

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 531/534(075.8)

Б.М. УВАРОВ, д-р техн. наук, Ю.Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, д-р техн. наук

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ НАДЕЖНОСТИ

Постановка проблемы

Устройства радиоэлектронной аппаратура (РЭА) выделяются из всех остальных технических устройств своей высокой сложностью, а их особенности возможно определить, если подойти к ним самим (их функциям, структуре, конструкции, условиям эксплуатации) с позиций системного анализа, т.е. рассматривать каждое из них как систему, а физические процессы, в нем происходящие, – с точки зрения функционального назначения.

Системный анализ устройств РЭА обнаруживает их уникальность, они отличаются от всех других технических объектов, в первую очередь, следующими особенностями:

- сложностью: функциональной, структурной, топологической, конструктивной, технологической;

- широким диапазоном условий эксплуатации;

- устойчивостью к внешним дестабилизирующим факторам.

Статистика отказов РЭА, возникающих в процессе эксплуатации, показывает, что 70 – 85 % их определяются внешними дестабилизирующими факторами, к числу которых в первую очередь необходимо отнести два: механические и тепловые. Механические – это вибрационные и ударные ускорения, тепловые – температуры элементов электронной структуры (ЭЭС) РЭА, являющиеся следствием воздействия окружающей среды и внутреннего перегрева при выполнении ЭЭС своего функционального назначения.

Вероятность безотказной работы $P(\tau)$ (где τ – время) в течение заданного срока службы для ЭЭС, структурно-конструктивных модулей (СКМ) и всего РЭА во многих случаях является определяющей. У совершенной в технико-экономическом отношении конструкции этот показатель должен быть как можно более высоким, в идеальном случае следует стремиться к значению $P(\tau) = 1$. Для РЭА необходимы комплексные показатели надежности, учитывающие влияние как механических, так и тепловых (внешних и внутренних) воздействий. Проектирование оптимального РЭА должно вестись таким образом, чтобы получить в реальном устройстве эти комплексные показатели наивысшими.

В статье рассматриваются методы оптимизации конструкции, обеспечивающие максимальную вероятность безотказной работы СКМ при воздействии механических и тепловых дестабилизирующих факторов.

Основные структурные элементы в конструктивной иерархии радиоэлектронного аппарата

Электронную аппаратуру 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.

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. Защиту от внешних механических и климатических дестабилизирующих факторов осуществляют конструкции второго и третьего порядка, оборудованные системами вибро-удароизоляции и поддержания необходимого температурного режима.

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, максимальной надежности которых в первую очередь и необходимо достигнуть.

Источники ненадежности в СКМ1

Как показывает анализ, элементами СКМ1, наиболее чувствительными к действию механических дестабилизирующих факторов, являются выводы ЭЭС и паяные соединения этих выводов. В них возникают усталостные механические напряжения, могущие привести к нарушениям электрических контактов и отказам аппаратуры [1]. Показатели надежности, связанные с механическими напряжениями, определяются в соответствии со стандартами [2].

В большинстве случаев считается, что отказ любого электрического контакта может привести к отказу всего РЭА, поэтому вероятность безотказной работы $P(\tau)$ последнего следует рассчитывать в соответствии с последовательной структурной схемой надежности (СН-1) для которой:

$$P(\tau) = \prod_i^k P_i(\tau), \quad (1)$$

где $P_i(\tau)$ – вероятность безотказной работы i -го контакта, общее число которых k .

Общее число контактов в современных РЭА может достигать нескольких тысяч, поэтому расчеты ”механической“ надежности могут быть проведены только с помощью программных средств.

Внешние тепловые воздействия и внутренние тепловыделения в ЭЭС РЭА приводят к повышению температур этих элементов, к понижению их надежности и всего аппарата. Методы определения температур ЭЭС СКМ рассмотрены в [3], а показателей их надежности, связанных с температурами – в [2]. Для определения ”тепловой“ надежности РЭА также необходимы программные средства, а сам расчет производят по формуле (1), в которой $P_i(\tau)$ – вероятность безотказной работы i -го ЭЭС.

