения, вплоть до нижней величины поля допуска, то это значительно сложнее влиять на общую картину распределения усилий, напряжений и перемещений в целом. Итак, если учесть температурные деформации, то есть перемещение теплопереходов результате воздействий температуры, то положение их торцевых поверхностей будет разным (так их первоначальная длина будет также различной).

Тогда нормальные напряжения в материале термоэлементов могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{R}{F}, \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\Delta}{\frac{2(L_{\Pi}^{\min} + L_{\Pi}^{\max})[1 - \alpha_{\Pi}(t_2 - t_1)]}{E_{\Pi}} + \frac{(L_T^{\min} + L_T^{\max})[1 - \alpha_T(t_2 - t_1)]}{E_T}}$$

где Δ – зазор между торцевыми поверхностями термоэлементов и теплопереходом; σ – допустимое значение напряжений; L_{Π}^{\max} – максимальное значение толщины слоя припоя; L_{Π}^{\min} – минимальное значение толщины слоя припоя; L_T^{\max} – максимальное значение длины термоэлемента; L_T^{\min} – минимальное значение длины термоэлемента.

Для практических расчетов были рассмотрены три случая, для которых использованы следующие значения:

Случай а): $L_T^0 = 14 \cdot 10^{-4}$ м, $L_{\Pi}^0 = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м, $L_{\Sigma} = 15 \cdot 10^{-4}$ м, $E_T = (2 \times 10) \cdot 10^{10}$ н/м², $E_{\Pi} = 1,2 \cdot 10^{10}$ н/м², $\alpha_{\Pi} = 24,7 \cdot 10^{-6}$ м¹/град, $\alpha_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ м¹/град, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = -60^\circ\text{C}$.

Случай б) $L_T^{\max} = 14,2 \cdot 10^{-4}$ м, $L_{\Pi}^{\min} = 0,4 \cdot 10^{-4}$ м, $L_{\Sigma} = 15 \cdot 10^{-4}$ м, $E_T = (2 \times 10) \cdot 10^{10}$ н/м², $E_{\Pi} = 1,2 \cdot 10^{10}$ н/м², $\alpha_{\Pi} = 24,7 \cdot 10^{-6}$ м¹/град, $\alpha_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ м¹/град, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = -60^\circ\text{C}$.

Случай в) $L_T^{\min} = 13,8 \cdot 10^{-4}$ м, $L_{\Pi}^{\max} = 0,6 \cdot 10^{-4}$ м, $L_{\Sigma} = 15 \cdot 10^{-4}$ м, $E_T = (2 \times 10) \cdot 10^{10}$ н/м², $E_{\Pi} = 1,2 \cdot 10^{10}$ н/м², $\alpha_{\Pi} = 24,7 \cdot 10^{-6}$ м¹/град, $\alpha_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ м¹/град, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = -60^\circ\text{C}$.

Подставляя в уравнение (3) соответствующие числовые значения получены:

$$\sigma = 0,1261 \text{ МПа} = 1,28 \text{ кг/см}^2.$$

Если принять, что разброс значений длины термоэлементов происходит в соответствии с нормальным законом распределения, принимая во внимание сформулированные выше предположения можно сделать вывод, что величина механических напряжений в материале термоэлементов результате действия влияния перепада температур и в результате деформации всей системы в целом, незначительное и не создает угрозы механической целостности изделия.

Однако, важно исследовать как влияет на прочность конструкции разброс значений модуля упругости I-го рода материала термоэлементов, который в соответствии с справочным данным может колебаться в достаточно широких пределах: $E_T = (2 \times 10) \cdot 10^{10}$ Па.

Для случая, когда $E_T = 2 \cdot 10^{10}$ Па, т.е. находится на нижней границе поля допуска

$$\sigma_{\min} = 5,097 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,52 \text{ кг/см}^2.$$

При условии, что $E_T = 10 \cdot 10^{10}$ Па, т.е. находится на верхней границе поля допуска

$$\sigma_{\max} = 17,88 \cdot 10^4 \text{ Па} = 1,82 \text{ кг/см}^2.$$

Итак, изменение величины модуля упругости I-го рода несущественно влияет на прочность термоэлементов, поскольку напряжение хотя и отличаются в несколько раз, но их величина остается по модулю достаточно существенна.

Эти соотношения могут быть разными, главная цель – определить методику расчета напряжений в материале термоэлементов при любых, произвольных соотношениях.

Учитывая все указанное выше получим видоизмененный выражение (1) учитывающий все перечисленные факторы:

$$R = \Delta \cdot F \quad (4)$$

$$\frac{2[1 - \alpha_{\Pi}(t_2 - t_1)] \left(\frac{L_{\Pi}^{\min}}{31} + \frac{L_{\Pi}^{\max}}{6} \right) + \frac{[1 - \alpha_T(t_2 - t_1)] \left(\frac{L_T^{\min}}{31} + \frac{L_T^{\max}}{6} \right)}{E_T}$$

Из проведенных расчетов видно, что разброс значений допуска модуля упругости термоэлектрического материала E_T (E_T^{\max} , E_T^{\min}) не влияет существенно на прочность изделия в целом из-за создания значительных механических напряжений в кристаллах Bi_2Te_3 от перепада температур.

Аналогичный вывод справедлив также при оценке влияния на прочность изделий возможных температурных колебаний, в пределах

допуска длины термоэлементов, создаваемых каждым каскадом. Если одновременно учитывать возможный разброс значений модуля упругости I-го рода термоэлектрического материала и технологические колебания в пределах допуска длины термоэлементов, то расчеты с учетом принятых выше численных значений всех параметров позволяют рассчитать интервалы возможных значений напряжений, графически изображении на рис. 2.

