

Анализ влияния вибрационных воздействий на усталостные характеристики бортовой радиоэлектронной аппаратуры

Е. А. Данилова¹, И. И. Кочегаров², А. В. Лысенко³

Пензенский государственный университет

¹siori@mail.ru, ²kipra@mail.ru, ³lysenko_av@bk.ru

Аннотация. В статье приводится анализ подходов к оценке долговечности электрорадиоэлементов, устанавливаемых на печатных платах. Долговечность зависит от действующих механических напряжений, величина которых обусловлена условиями эксплуатации и местом расположения элемента на печатной плате. При проведении испытаний достаточно сложно воспроизвести реальные условия эксплуатации, поэтому оценка долговечности носит вероятностный характер и возникает необходимость в разработке новых методик и средств проведения испытаний.

Ключевые слова: печатные платы; долговечность; испытания; вибрации

I. ВВЕДЕНИЕ

Испытания радиоэлектронной аппаратуры важный и ответственный этап, являющийся неотъемлемой частью процесса производства надежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА). БРЭА отличается сложностью выполняемых задач и высокой чувствительностью к дестабилизирующим факторам (вибрации, температуре, магнитным и электрическим полям и т.д.).

Причинами отказов и нарушения нормального функционирования БРЭА при воздействии вибрации могут быть отслоение и отрывы проводников и межсоединений печатных плат (ПП), нарушение паяных, клеевых и сварных соединений, отрывы электрорадиоэлементов (ЭРЭ), разрушение основания ПП и т.д. Все эти явления характерны как для однослойных, так и для многослойных ПП.

Для определения зависимости между интенсивностью воздействий и временем до разрушения необходимо проведение длительных испытаний, что значительно увеличит время производства и стоимость ПП. Поэтому новые методы и оборудование проведения испытаний обеспечат снижение себестоимости за счет сокращения затрат на проведение испытаний (обслуживание испытательного оборудования, потребление энергии), а

также сокращение времени на выпуск изделий. Далее в статье рассмотрены подходы к решению данной проблемы.

II. ОПИСАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ЭЛЕМЕНТАХ ПП

Усталостная прочность представляет собой постепенное накопление повреждений в элементе конструкции при переменных напряжениях. Различают многоцикловую и малоцикловую усталость [1].

Малоцикловая усталость предполагает наличие довольно высоких нагрузок (напряжений и деформаций) и сравнительно небольшого числа циклов. Многоцикловая усталость предполагает наличие достаточно невысоких нагрузок (напряжений) и большого числа циклов. В дальнейшем остановимся на описании именно процессов многоцикловой усталости считая, что они соответствуют эксплуатации БРЭА в условиях вибрации.

Для характеристики многоцикловой усталости используют кривых усталости или кривых Велера (SN кривые), получаемые экспериментально для каждого материала. Вид кривой усталости существенно зависит от физических характеристик материала.

Основной проблемой при оценке долговечности ПП является получение данных о механических характеристиках материалов ее элементов, поскольку испытания образцов длительный и дорогостоящий процесс, а справочные источники располагают ограниченным перечнем свойств материалов [2, 3]. В первую очередь это касается выводов ЭРЭ.

В отсутствии экспериментальных данных для материалов проводников ПП возможно построение приближенной кривой усталости. Для этого необходимы справочные значения предела прочности материала σ_{BP} и предела выносливости σ_{-1N} , получение которых не так проблематично.

Например, выводы ЭРЭ представляют собой холодноотянутую медную проволоку, для которой прочности материала σ_{BP} равен 300 МПа.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта по Соглашению № 17-79-10281 от 24.07.2017 при финансовой поддержке Российского научного фонда

Значение предела выносливости σ_{-1N} для данного материала в справочниках отсутствует, поэтому воспользуемся формулой его приближенного определения через предел прочности материала:

$$\sigma_{-1N} = (0,25 \dots 0,50) \sigma_{BP}. \quad (1)$$

Получаем, что $\sigma_{-1N} = 75 \dots 150$ МПа.

Таким образом, кривую усталости, аппроксимируем двумя отрезками прямой линии. Ограниченная выносливость образцов соответствует наклонной прямой, предел выносливости – горизонтальной (рис. 1).