Надежность СКМ1 при механических воздействиях

Основные напряжения в выводах микросхем (МС), МСб, функциональных узлов (ФУ) возникают от их изгиба при деформациях платы-основы под действием циклических воздействий. Эти деформации зависят от способа закрепления вершин или сторон платы. В паяных соединениях выводов появляются касательные напряжения сдвига, могущие привести к нарушению электрического контакта в соединении.

Методы расчета деформаций плат, напряжений в выводах и паяных соединениях приведены в [1], там же получены расчетные соотношения для определения показателей выносливости и надежности этих элементов.

При вибрационных и ударных воздействиях на плату концы выводов, например МС, установленной на плате и соединенные с проводниками печатного монтажа (рис.1), смещаю-

тся относительно корпуса МС, и таких смещений два вида – линейные и угловые. Схема определения деформаций δx и $\delta\theta_x$ в плоскости $X-Z$ приведена на рис. 1, б; аналогично можно получить соответствующие деформации δy и $\delta\theta_y$ в плоскости $Y-Z$.

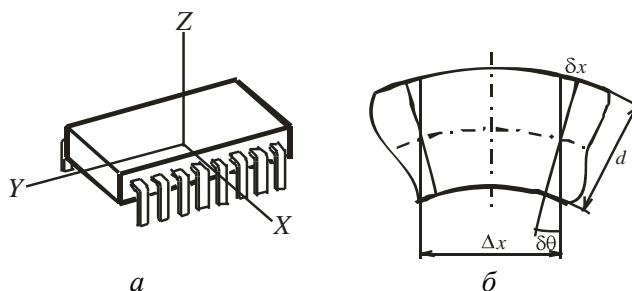


Рис. 1. Ориентация корпуса МС на плате (а) и деформации платы в плоскости $X-Z$ (б)

Прогибы платы $w(x, y)$, например, при кинематическом возбуждении смещением зон крепления z_o [1]:

$$w(x, y) = \sum_i \sum_k z_o K R_z w_i(x) w_k(y), \quad (2)$$

где K – коэффициент, учитывающий характер закрепления сторон платы; R_z – коэффициент передачи ускорений при кинематическом возбуждении; $w_i(x), w_k(y)$ – так называемые базисные функции прогибов в продольном и поперечном направлениях.

Углы поворота сечений платы (и концов выводов МС) в точке с координатами x, y :

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

линейные деформации: $\delta x = 0,5d\delta\theta_x$; $\delta y = 0,5d\delta\theta_y$, где d – толщина платы (рис. 1, б).

По деформациям выводов находятся напряжения в них δx в продольном и δy в поперечном направлениях, а затем и эквивалентное напряжение:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y}.$$

Такие напряжения возникают в выводах всех ЭЭС РЭА.

Вероятность разрушения вывода (как и любого элемента конструкции) при циклических нагрузках зависит от действующих в нем напряжений σ ; числа циклов нагружений N_c ; базового числа циклов N_0 , при котором определен предел выносливости σ_{-1} ; m – показателя кривой усталости. Относительный параметр χ (время) для определения показателей надежности, в соответствии со стандартом [2] должен учитывать K_p – коэффициент режима нагружения элемента конструкции:

$$\chi = K_p \frac{N_c}{N_E} = K_p \frac{N_c}{N_0} \left[\frac{\sigma}{\sigma_{-1}} \right]^m.$$

Для процессов, связанных с усталостными напряжениями в материале, вероятность безотказной работы необходимо вычислять в соответствии с моделью ДМ-распределения (диффузионного монотонного) по формуле [2]:

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

где $\Phi(u)$ – функция нормального распределения; $u = \frac{1-\chi}{v\sqrt{\chi}}$ – параметр интегрирования;

v – коэффициент вариации (рассеяния) процесса деградации.