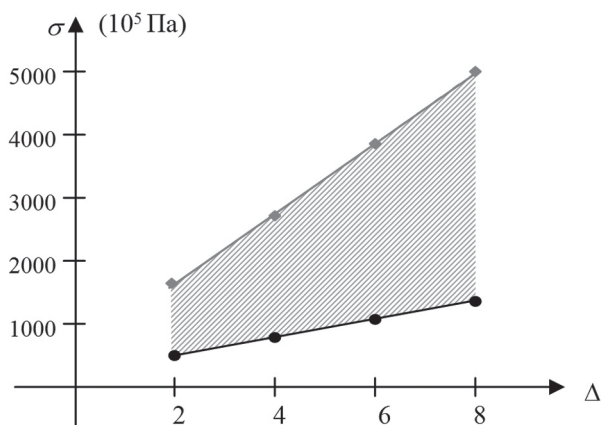


Рис. 2. Область возможных разбросов напряжения, которые могут возникать в термоэлементах при колебании значений модуля упругости I-го рода

Таким образом, возможные эксплуатационные напряжения не превышают допустимых значений в статических режимах работы и как показали расчеты, даже при экстремально возможных режимах, с учетом максимальных значений допусков на изготовление при холодном ударе: $(t_2 - t_1) = 28 \text{ }^\circ\text{C}$, и при горячем ударе: $(t_2 - t_1) = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, значения механических напряжений будут составлять: $\sigma = [(-0,1542) \times (-0,2744)] \text{ МПа}$. С учетом возможных колебаний значений модуля упругости I-го рода эти значения будут $\sigma = [(16,02 \times 22,59)] \text{ МПа}$ [2].

Полученные величины также не превышают допустимых значений действующих напряжений в статических режимах.

Приведенная методика позволяет оценить надежность термоэлектрических элементов с учетом гораздо более широкого спектра возможных факторов, что особенно актуально при их комплексировании. Проведенные расчеты показали, что при небольшом количестве элементов и при их невысоком температурном колебании величина механических напряжений в материале термоэлементов через действие температурных перепадов в различных точках конструкции незначительная и не создает угрозы механической целостности изделия. Однако в экстремальных условиях диапазон механических колебаний становится опасным для целостности конструкции терморегулирующей системы, особенно в предельных точках геометрической формы отдельных элементов, в местах их электрического контакта. Кроме того, ситуация может значительно

ухудшиться, если к общей картине добавить еще возможны механические вибрации всей РТО в целом и термоэлектрической системы в частности.

Литература

- [1] Клепиковский А.В. Методика проектного підвищення надійності технічних систем з декількома степенями свободи / А.В. Клепиковський: тези доп. III Всеукр. наук.-техн. конф. [“Актуальні проблеми комп’ютерних технологій”], (Хмельницький, 30 квітня 2009 р.). – 2009. – С. 59-61.
- [2] Клепиковский А.В., Шайко-Шайковський О.Г. Конструктивно-технологічні шляхи керування параметрами термоелектричного охолоджувача на модулях Пельтье // Термоелектрика. – 2003. – № 3. – С. 80-83.

Поступила в редколлегию 14.02.2012



Шинкарук Олег Николаевич, доктор технических наук, проф., зав. кафедры радиотехники и связи Хмельницкого национального университета; радиотехнические системы, надежность сложных технических систем.



Клепиковский Андрей Валериевич, аспирант, кафедра биофизики, Буковинский государственный медицинский университет, г. Черновцы. Область научных интересов: радиоэлектронные приборы и устройства, их использование в медицине.



Шайко-Шайковський Александр Геннадиевич, доктор технических наук, проф., проф. кафедры общей физики Черновицкого национального университета имени Юрия Федьковича. Область научных интересов: радиоэлектронные приборы, системы, устройства (прочность, виброустойчивость, защита от механических воздействий), биомеханика.

УДК 621.396.67

Методика оцінки температурних напружень в мікрохолодильних пристроях для радіоелектронної апаратури / О.М. Шинкарук, А.В. Клепиковський, О.Г. Шайко-Шайковський // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 116-119.

Робота виробів радіоелектронної апаратури пов’язана з температурними впливами, зумовленими як зовнішніми впливами, так і специфікою їх роботи, функціональними зв’язками самих пристроїв. Температурні деформації, які при цьому виникають, залежать від матеріалів, що використовуються при створенні виробів, точності виготовлення компонентів і комплектуючих, технології складання та випробування виробів.

У роботі викладена методика оцінки цих температурних напружень, що враховує, крім перерахованих вище факторів, також розкид фізико-механічних характеристик використовуваних матеріалів, що дозволяє на етапі проектування оцінювати працездатності майбутніх виробів.

Ключові слова: радіотехнічні засоби, терморегулюючі системи, термоелектричні елементи, механічні напруження, елементи Пельтьє, температурні коливання.

Л. 2. Бібліогр.: 2 найм.

UDC 621.396.67

Method of estimating the thermal stresses in microrefrigerating devices for radio-electronic equipment / O.N. Shynkaruk, A.V. Klepikovskii, O.G. Shaiko-Shaikovskii // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 116-119.

This paper provides the methodology of estimating the reliability of thermoregulatory systems on the basis of thermoelectric elements, which allows to take into account together with the electric strength of the material of elements their mechanical durability in multistage arrangements.

Keywords: radio aids, thermoregulatory systems, thermoelectric elements, mechanical stress, Peltier elements, temperature fluctuations.

Fig. 2. Ref.: 2 items.