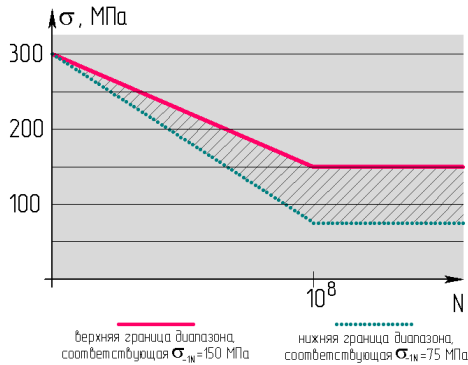


Рис. 1. Кривая усталости для медной проволоки

Тогда, долговечность при заданном напряжении определяется как

$$N = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1N}}{\sigma} \right)^m. \quad (2)$$

Напряжение соответствующее заданной долговечности

$$\sigma = \sigma_{-1N} \sqrt[m]{N_0 / N}. \quad (3)$$

Коэффициент m при отсутствии экспериментальных данных берется из справочников и обычно составляет величину 8–12.

Используя построенную кривую усталости или формулу (2) оцениваем долговечность элемента конструкции при симметричных циклах.

В работе [4] предложена зависимость для определения времени до усталостного разрушения при гармонической вибрации:

$$t_p = \sum_1^N T = NT = \frac{N}{f_1}, \quad (4)$$

где T – период колебаний; N – число циклов до разрушения; f_1 – первая собственная частота колебаний ПП.

Для применения кривых усталости в условиях сложного нагружения применяются так называемые

эквивалентные величины (амплитуда эквивалентного напряжения), вычисляемое по одному из критериев.

Таким образом, исходными данными для расчета времени до разрушения и запаса усталостной прочности будут являться значения механических напряжений в элементах ПУ. Для каждого элемента определяются наиболее опасные сечения, напряжения в которых определяются способами рассмотренными ниже.

III. ОТКАЗЫ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗРУШЕНИЕМ ПАЙКИ SMD-КОМПОНЕНТОВ

В настоящее время широкое распространение получила технология поверхностного монтажа радиоэлементов (SMD), главными преимуществами которой являются габариты и надежность компонентов.

Колебания монтируемых на поверхности компонентов рассматривают совместно с несущим элементом. Отказы SMD-компонентов чаще связаны с разрушениями мест пайки.

Для определения надежности места пайки SMD-компонента в [5] предложена приближенная модель в виде заземленной по двум сторонам пластины (рис. 2).

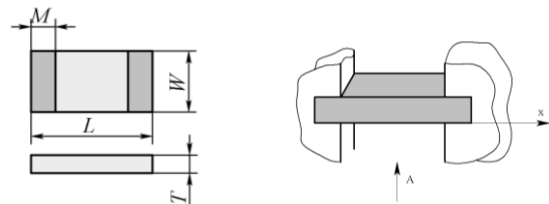


Рис. 2. Модель SMD-компонента

По [6] амплитуда гармонических колебаний, происходящих в ПП и в компоненте, вычисляется по формуле:

$$A(x) = \frac{sh(KL/2) \cos K(x-L/2) + \sin(KL/2) chK(x-L/2)}{ch(KL/2) \sin(KL/2) + sh(KL/2) \cos(KL/2)} A, \quad (5)$$

где A – амплитуда вибрации; $K = \sqrt{12\rho\omega^2(1-\mu^2)/EG}$ – коэффициент, определяющий граничные условия; E – модуль Юнга, Н/м²; T – толщина пластины, м; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала пластины, кг/м³.

Для оценки времени до усталостного разрушения паяного соединения и самого компонента под действием вибрации необходимо оценить возникающие в них механические напряжения и сравнить с их критическими значениями. Примем, что при гармонических колебаниях в ПП и компоненте происходит чистый изгиб, под которым понимается такой вид нагружения, при котором в поперечных сечениях возникают только изгибающие моменты, а поперечные силы равны 0 [7].

Из теории сопротивления материалов можно получить связь между изгибающим моментом и кривизной элемента (в нашем случае радиус изгиба ПП) (рис. 3):

$$M_{III} = \frac{E_{III} J_{III}}{R_{III}}, \quad (6)$$

где E_{III} – модуль Юнга материала ПП; J_{III} – момент инерции сечения ПП относительно главной центральной оси, перпендикулярной к плоскости изгибающего момента; R_{III} – радиус изгиба ПП.