Для конструкции, состоящей из нескольких структурно-конструктивных уровней n , в каждый из которых входят k элементов, и отказ любого из них приводит к выходу из строя всего РЭА, общую вероятность безотказной работы следует рассчитывать по формуле

$$P_m(\chi) = \prod_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^k P_i(\chi) \right]. \quad (3)$$

Надежность СКМ1 при тепловых воздействиях

Основание СКМ1 обычно представляет собой прямоугольную пластину из диэлектрика или металла, на которой закреплены МСб, МС, ФУ, причем каждый из этих элементов следует рассматривать как тепловыделяющий элемент (ТВЭ). Внешние тепловые воздействия определяют средний уровень температур T_0 внутри блока РЭА, а внутренние – дополнительный перегрев каждого ТВЭ.

Отвод теплоты от ТВЭ осуществляется конвекцией теплоносителя внутри блока, радиацией к стенкам блока или окружающим элементам, кондукцией к основанию ячейки.

Тепловой моделью для СКМ1 может быть двухмерная пластина с размерами $l_x \times l_y$, с дискретными источниками теплоты Q_i с центрами в координатах x_i, y_i , основания которых имеют размеры $\Delta x_i \times \Delta y_i$. Для пластин из металлов или керамики с хорошей теплопроводностью целесообразно учитывать теплоотвод через торцы пластины с коэффициентами теплоотдачи α_x, α_y .

Расчетное уравнение для температур ТВЭ ячейки, полученное в [3] методом конечных интегральных преобразований, можно представить в виде

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} C_{in} C_{im} \varphi_{in}(x) \varphi_{im}(y), \quad (4)$$

где C_{in}, C_{im} – коэффициенты, определяющие характер тепловых потоков от ТВЭ в продольном и поперечном направлениях; $\varphi_{in}(x), \varphi_{im}(y)$ – функции изменения температуры в направлениях координатных осей x, y соответственно.

По уравнению (3) можно рассчитывать тепловое поле и температуры элементов МСб.

Расчет параметров надежности отдельных ЭЭС проводят в соответствии с математическими моделями [4]:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p \times \prod_{i=1}^n K_i, \quad (5)$$

где λ_p – рабочая (эксплуатационная) интенсивность отказов элемента, λ_0 – исходная (базовая) интенсивность отказов при номинальной электрической нагрузке и нормальной температуре окружающей среды $t_{oc} = 25^\circ\text{C}$; K_p – коэффициент режима, являющийся функцией температуры $T, ^\circ\text{C}$ и коэффициента нагрузки β : $K_p = f(T, \beta)$; K_i – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов как функций различных факторов.

Выражения коэффициентов режима K_p в математических моделях, например для ИС, имеют такой вид:

$$K_p = A \exp B(T + 273),$$

где A и B – константы, определенные для соответствующих групп ИС.

Другие особенности конкретных ИС (напряжение питания, тип корпуса, степень жесткости условий эксплуатации и т.п.) учитываются в модели (4) коэффициентами K_i .

Более сложны и детализированны выражения K_p в моделях для дискретных полупроводниковых приборов (ППП) – транзисторов, диодов.

Отрезок времени, полностью соответствующий функциональной пригодности ТВЭ, принимают в качестве базового и обозначают μ ; если реальное время τ работы отличается от μ , вводят относительное время работы $\chi = \tau/\mu$.

После этого для каждого ТВЭ можно рассчитать показатели надежности (вероятность безотказной работы, технический ресурс и др.) ЭЭС РЭА в соответствии со стандартом [2] по модели DN -распределения (диффузионного немонотонного):

$$P_T(\chi) = \Phi\left(\frac{1-\chi}{v\sqrt{\chi}}\right) + e^{\frac{2}{v^2}} \Phi\left(-\frac{1+\chi}{v\sqrt{\chi}}\right). \quad (6)$$

Общую вероятность безотказной работы всей электронной структуры РЭА, определяемую тепловыми режимами, следует рассчитывать по формуле (2).

