
УДК 621.396.67

Б.М. Уваров, Ю.Ф. Зиньковский

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ЧАСТИЧНЫХ ОТКАЗАХ

Рассмотрены проблемы определения показателей надежности радиоэлектронной аппаратуры при внешних механических воздействиях – вибрациях и ударах. Большинство отказов в структурно-конструктивных модулях радиоэлектронных аппаратов – ячейках и микросборках – приходится на разрушение выводов электрорадиоэлементов и нарушение контактов в паяных соединениях. Представлены методы расчета прочности и выносливости выводов и их паяных соединений. Проанализированы возможности появления частичных отказов в этих элементах и влияние их на показатели надежности всего аппарата. Проиллюстрированы результаты моделирования влияния вибраций и ударов на показатели надежности ячейки.

Ключевые слова: радиоэлектронный аппарат, вибрации, удары, электрические контакты, паяные соединения, надежность, частичный отказ.

1. Постановка проблемы

Показатели надежности радиоэлектронного аппарата (РЭА) во многих случаях входят в число основных функциональных характеристик, а иногда являются определяющими. Статистика отказов РЭА, возникающих в процессе эксплуатации показывает, что 70 – 85 % их определяется внешними дестабилизирующими факторами, к числу которых в первую очередь необходимо отнести два: механические и тепловые. Механические – это вибрационные и удар-

ные ускорения, тепловые – температуры элементов электронной структуры (ЭЭС) РЭА, являющиеся следствием воздействия окружающей среды и внутреннего перегрева при выполнении ЭЭС своего функционального назначения. На долю механических воздействий можно отнести 40 – 60 % всех отказов.

В результате механических воздействий в конструкции РЭА возникают механические напряжения, могущие привести к нарушению целостности элемента конструкции. В ряде случаев такое нарушение не приводит к разрушению элемента, но может по-

влиять на изменение какой-либо из функциональных характеристик РЭА. Такое явление следует считать частичным отказом и определить степень его влияния на показатели надежности аппарата, прежде всего – на вероятность безотказной работы $P(\tau)$ в течение заданного срока службы. Для этого необходимо в модель расчета $P(\tau)$ ввести параметры, учитывающие возможность появления частичного отказа и разработать методику определения таких показателей.

Необходимо также выяснить, какие элементы конструкции РЭА являются наиболее уязвимыми с точки зрения появления частичных отказов.

Всё это позволит более обоснованно определять одни из важнейших характеристик РЭА – показатели надежности, т.е. способность выполнять аппаратом его функцию. Особенно это важно для авиационной аппаратуры, отказы которой могут привести к аварийным ситуациям при эксплуатации летательных аппаратов.

2. Основные структурные элементы в конструктивной иерархии радиоэлектронного аппарата

По конструктивной сложности РЭА необходимо отнести к наиболее сложным техническим устройствам, так как в большинстве современных РЭА количество конструктивных элементов может достигать десятков тысяч.

Часть существующих РЭА имеет индивидуальную конструкцию, форму корпуса и компоновку, определяемые функциональным назначением и условиями эксплуатации, но большинство РЭА составляют унифицированные типовые конструкции (УТК) – унифицированные как по форме корпусов и деталей, так и по размерам [1].

В конструктивной иерархии УТК значительную часть структурных элементов составляют структурно-конструктивные модули первого порядка (СКМ1) – ячейки и микросборки (МСб) функционально законченные модули, ЭЭС и функциональные узлы (ФУ) которых размещены на полимерной, металлической или керамической печатной плате (ПП). У некоторых РЭА в СКМ1 сосредоточены все электромагнитные процессы, определяющие функциональное назначение устройства; на долю остальных элементов конструкции, принимающих участие в поддержании упомянутых процессов, остается только обеспечение электрических связей между модулями; СКМ1 может иметь специальный каркас, системы теплоотвода и экранирования.

В РЭА СКМ1 входят в состав конструкций второго уровня – блочных каркасов (СКМ2), а последние – в состав конструкций наивысшего, третьего уровня (СКМ3): шкафов, стоек, контейнеров, пультов.

В общем объеме всей разнообразной РЭА СКМ1 составляют не менее 70–85% структурных

элементов, поэтому можно считать, что именно они и должны рассматриваться как основные объекты, для которых в первую очередь и необходимо определять их функциональные характеристики.

Защиту от внешних механических и климатических дестабилизирующих факторов осуществляют конструкции второго и третьего уровня, оборудованные системами вибро-удароизоляции и поддержания необходимого температурного режима. Но на элементы конструкции СКМ1 также действуют вибрационные и ударные нагрузки, и необходимо выяснить, какие из этих элементов могут выйти из строя под действием этих факторов.