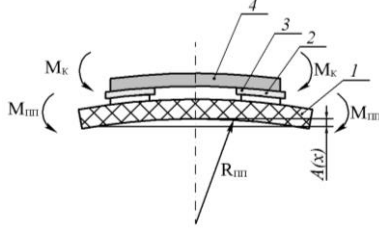


Рис. 3. Модель SMD-компонента: 1 – ПП; 2 – припойная площадка; 3 – припой; 4 – компонент

При чистом изгибе ось элемента принимает форму дуги окружности, поэтому:

$$R_{III} \approx \frac{l^2 + 4A^2(x)}{8A(x)}, \quad (7)$$

где l – длина изгибающегося участка ПП.

Как уже было отмечено, колебания ПП и установленного на ее поверхности компонента рассматриваем совместно, в их сечениях возникает один и тот же изгибающий момент. То есть изменение кривизны для всех участков будет одним и тем же. Зная, что $M_{III} = M_K$ можно оценить радиус изгиба корпуса компонента:

$$R_K = \frac{(EJ)_{\Sigma}}{M_K}, \quad (8)$$

где $(EJ)_{\Sigma}$ – суммарная жесткость компонента $(EJ)_K$ и паяного соединения $(EJ)_II$:

$$(EJ)_{\Sigma} = \frac{(EJ)_K \cdot (EJ)_{II}}{(EJ)_K + (EJ)_{II}}. \quad (9)$$

По закону Гука максимальное механическое напряжение в корпусе компонента определяется по формуле:

$$\sigma_{max} = E_K \varepsilon = \frac{E_K y}{R_K} = \frac{E_K T}{2R_K}, \quad (10)$$

где ε – относительное удлинение верхнего слоя компонента; y – расстояние от верхнего слоя корпуса компонента до нейтрального слоя, принимаемое равным половине толщины компонента.

После расчета максимального механического напряжения производится определение числа циклов при рассчитанном механическом напряжении и времени до усталостного разрушения.

IV. ОТКАЗЫ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗРУШЕНИЕМ ВЫВОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Современные модули БРЭА наряду с поверхностно-монтажными компонентами (SMD) и содержат выводные компоненты, некоторые из которых обладают значительной массой.

Усталостные разрушения происходят при резонансных колебаниях ЭРЭ и заключаются в разрушении выводов в опасных точках. Это связано со значительным возрастанием механических напряжений. В зависимости от вида ЭРЭ и варианта его установки на ПП может быть различное количество опасных точек.

В случае одностороннего монтажа выводных ЭРЭ, при котором корпус элемента прижимается к поверхности ПП и закрепляется с помощью клеевого соединения опасные напряжения возникают в выводах элементов, в частности в местах крепления вывода к ПП. Механические напряжения в выводах будут возникать за счет деформации ПП в условиях возникновения механического резонанса.

В [8] предположен подход для оценки усталостных процессов, происходящих в опасных точках при действии вибрации и рассмотрен случай расположения ЭРЭ в центре ПП со сторонами a и b , когда его ось направлена по координате X .

Прогиб в центре платы при резонансе (при $x=a/2$ и $y=b/2$):

$$W_0 = \frac{K_1(\xi_x, \xi_y)}{\gamma} Z_0, \quad (11)$$

где $K_1(\xi_x, \xi_y) = K_1(\xi_x) \cdot K_1(\xi_y)$ – параметр формы колебаний; ξ_x и ξ_y – относительные координаты в рассматриваемой точке, Z_0 – амплитуда колебаний; γ – коэффициент механических потерь.

Угол изгиба платы в точке крепления вывода:

$$\varphi = W_0 \frac{\pi}{a} \cos \frac{\pi x_1}{a}, \quad (12)$$

где x_1 – значение координаты точки крепления вывода по X .

Деформация выводов за счет прогиба ПП:

$$f = f_1(x) - f_2(x) = \frac{Z_0}{\gamma} [K_1(\xi_{x1}, \xi_{y1}) - K_1(\xi_{x2}, \xi_{y2})], \quad (13)$$

где $K_1(\xi_{x1}, \xi_{y1})$, $K_1(\xi_{x2}, \xi_{y2})$ – точки крепления вывода и крепления вывода к корпусу ЭРЭ с относительными координатами ξ_x, ξ_y (рис. 4).