Число ЭЭС в современных РЭА может исчисляться сотнями и тысячами, поэтому, так же как и для показателей надежности, определяемых механическими факторами, вычисления показателей надежности, определяемых температурами таких элементов, реально можно проводить только с помощью объектно-ориентированных программных модулей. Комплекс таких программ описан в [3].

Комплексные показатели надежности РТУ

Любой РЭА при эксплуатации подвергается воздействию как механических, так и тепловых факторов. Поэтому для РЭА необходимы комплексные показатели надежности, учитывающие действие обоих факторов.

Таким комплексным показателем может быть вероятность безотказной работы, полученная как произведение двух независимых частных показателей $P_M(\chi_M)$ и $P_T(\chi_T)$, отображающих: первый – влияние механических напряжений, второй – температур на надежность всего РЭА:

$$P(\chi) = P_M(\chi_M) \times P_T(\chi_T). \quad (7)$$

Особенность определения частных показателей в том, что для каждого из них следует задавать свои значения относительных ресурсов χ_M или χ_T . В нормативных документах время воздействия механических нагрузок задается обычно небольшим (вибраций $\sim 0,5 - 1$ ч; число ударов $\sim 12000 - 13000$, что соответствует времени их действия не более 3 ч). Время же воздействия температур на элементы электронной структуры для РТУ может достигать десятков тысяч часов, т.е. соответствовать техническому ресурсу.

Оптимизация показателей надежности РТУ

Анализ показывает, что при проектировании показатели надежности СКМ1, следовательно и всего РЭА, могут быть повышены параметрически-топологической оптимизацией – рациональным размещением ЭЭС и ФУ на плате СКМ1 [1,3].

Координаты положения x_i, y_i ЭЭС, МС, ФУ с массами m_i на основании СКМ1 входят в выражение т. наз. приведенной массы [1]:

$$m = m_n + m_s + \sum_{i,k} \frac{m_i w_i^2(x) w_k^2(y)}{ab \int_a^b w_i^2(x) dx \int_b^a w_k^2(y) dy},$$

где m_n – масса самой платы; m_s – суммарная масса ЭЭС на плате; $w_i(x), w_k(y)$ – базисные функции.

Приведенная масса m определяет механическую частоту платы:

$$\omega_0 = \frac{\varphi(\beta)}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m}},$$

где $\varphi(\beta)$ – частотная постоянная платы, функция способа закрепления сторон; D – цилиндрическая жесткость платы.

Поэтому, изменяя топологию, можно изменить и собственную частоту платы СКМ1, т.е. при необходимости сместить ее в до- или зарезонансную зону. При этом уменьшаются прогибы платы (2) и углы поворота ее сечений в местах, где установлены ЭЭС, уменьшаются напряжения в выводах и паяных соединениях, повышается надежность работы всей конструкции.

Таким образом, топологическая оптимизация позволяет:

- изменить собственную частоту платы, т.е. вывести конструкцию из резонансной зоны;
- уменьшить механические напряжения, возникающие в материале платы;
- уменьшить линейные и угловые деформации платы, определяющие напряжения в выводах ЭЭС, МС, ФУ, а также в их паяных соединениях.

Все это повышает показатели надежности РЭА при действии механических нагрузок, т.е. показатель $P_m(\chi_m)$ и время безотказной работы [1].

Анализ уравнения (4) показывает, что тепловой режим ячейки или МСб, т.е. температур ЭЭС, МС, ФУ определяется координатами x_i, y_i последних на основе СКМ1, поэтому оптимальные показатели надежности РТУ при тепловых воздействиях также могут быть достигнуты оптимальной компоновкой.

Оптимизация теплового режима – это достижение минимальных температур элементов электронной структуры и тем самым повышение их надежности, т.е. достижение максимального значения показателя $P_T(\chi_T)$ и времени безотказной работы [3].