3. Элементы конструкции, наиболее чувствительные к механическим воздействиям

Можно выделить такие объекты в конструкции СКМ1, в которых необходимо исследовать возникновение механических напряжений, могущих привести к их разрушению и появлению отказов:

- элементы несущей конструкции СКМ1: ПП и каркас;

- электрорадиоэлементы (ЭРЭ) и ФУ.

- выводы ЭРЭ и ФУ;

- паяные соединения выводов.

Элементы электронной структуры почти никогда не выходят из строя под действием механических факторов, потому что они сами рассчитаны на перегрузки существенно большие, чем могут возникнуть в СКМ1 при эксплуатации. Так, например, интегральные микросхемы (ИМС) серии К500 допускают вибрационные перегрузки до 40 g, ударные – до 1000 g, для других ИМС они меньше, но также достаточно велики (вибрационные 20 g, ударные – 150 g). Вибрационные перегрузки, могущие возникнуть на объектах разных групп РЭА (наземной, морской, авиационной и ракетной), согласно требованиям нормативных документов не превышают 10 g, ударные – 150 g.

Элементы несущих конструкций СКМ1 (каркасы, панели) имеют значительные запасы прочности и выносливости по отношению к напряжениям, возникающим в них при действии вибраций и ударов. Практика эксплуатации РЭА показывает, что отказов таких элементов при нормированных значениях механических дестабилизирующих факторов не бывает.

Также достаточно прочны пластины-основы ячеек и МСб, о чем свидетельствуют результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования [2].

Детальный анализ показывает, что объектами, прочностью и выносливостью которых могут быть определяющими для надежности СКМ1, являются выводы и паяные соединения последних.

4. Прочність и выносливость выводов ЭЭС

Выводы большинства ИМС можно рассматривать как прямые или кривые стержни различной формы, а их прочность определять известными методами теории прочности. Под действием вибраций и ударов концы выводов ИМС, соединенные с проводниками печатного монтажа, смещаются относительно корпуса ИМС, и таких смещений два вида – линейные и угловые. Для их определения должны быть прежде всего рассчитаны деформации самой платы. При этом обычно принимают, что ее длинная сторона ориентирована вдоль оси X, короткая – вдоль оси Y. Схема определения деформаций δx и $\delta \theta_x$ в плоскости X - Z приведена на рис. 1, а; соответственно в плоскости Y - Z будут деформации δy и $\delta \theta_y$.

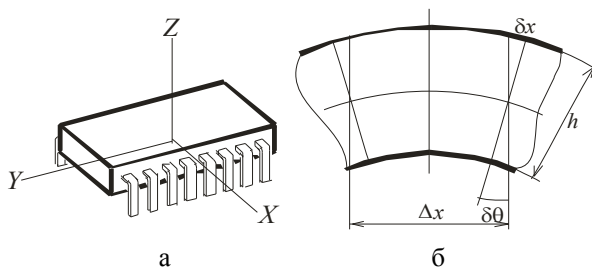


Рис. 1. Ориентация корпуса ИМС на плате (а); деформации основной платы в плоскости X - Z (б)

Прогибы платы $w(x,y)$ рассчитывают методами технической теории пластин [2], и тогда угловые деформации в точках крепления выводов (с координатами x, y):

$$\delta \theta_x = \frac{\partial [w(x,y)]}{\partial x}; \quad \delta \theta_y = \frac{\partial [w(x,y)]}{\partial y}, \quad (1)$$

линейные деформации: $\delta x = 0,5h\delta \theta_x$; $\delta y = 0,5h\delta \theta_y$, h – толщина платы.

Корпуса ИМС на плате могут быть ориентированы различно; если корпус установлен своей длинной стороной вдоль короткой стороны платы, система координат для ИМС будет такой, как показано на рис. 1, а. Чаще всего форма выводов и смещения их концов при деформациях платы в плоскости X - Z

соответствуют рис. 2, а – в; в плоскости Y - Z проекции и деформации всех выводов выглядят одинаково (рис. 2, г), но в действительности жёсткость их в этой плоскости различна – она наибольшая для схемы а; у схемы б горизонтальная часть вывода длиной b работает как скручиваемый стержень, а у схемы в скручивается весь кривой стержень длиной $0,5\pi R$.

При расчетах прочности выводов в первую очередь необходимо учесть напряжения от изгибающих моментов – они наибольшие, а последние возникают как результат смещений $\delta x, \delta y, \delta z$ и $\delta \theta_x, \delta \theta_y$.