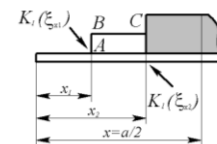


Рис. 4. Схема расположения точек крепления выводов

Изгибающие моменты в точках *A*, *B* и *C* складываются из изгибающего момента за счет линейного перемещения точки *A* при деформации ПП и момента, возникающего за счет поворота точки крепления элемента на угол φ . В [9] приведены некоторые формулы для определения изгибающих моментов для характерных точек.

Далее определяется напряжение в точке с максимальным значением изгибающего момента:

$$\sigma_i = \frac{M_i d}{2J}, \quad (14)$$

где d – диаметр вывода ЭРЭ, м.

Количество циклов до разрушения вывода определяется по кривой усталости материала вывода.

При испытаниях на механические воздействия было установлено, что наиболее подвержены негативному влиянию выводные элементы, характеризующиеся значительной массой (рис. 5).

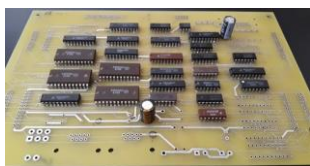


Рис. 5. Фотография ПП с электрическим монтажом (отсутствуют конденсаторы № 1 и № 2, а также транзистор КТ819В)

Разрушение выводов и отрыв конденсатора № 1 от поверхности ПП при синусоидальной вибрации произошло через 4 ч., разрушение выводов и отрыв корпуса транзистора – через 8 ч., разрушение выводов и отрыв конденсатора № 2 – через 24 ч.

Кроме того, для резисторов экспериментально установлено, что 50 % отказов происходит из-за нарушения контактного соединения выводов с резистивным элементом и его обрыва, до 40 % – из-за перегорания резистивного элемента, и 10 % – из-за недопустимого изменения сопротивления.

В. АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ, СВЯЗАННЫХ С ОСНОВАНИЕМ ПЕЧАТНОГО УЗЛА

Отказы печатных узлов (ПУ) при воздействии вибрации связаны с деформациями и механическими напряжениями в различных конструктивных элементах. В первую очередь это само основание ПУ, которое чаще всего представляет собой слоистый пластик.

Кроме того, к механическим характеристикам оснований ПП относят деформацию под нагрузкой. Данная характеристика имеет важное значение, поскольку определяет надежность и долговечность крепления ПП в корпусах, стойках, т.е. жесткость крепления в сборке при

помощи болтов, заклепок и других крепежных приспособлений. Изменение толщины ПП под нагрузкой для некоторых материалов оснований достигает 1,7 %.

При длительной эксплуатации в условиях вибрации перечисленные факторы вызывают появление трещин в местах крепления ПП. При проведении испытаний было установлено, что действие вибрации приводит к образованию поверхностных трещин в местах крепления ПП уже через 96 часов испытаний.

VI. ВЫВОДЫ

Механические воздействия приводят к постепенному накоплению повреждений в элементах ПУ. Поэтому проявление дефектов требует несколько тысяч часов испытаний, что в современных условиях затруднительно реализовать. Также при длительных испытаниях крайне трудно фиксировать точное время перехода дефекта в отказ и сам процесс развития дефекта, т.е. не обеспечивается требуемая достоверность и точность контроля. Для количественной оценки данного явления используются такие показатели как число циклов до разрушения, время до усталостного разрушения и запас прочности. Предложенная в статье методика расчета этих показателей позволит прогнозировать работоспособность ПУ в реальных условиях при ограниченном числе испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: учеб. пособие / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. 61 с.
- [2] Кашапов М. Вибрации – возможности и методики исследования / М. Кашапов // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2010. № 2. С. 59–61.
- [3] Карабан В., Сунцов С., Сухоруков, М. Прогнозирование надежности плат на основе LTCC-технологии для бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического назначения / В. Карабан, С. Сунцов, М. Сухоруков // ANSYS Advantage. Русская редакция. 2012. № 18. С. 24–30.
- [4] Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.А. Фролова. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
- [5] Каленкович Н.И. и др. Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов / Н.И. Каленкович, Е.П. Фастовец, Ю.В. Шамгин. Мн.: Высш. шк., 1998. 244 с.
- [6] Коненков Ю.К., Ушаков И.А. Вопросы надёжности радиоэлектронной аппаратуры при механических нагрузках. М.: Сов. радио, 1975. 144 с.
- [7] Сопrotивление материалов. Федосьев В.М., Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1957 г. 552 с.
- [8] Талицкий Е.Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2001. 256 с.
- [9] Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка. 1975. 704 с.