Методы оптимизации

Оптимизация комплексного показателя надежности (7) сложна не только как математическая проблема (аналитически определить значения координат x_i, y_i , обеспечивающие максимум надежности, невозможно), но и как вычислительная процедура (расчеты деформаций, напряжений, температур, показателей надежности для сотен и тысяч элементов РЭА).

Программы топологической оптимизации описаны в [1] – для оптимизации надежности при механических воздействиях, и в [3] – при тепловых.

Комплекс таких программ разработан в интегрированной среде **C++Builder**. Алгоритмы оптимизации используют методы СПУИП (случайного поиска с уменьшением интервала поиска) и ОАПП (обобщенного алгоритма переменного порядка) [5]. Целевая функция оптимизации – комплексный показатель надежности $P(\chi)$, т.е. выражение (7).

По методу СПУИП максимум $P(\chi)$ находят последовательными итерациями, генерируя векторы параметров x_{ik} , варьируемые как случайные числа:

$$x_{ik} = x_{imink} + (x_{imaxk} - x_{imink})\eta_{ik}, \quad i = 1, \dots, 2n,$$

где η_{ik} – множитель, создаваемый генератором равномерно распределенных случайных чисел; k – номер итерации.

Реализуемая оптимизация является условной, поскольку значения координат x_{ik} не могут выходить за пределы основания платы. Начальные значения параметров x_{imin}, x_{imax} определяются размерами зоны платы, где устанавливаются элементы электронной структуры. Эти значения изменяются до тех пор, пока не будет получен максимум $P(\chi)$.

Для надежного удержания целевой функции в заданных границах число сгенерированных комплектов x_{ik} (и соответствующих значений $P_k(\chi)$) должно быть достаточно велико: 50 – 80. Алгоритм обеспечивает нахождение глобального максимума для функции $P(\chi)$.

Метод ОАПП при расчете координат новой рабочей точки x_{ik+1} использует информацию не только о значениях самой целевой функции и ограничений значений x_{ik} , но и их производных до четвертого порядка включительно, а также различные итерационные формулы в процессе одномерной оптимизации x_{ik} . Скорость сходимости алгоритма может быть сверхквадратичной и определяется порядком используемых для расчетов производных.

В оптимизационных программах [1,3] основной метод оптимизации – СПУИП; если при оптимизации процесс “расходится”, программа переходит на более сложный метод ОАПП или комбинированные методы [5].

Для топологической оптимизации разработана программа **OptPlat8**. Имитационное моделирование процесса оптимизации конструкций СКМ1 с её помощью показало, что показатели надежности указанных конструкций могут быть существенно повышены.

Выносливость выводов ЭЭС и их паяных соединений в результате параметрически-топологической оптимизации по сравнению с произвольной первоначальной компоновкой ячейки или МСб может быть повышена на 45 – 50 %.