Максимальные значения моментов в плоскости X - Z для приведенных схем:

– вариант а:

$$M_x = \frac{EJ_y}{1} \cdot \left(6 \frac{\delta x}{1} + 4\delta \theta_x \right); \quad (2)$$

– вариант б:

$$M_x = \frac{3EJ_y}{1+b} \left[\left(2 + \frac{b}{1} \right) \frac{\delta x}{1} + \left(4 + 3 \frac{b}{1} \right) \delta \theta_x \right]; \quad (3)$$

– вариант в:

$$M_x = \frac{4}{4+\pi} \cdot \frac{EJ_y}{R} \left(\frac{\delta x}{R} + \delta \theta_x \right), \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала; J_y – момент инерции сечения вывода.

Для вывода – прямого стержня, (рис. 3, схемы а, г) максимальный момент от перемещений δy и $\delta \theta_y$:

$$M_y = \frac{EJ_x}{1} \left(6 \frac{\delta y}{1} + 4\delta \theta_y \right). \quad (5)$$

При определении изгибающего момента в плоскости Y - Z для вывода по схеме рис. 2, б, следует учесть, что верхний конец вертикального участка l может поворачиваться на угол θ_y , а последний определяется коэффициентом жёсткости GJ_k горизонтального участка b (G – модуль упругости, J_k – момент инерции сечения при кручении). Для максимального изгибающего момента в плоскости Y - Z получим:

$$M_y = \left(6 \frac{1+2pb}{1+6pb} \cdot \frac{\delta y}{1} + 4 \frac{1+1,5pb}{1+3pb} \delta \theta_y \right) \frac{EJ_x}{1}; \quad (6)$$

$$p = EJ_x / GJ_k.$$

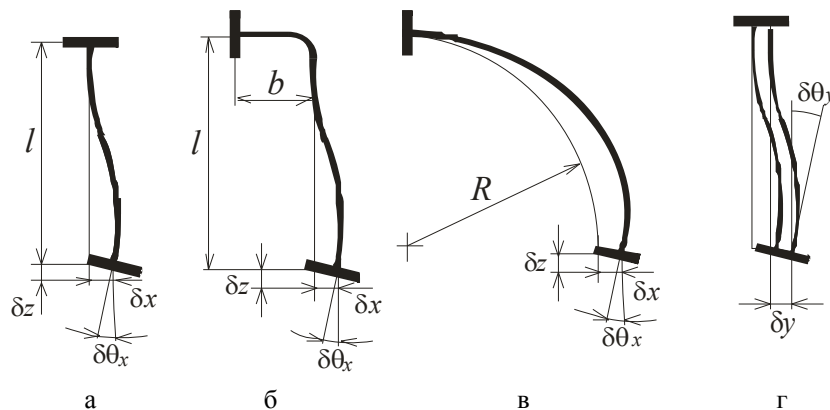


Рис. 2. Форма выводов ИМС и деформации их концов в плоскостях X - Z (а, б, в) и Y - Z (г)

Для прямоугольного сечения шириной s и толщиной δ $J_k = \beta s \delta^3$, а коэффициент β можно принять равным $\beta = 0,328 - 0,193\delta/s$.

Если у вывода участок b отсутствует (вывод – прямой стержень), $p = 0$, а выражение (6) превращается в (5).

У платы, закрепленной любым способом, деформации δx , δy и $\delta\theta_x$, $\delta\theta_y$ возникают одновременно, поэтому прочность выводов необходимо рассчитывать при действии обоих моментов – M_x та M_y , а они максимальны на конце вывода, закрепленного в плате; напряжения в этом месте максимальны, их необходимо рассчитывать по формулам:

$$y_x = M_x/W_y; \quad y_y = M_y/W_x. \quad (7)$$

Эквивалентное напряжение, определяющее прочность вывода:

$$y_{\text{экр}} = \sqrt{y_x^2 + y_y^2 - y_x y_y}. \quad (8)$$

Как показывают расчеты, эти напряжения могут быть достаточно большими, превышать предел текучести материала выводов и в конце концов привести к разрушению вывода.

Относительное время x для определения показателей надёжности, согласно стандарту [3], должно учитывать число циклов нагружения N в процессе эксплуатации и K_p – коэффициент режима нагружения элемента конструкции:

$$x = K_p \frac{N}{N_E} = K_p \frac{N}{N_0} \left[\frac{y}{y_{-1}} \right]^m, \quad (9)$$

где N_0 – базовое число циклов (абсцисса точки излома кривой усталости), при котором определен предел усталости σ_{-1} ; t – показатель кривой усталости.

В соответствии с моделью DM-распределения, справедливой для механических процессов деградации, вероятность безотказной работы детали можно определить функцией нормального распределения:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du,$$

где u – параметр интегрирования.