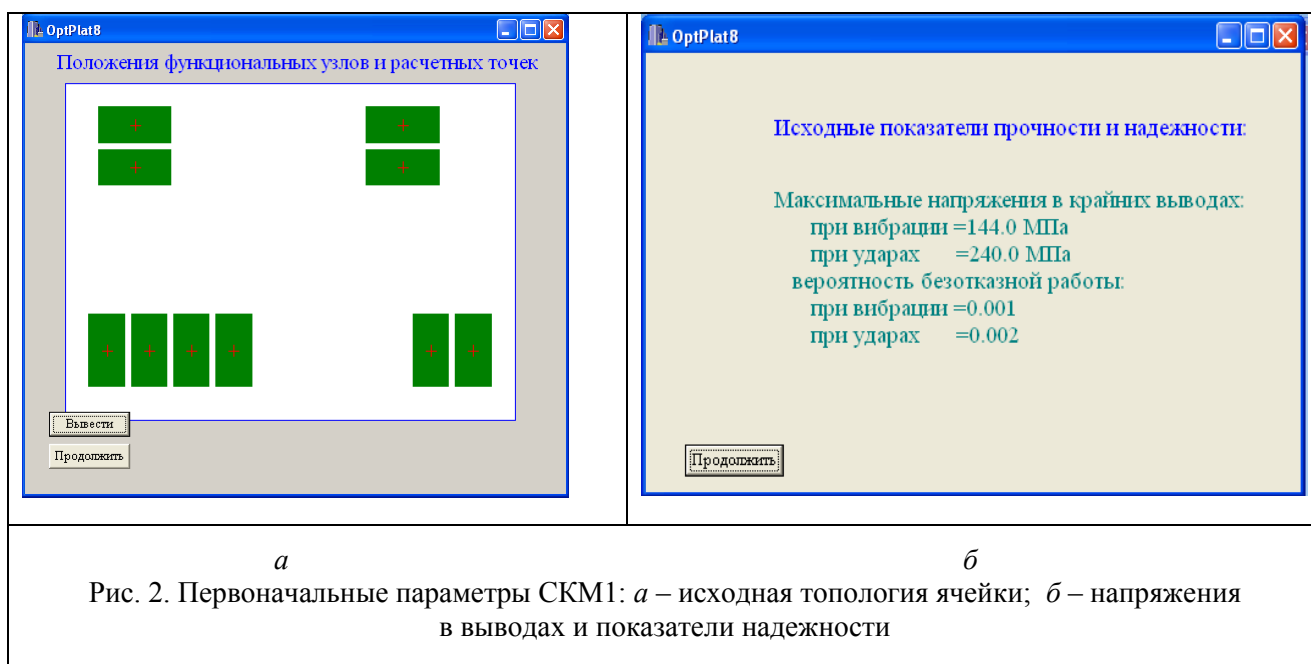
Тепловую надежность структурно-конструктивных модулей РЭА в большинстве случаев можно повысить минимум на 20 – 25 %.

Комплексная оптимизация конструкции по критерию $P(t) = P_m(x_m) \times P_{эл}(x_{эл})$ наиболее эффективна для РЭА с максимальным техническим ресурсом, а определяющими факторами являются вибрационные и ударные нагрузки, в особенности для периода эксплуатации $T_p \leq 3 \cdot 10^4$ ч.

Ниже иллюстрируются результаты комплексной оптимизации на примере СКМ1, на плате которого установлены десять МС. Размеры: платы 160Н100Н2 мм, корпусов МС 26Н13Н4 мм с 40 выводами; выводы МС припаяны к проводникам печатного монтажа.

Параметры дестабилизирующих воздействий: вибрации с частотой $f = 50$ Гц, амплитудой $a = 0,4$ мм (виброперегрузка 4 g); удары длительностью импульса $\tau = 10$ мс, с перегрузкой 8g. Плата закреплена в шести точках – по три вдоль каждой длинной стороны. Охлаждаются плата и МС естественной конвекцией воздухом с температурой 30 °С. Необходимо обеспечить надежную работу СКМ1 на протяжении 10^4 ч.

На рис. 2, а показаны исходные положения корпусов МС (они могут быть произвольными), а в процессе оптимизации будет найдена оптимальная топология, при которой комплексный показатель надежности $P(\chi)$ будет максимальным. При таких первоначальных условиях температуры ЭЭС не превышают допустимых, что дает значение $P_{эл}(x_{эл}) = 1$, поэтому оптимизация должна обеспечить максимальное значение $P_m(x_m)$. Для первоначальной компоновки напряжения в выводах и при вибрационных, и при ударных воздействиях достаточно велики, а комплексный критерий вероятности безотказной работы $P(\chi)$ практически равен нулю (рис. 2, б).



В процессе оптимизации были проведены три итерации (изменения топологии), 148 вычислений функции $P(\chi)$ и получены результаты, иллюстрируемые рис. 3, а, б.

Таким образом, была обеспечена достаточно высокая надежность работы СКМ1.