Если конструкция состоит из n структурных уровней, в каждый из которых входят k элементов, и

отказ любого из них приведет к выходу из строя всего устройства, общую вероятность безотказной работы необходимо рассчитывать по формуле:

$$P(x) = \prod_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^k P_i(x) \right]. \quad (10)$$

У корпусов ИМС и МСб обычно бывает несколько десятков (иногда несколько сотен) выводов, и напряжения в них от деформаций основной платы могут существенно отличаться даже у каждой из ИМС. Поэтому расчеты моментов, напряжений и показателей надёжности необходимо проводить по формулам (2) – (9) для каждого вывода каждого из ЭЭС.

Расчеты угловых деформаций выводов ИМС можно упростить с помощью линейной модели изменения углов поворота выводов относительно среднего вывода, которая учитывает, что наибольшие деформации, то есть и наибольшие напряжения возникают в крайних выводах ИМС – они и определяют показатели выносливости и надёжности.

Схема определения угла для каждого вывода, число которых равно n , приведена на рис. 3. При изгибе платы 2 концы крайних выводов ИМС 3 поворачиваются в точках 1 и n на углы θ_1 и θ_n соответственно (рис. 3, а), а относительный угол поворота $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_n$; центральная часть ИМС вместе с платой поворачиваются на угол $\theta_m = (\theta_1 + \theta_n)/2$, т.е. средние выводы не деформируются. Диаграмма изменения относительных углов поворота приведена на рис. 3, б. Угол поворота каждого вывода $\Delta\theta_i$ относительно среднего θ_m :

$$\Delta\theta_i = \left| (\theta_1 - \theta_n) \left(\frac{n-i}{n-1} - 0,5 \right) \right|, \quad (11)$$

то есть расчет углов поворота $\Delta\theta_1$ и θ_n по формулам (1) необходимо провести только для двух крайних выводов, что существенно сокращает количество вычислительных операций.

Для средних выводов вероятность $P(x)_i = 1$, а для крайних – наименьшая и зависит от напряжений в них. Напряжения от деформаций в плоскостях $X - Z$ и $Y - Z$ определяют эквивалентные $\sigma_{\text{экр}}$, показатели надёжности $P(x)$ необходимо рассчитывать по формулам (10).

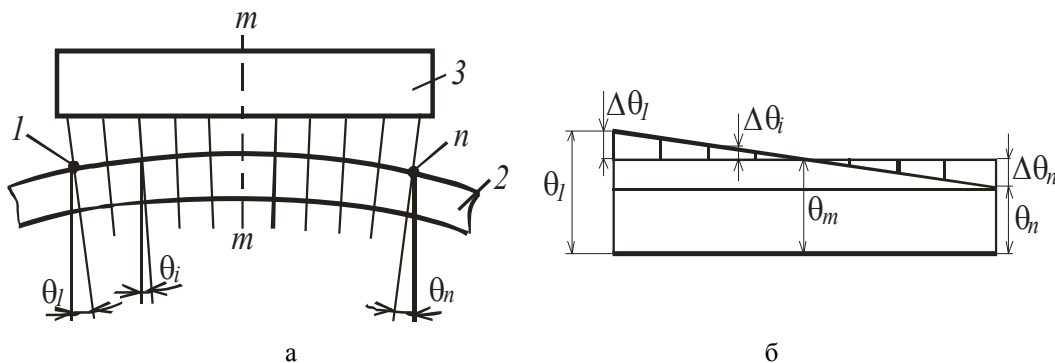


Рис. 3. Линейная модель относительных углов поворота для выводов ИМС:
а – ИМС на плате; б – диаграмма относительных поворотов

Значительный объем вычислительной работы по определению надёжности выводов может быть проведен только с помощью объектно-ориентированных программ систем автоматизированного проектирования (САПР). Программные модули такой САПР для расчета деформаций плат и выносливости выводов ЭЭС разработаны и описаны в [4].

Расчет напряжений в самих выводах и показателей их надежности производится программой **ContConcl12**. Исходными данными для расчета, которые необходимо ввести в программу, являются:

- размеры платы и механические характеристики её материала;
- способы закрепления сторон платы или её опорных точек (предусмотрены 14 вариантов таких способов);
- координаты размещения на ней ЭЭС, их размеры и массы;
- параметры дестабилизирующих механических факторов – вибраций и ударов.

В точках с координатами x_i, y_i , где выводы ЭЭС соединены с проводниками печатного монтажа, программа рассчитывает вертикальные прогибы $w_i(x_i, y_i)$ как результат решения дифференциального уравнения динамических деформаций пластины $w(x, y, \tau)$, возникающих под действием кинематического возбуждения зон или точек крепления $z_0(\tau)$ [2]:

$$m \frac{\partial^2 w(x, y, \tau)}{\partial \tau^2} + (1 + j\gamma) \left[\frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial y^4} \right] = m \frac{\partial^2 z_0(\tau)}{\partial \tau^2}, \quad (12)$$

где m – приведенная масса пластины, учитывающая массы ЭЭС; D – цилиндрическая жёсткость пластины; γ – коэффициент механических потерь материала; j – мнимая единица; τ – время.

Линейные деформации $\delta x, \delta y$ и угловые $\delta \theta_x, \delta \theta_y$ рассчитываются по формулам (1). Для расчета изгибающих моментов в выводах по формулам (2) – (6) и возникающих в них напряжений по формулам (7) – (8) необходимо ввести в программу конфигурацию и размеры выводов каждого из ЭЭС. В программе предусмотрены три вида корпусов ЭЭС: с выводами в один ряд – для резисторов, конденсаторов, диодов, ИМС; в два ряда вдоль длинной стороны корпуса – для ИМС, трансформаторов; в четыре ряда вдоль боковых сторон прямоугольного корпуса – для ИМС, процессоров.

На рис. 4 в качестве примера показано окно программы **ContConcl12**, иллюстрирующее ввод геометрических параметров выводов. Программа рассчитывает напряжения в каждом выводе, определяет вероятность его безотказной работы $P_i(x)$, а затем по формуле (10) – общую вероятность $P(x)$ для всего СКМ1. Кроме того, программа рассчиты-

вает напряжения в самой плате и учитывает влияние их на надежность всего СКМ1.

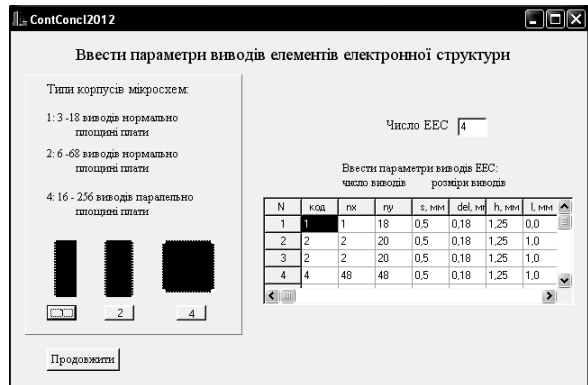


Рис. 4. Окно введения размеров выводов ЭЭС

Окно с результатами расчета надежности выводов для одного из СКМ1 в качестве примера приведено на рис. 5.

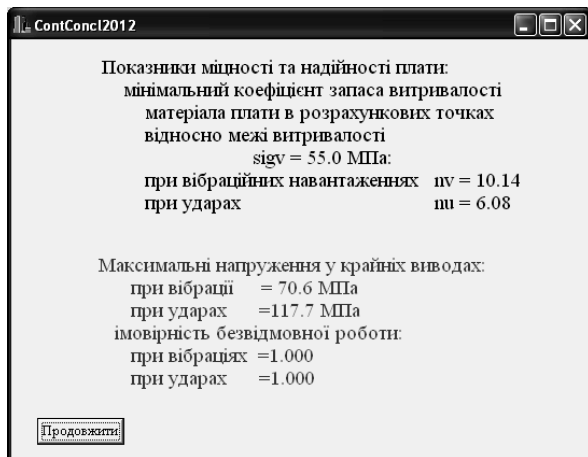


Рис. 5. Результаты расчета надежности СКМ1

5. Прочность и выносливость паяных соединений выводов

Паяные соединения выводов ЭЭС с печатными проводниками платы при вибрациях и ударах также деформируются, под действием возникающих в них напряжений могут утратить свою целостность и привести к отказу функционирования РЭА. Механические характеристики припоев значительно ниже, чем у материалов проводников печатного монтажа и выводов; кроме того, припой более пластичен, и поэтому при действии вибрационных и ударных факторов деформации платы могут привести к превышению предела текучести припоя и к его пластическим деформациям.

Обычно рассматривают три вида паяных соединений выводов с проводниками печатного монтажа: в металлизированном отверстии печатной платы, наклепное, столбиковое или шариковое (рис. 6).

При расчете соединений в металлизированном отверстии следует допустить, что в соответствии с технической теорией пластин, поперечные сечения пластины при изгибе остаются плоскими, поэтому

металлизированное отверстие, а также и припой в нём, поворачиваясь относительно плоской поверхности недеформированной платы, не изменяют сво-

ей формы и поэтому в вертикальном столбике припоя напряжений от изгиба и растяжения практически не возникает (рис. 6, а).