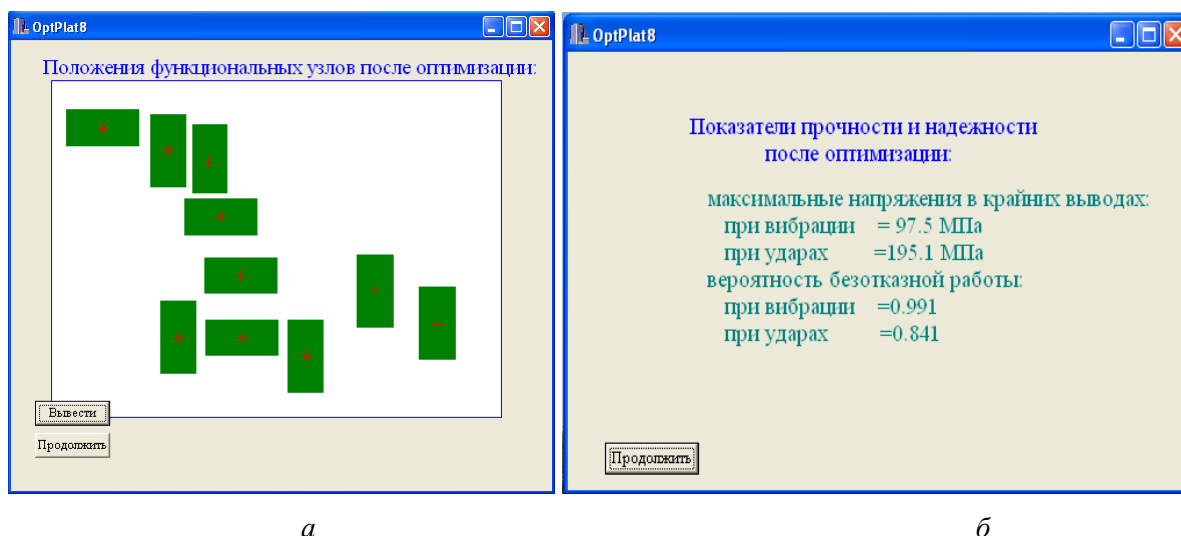


Рис. 3. Полученные оптимизацией параметры СКМ1: а – топология ячейки; б – напряжения в выводах и показатели надежности

Выводы

1. Показатели надежности для РЭА при механических воздействиях определяются выносливостью выводов элементов электронной структуры и их паяных соединений. Для расчета напряжений в выводах, паяных соединениях и связанных с ними показателей надежности необходимы программные средства.

2. При тепловых воздействиях показатели надежности РЭА являются функциями температур элементов электронной структуры. Ввиду сложности математических моделей для температур этих элементов и зависящих от них показателей надежности расчет этих параметров можно проводить эффективно с помощью компьютерных программ.

3. Надежность структурно-конструктивных элементов и всего РЭА можно обеспечить топологической оптимизацией – рациональным размещением элементов электронной структуры на платах ячеек или подложках микросборок.

Список литературы: 1. Уваров, Б.М., Зиньковський, Ю.Ф. Проектування та оптимізація механостійких конструкцій радіо-електронних засобів з імовірнісними характеристиками – К. : Корнійчук, 2011. – 248 с. 2. ДСТУ 2992-96. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності. 3. Уваров, Б.М., Зиньковський, Ю.Ф. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіо-електронних засобів з імовірнісними характеристиками – К. : Корнійчук, 2011. – 201 с. 4. Прытков, С.Ф., Горбачева, В.М., Мартынова, М.Н., Петров, Г.А. Надежность электрорадио-изделий : справочник. – МО РФ и НИИ “Электронстандарт”, 2004. – 620 с. 5. Оптимальное схемотехническое проектирование в машиностроении: Учебное пособие / А.И. Петренко, В.В. Ладогубец, В.В. Чкалов. – К., УМК ВО, 1989. – 164 с.

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

Поступила в редколлегию 15.08.2014