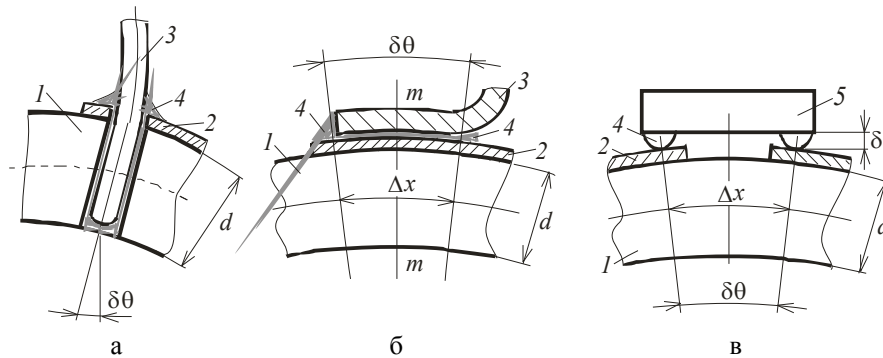


Рис. 6. Виды паяных соединений:

а – в металлизированном отверстии; б – нахлесточное; в – столбиковое

Но в этом столбике припоя могут возникать напряжения сдвига, если вывод смещается вдоль оси отверстия при деформациях платы. Схема таких осевых смещений приведена на рис. 7.

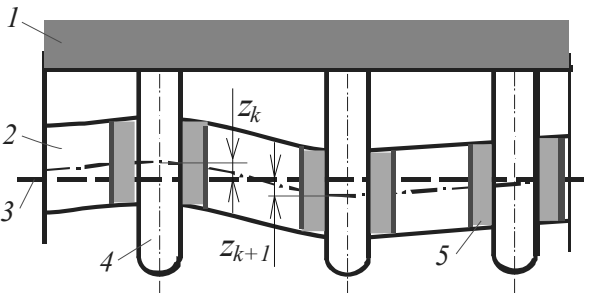


Рис. 7. Смещения выводов относительно оси отверстия: 1 – корпус МС; 2 – плата; 3 – средняя линия; 4 – вывод; 5 – припой; z_k , z_{k+1} – относительное смещение выводов

Как и при расчетах прочности и выносливости выводов, можно считать, что корпуса ИМС и МСб не деформируются. Определив смещения выводов z_i относительно изогнутой срединной плоскости платы, можно найти касательные напряжения τ в слое припоя:

$$\tau = z / h; \quad \phi = G\tau,$$

где γ – угол сдвига слоя припоя высотой h ; G – модуль сдвига для припоя.

В нахлесточном соединении (рис. 6, б) в слое припоя из-за относительных деформаций проводников также возникают касательные напряжения. Их можно найти, используя трехслойную модель соединения, приведенную на рис. 8 [2].

В слое припоя толщиной δ возникают касательные напряжения τ (из-за большой податливости припоя нормальными напряжениями в нём можно пренебречь), которые принуждают деформироваться выводы – в последних появляются деформации ε_2 и напряжения σ_2 . При изменении температуры СКМ на Δt в печатных проводниках и выводах появляются дополнительные относительные линейные деформации $\alpha_1 \Delta t$ и $\alpha_2 \Delta t$, где α_1 и α_2 – коэффициенты линейного расширения их материалов.

Для трехслойной модели паяного соединения:

– условия равновесия:

$$\tau = -h_1 \frac{d\sigma_1}{dx}; \quad \tau = h_2 \frac{d\sigma_2}{dx};$$

– условия совместности деформаций:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \delta \frac{d\gamma}{dx};$$

– условия упругости:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon + \frac{\sigma_1}{E_1} + \alpha_1 \Delta t; \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} + \alpha_2 \Delta t;$$

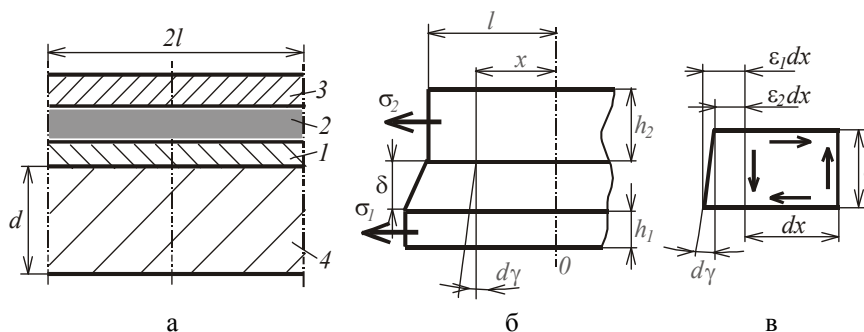


Рис. 8. Схема расчета напряжений в паяном соединении: а – схема платы, проводников и выводов; б – напряжения в проводниках платы и выводах; в – деформации в слое припоя; 1 – печатный проводник; 2 – припой; 3 – вывод; 4 – плата

дають в совокупности найти уравнение для определения σ_2 :

$$\frac{d^2\sigma_2}{dx^2} - k^2\sigma_2 + c = 0,$$

где $k^2 = \frac{G}{d} \left(\frac{1}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_2 h_2} \right)$; $c = \frac{G}{d h_2} (e + \Delta b \Delta t)$;

$$\Delta b = b_1 - b_2 .$$

Угловые деформации сдвига и соответствующие касательные напряжения в припое:

$$\gamma = \frac{\varepsilon + \Delta\alpha\Delta t}{k\delta} \cdot \frac{\sinh kx}{\cosh kl}; \quad \tau = G\gamma.$$

Для паяных соединений долговечность N , определяющая первый момент образования трещины в слое припоя и угловой сдвиг γ связаны соотношением [2]:

$$N = 22,3/\gamma^{1,18} .$$

Столбиковые соединения (рис. 8, в) применяют для ЭЭС малых размеров (с расстояниями между контактами $\Delta x \approx 1$ мм и менее), стремясь уменьшить возникающие в них касательные напряжения.

Паяных соединений в каждом СКМ может быть несколько сот (а то и тысяч), поэтому для расчета их надёжности целесообразно использовать программные продукты. Для этого разработана программа **SoldCont12** [4].

Структура, алгоритм и программные модули обеих программ – **ContConcl12** и **SoldCont12** идентичны, они отличаются только модулями расчетов прочности и надёжности: для первой – выводов, для второй – паяных соединений.

Исходными данными для расчета, которые необходимо ввести в программу **SoldCont12**, являются:

- размеры платы и механические характеристики её материала;
- способы закрепления сторон платы или её опорных точек (предусмотрены 14 вариантов таких способов);
- координаты размещения на ней ЭЭС, их размеры и массы;
- параметры дестабилизирующих механических факторов – вибраций и ударов;
- механические характеристики припоя – модуль сдвига и предел текучести;
- разница температур ячейки (рабочей и нормальной);
- разница коэффициентов линейного расширения проводников печатной платы и выводов.

В программе предусмотрены три вида корпусов ЭЭС, как и в программе **ContConcl12**, а также два вида соединений – в металлизированном отверстии и нахлесточное. Для каждого ЭЭС необходимо ввести число выводов, а для паяных соединений – длину l_v , ширину d_v , толщину слоя припоя δ .

Программа рассчитывает относительные деформации соседних выводов, а по ним – касатель-

ные напряжения τ в каждом из паяных соединений, вероятность его безотказной работы $P_i(x)$, а затем по формуле (10) вероятность безотказной работы всего СКМ.

На рис. 9 в качестве примера показано окно программы **SoldCont 12**, иллюстрирующее ввод геометрических параметров паяных соединений.



Рис. 9. Ввод размеров паяных соединений

Окно с результатами расчета надежности паяных соединений для одного из СКМ1 в качестве примера приведено на рис. 10.

6. Надёжность РЭА при частичных отказах

В таких сложных устройствах, какими являются РЭА, могут быть элементы (обычно это ЭЭС), которые даже при частичной утрате работоспособности продолжают выполнять свою функцию с некоторыми ограничениями. Такой частичный отказ снижает показатель надёжности элемента $P_k(x)$ и тем самым снижается надёжность всего РЭА.

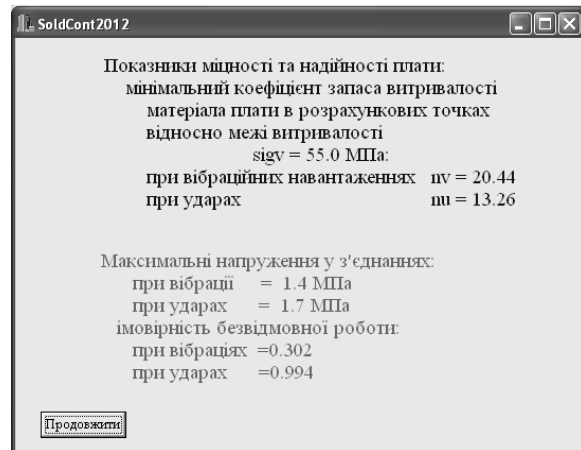


Рис. 10. Результаты расчета надежности паяных соединений и всего СКМ1

Для учета этих эффектов в показатели надёжности каждого элемента $P_k(x)$ целесообразно ввести коэффициент влияния β_k – степень, в которую следует возвести вероятность отказа, а надёжность всего устройства рассчитывать так:

$$P(x) = \prod_{k=1}^m P_k^{\beta_k}(x) . \quad (13)$$

Значення кожного из коефіцієнтів β_k должно находиться в границах $0 \leq \beta_k \leq 1$: если $\beta_k = 0$, $P_k(x) = 1$ (элемент абсолютно надёжен); если $\beta_k = 1$, значение $P_k(x)$ будет равняться номинально определенному ранее, на предыдущих этапах проектирования. Определить β_k можно следующим образом: если прологарифмировать выражение (13), получим уравнение:

$$\ln P(x) = v_1 \ln P_1(x) + \dots + v_k \ln P_k(x) + \dots + v_m \ln P_m(x).$$

Коефициенты влияния β_k в этом уравнении можно найти, например, в соответствии с теорией многоцелевой оптимизации как приоритеты функций $\ln P_k(x)$ [5]. Если, например, заданы бинарные соотношения вида $\beta_i > \beta_j$, оптимальные значения функции $\beta_i = (m_i + 1) / \sum_{i=1}^m (m_j + 1)$. Коефициенты β_i можно найти также методами принятия решений в условиях неопределенности [6]. Для всех методов обычно принимают, что должны выполняться условия $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$. При таком принципе определения коэффициентов β_k получим увеличение надёжности для выбранного элемента при $\beta_k < 1$, т.е. частичная утрата им функциональных свойств не означает отказа элемента, а фактически – даёт возможность получить более высокую расчетную эксплуатационную его надёжность, а также и всего устройства. Естественно, такое определение коэффициентов β_k требует детального анализа задания показателей надёжности каждого элемента РЭА – конструктивного, электронной структуры (даже отказ контактов некоторых выводов ИМС не обязательно будет означать невозможность выполнения ею своей функции).

Выводы

1. Рассмотрены факторы, влияющие на надёжность структурно-конструктивных модулей электронных аппаратов – ячеек и микросборок – при дестабилизирующих механических воздействиях.

2. Определено, что существенное влияние на показатели надёжности оказывают механические напряжения в выводах элементов электронной структуры и их паяных соединениях.

3. Предложены методики расчетов механических напряжений в выводах ЭЭС и их паяных соединениях, и определения показателей надёжности с учетом напряжений во всех этих элементах.

4. Разработаны и описаны программные модули систем автоматизированного расчета прочности, выносливости, деформаций и надёжности выводов элементов электронной структуры, паяных соединений выводов.

5. Предложены методы определения показателей надёжности, учитывающие частичную утрату элементами РЭА их функциональных свойств, хотя эта утрата еще не приводит к полному их отказу в работе.

6. Показано, что использование таких методов позволяет более объективно определять показатели эксплуатационной надёжности реальных устройств РЭА.

Список литературы

1. ДСТУ 2521-94. Система типових конструкцій. Типи та основні розміри.
2. Уваров Б.М. Проектування та оптимізація механістичних конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками / Б.М. Уваров, Ю.Ф. Зінковський. – К.: "Корнійчук", 2011. – 248 с.
3. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги.
4. Уваров Б.М. Автоматизація визначення показників механічної витривалості, теплових режимів та надійності радіоелектронних апаратів: Навч. посіб. (електронне видання) / Б.М. Уваров. – К.: НТУУ "КПІ", 2014. – 111 с.
5. Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации / В.В. Хоменюк. – М.: Наука, 1983. – 124 с.
6. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р.И. Трухаев. – М.: Наука, 1981. – 257 с.

Поступила в редколлегию 3.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Потий, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПРИ ЧАСТКОВИХ ВІДМОВАХ

Б.М. Уваров, Ю.Ф. Зінковський

Розглянуті проблеми визначення показників надійності радіоелектронної апаратури при зовнішніх механічних впливах – вібраціях та ударах. Більшість відмов у структурно-конструктивних модулях радіоелектронних апаратів – чарунках та мікросбірках – припадає на руйнування виводів електрорадіоелементів та порушення контактів у паяних з'єднаннях. Запропоновані методи розрахунку міцності й витривалості виводів та їх паяних з'єднань. Проаналізовані можливості появи часткових відмов в цих елементах та вплив їх на показники надійності всього апарата. Проілюстровані результати моделювання впливу вібрацій й ударів на показники надійності чарунк.

Ключові слова: радіоелектронний апарат, вібрації, удари, паяні з'єднання, надійність, часткова відмова.

DEFINITION OF ELECTRONIC DEVICES RELIABILITY INDICES IN PARTIAL FAILURES

B.M. Uvarov, Yu.F. Zinkovskij

The problems of determining electronic equipment reliability indices were considered with the external mechanical influences - vibrations and hitting. Most failures of structural electronic devices design modules (cells and chips) are the destructions of electric components outputs and the solder joints. There are presented the methods of strength and endurance calculating of their outputs and solder joints. It was analyzed the possibility of the appearance of partial failures in these elements and their influence on the performance reliability of the entire device. There are illustrated results of creating model of vibration and hitting impact on indexes of cell reliability.

Keywords: radio-electronic device, vibrations, hitting, electrical contacts, soldered joints, reliability, partial failure.