

2. Стандартизація та суміжні види діяльності. Терміни та визначення основних понять: ДСТУ 1.1: 2001. – К.: Держстандарт України. – 2001. – 37 с. 3. Кошева Л. О. Відтворюваність – основна характеристика точності результатів випробувань / Л. О. Кошева // Електроніка та системи управління. – 2011. – №2. – С.43–48. 4. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення: (ISO/IEC 5725-1:1994, IDT): ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-1:2005.– К.: Держспоживстандарт України, 2006.– 31 с. 5. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення: ДСТУ 3021:95. – К.: Держстандарт України. – 71 с. 6. Кошева Л. О. Алгоритм оцінки відповідності стандартизованої методики виконання вимірювань / Л. О. Кошева // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – №4 (12). – С.94–97. 7. Володарский Е. Т. Внутрिलाбораторный контроль качества. Современные подходы / Е. Т. Володарский., Л. А. Кошечая, Н. А. Рековец // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011.– №.3(15). – С.63–68. 8. Кошечая Л. А. Статистические модели результатов измерений, используемые при проведении межлабораторных испытаний / Кошечая Л. А. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009. – №.2(15). – С. 63–68. 9. Володарский Е. Т., Определение показателей промежуточной прецизионности при проведении межлабораторных испытаний / Е. Т. Володарский, Л. А. Кошечая // Системи обробки інформації. – 2009. – вып.6 (80). – С.18–22. 10. Кошева Л. О. Забезпечення правильності результатів клініко-діагностичних досліджень / Л. О. Кошева, О. О. Мішина // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2009. – №3. – С. 44–49. 11. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 6. Використання значень точності на практиці: (ISO/IEC 5725-6:1994, IDT): ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-6:2005.– К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 50 с.

УДК 531/534(075.8)

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Борис Уваров, Юрий Зиньковский

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

Анотація: Розглянуто проблеми, що виникають при проектуванні та оптимізації радіоелектронної апаратури (РЕА) захисту інформації максимальної надійності. Її оптимізація потребує створення об'єктно-орієнтованих програм у складі системи автоматизованого проектування. Описані такі програми та демонструються результати їх застосування при проектуванні РЕА.

Summary: The problems arising at designing and optimization of the radioelectronic equipment (REE) of protection of the information of maximal reliability are considered. Its optimization requires creation of the object-guided programs in structure of systems of the automated designing. Such programs are described and the results of their application are shown at designing REE.

Ключевые слова: Средства защиты информации, оптимизация, программы автоматизированного проектирования.

I Введение

Одной из важнейших особенностей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), используемой как средства технической защиты информации, должна быть надежность, т. к. любой отказ (неработоспособность) какой-либо структурной единицы комплекса может привести или к утечке информации во внешнюю среду, или к проникновению нежелательной информации извне в систему, где информация создается, обрабатывается, накапливается или хранится.

Характеристики надежности такой РЭА должны рассматриваться как необходимые наряду с характеристиками программных средств – в совокупности это показатели качества всего комплекса, обеспечивающего защиту информации. Все упомянутые показатели должны быть максимально высокими, а возможности и средства их достижения необходимо предусматривать уже при проектировании, на стадии создания структурной модели будущего радиоэлектронного средства.

Поэтому в методах проектирования высоконадежной РЭА системы защиты информации должны быть использованы все возможности повышения показателей ее надежности – как программного обеспечения, так и конструкции радиоэлектронных средств (РЭС) в ее составе.

II Методы проектирования РЭС

Проектирование РЭС можно осуществить, например, структурно-оптимизационными методами, когда структурную модель представляют как систему уравнений, которая характеризует все процессы,

протекающие в устройстве, и дает возможность определить как функциональные характеристики, так и методы реализации проектных решений в конструкцию РЭС. Наивысшие показатели качества РЭС достигаются параметрической оптимизацией всех или большинства исходных параметров модели.

Структурная модель РЭС может быть сформирована как система критериальных уравнений, полученных методами теории подобия [1]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{K}_1 &= \phi_{11}K_1 + \phi_{12}K_2 + \dots + \phi_{1n}K_n = \sum_{i=1}^n \phi_{1i}K_i \\ \bar{K}_2 &= \phi_{21}K_1 + \phi_{22}K_2 + \dots + \phi_{2n}K_n = \sum_{i=1}^n \phi_{2i}K_i \\ &\dots \\ \bar{K}_n &= \phi_{n1}K_1 + \phi_{n2}K_2 + \dots + \phi_{nn}K_n = \sum_{i=1}^n \phi_{ni}K_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где K_i – единичные критерии, каждый из которых характеризует какой-либо из протекающих процессов (это могут быть электромагнитные или электрические процессы, процессы теплообмена, поведение структурного элемента РЭС при механических воздействиях и т. п.); \bar{K}_i – т. наз. частичные, связывающие процессы одной природы (например: механические колебания, возникающие в элементах конструкции напряжения, показатели надежности при механических воздействиях, или характеристики процессов теплообмена и т. п.).

Функции ϕ_{ki} – коэффициенты влияния каждого из единичных критериев на соответствующий частичный, а ϕ_i – коэффициенты влияния частичных критериев на комплексный; все коэффициенты влияния могут быть определены методами теории многоцелевой оптимизации [2] или заданы проектировщиком.

Комплексный критерий \bar{K} , или целевая функция (ЦФ) РЭС – это линейная свертка системы (1):

$$\bar{K} = \sum_i \bar{K}_i = \sum_i \sum_k \phi_{ik} K_i \quad (2)$$

В процессе параметрической оптимизации для получения максимального качества РЭС необходимо получить максимальное значение критерия \bar{K} , изменяя параметры величин, входящих в единичные, а, следовательно, и частичные критерии.

В состав частичного критерия \bar{K}_1 , отображающего основные макропоказатели конструкции РЭС, входят единичные критерии K_Q (критерий конструктивного совершенства) и K_{Te} (критерий технологического совершенства) [1]:

$$\bar{K}_1 = \phi_{1V}K_Q + \phi_{1T}K_{Te}.$$

Первый соотносит мощность, необходимую аппарату для реализации его функционального назначения, с его объемом V и массой M . Любой радиоэлектронный прибор для собственного функционирования требует электрической энергии от первичного источника – батареи или электрической сети (если он не питается от внутреннего, входящего в состав самого РЭС), поэтому мощность N , требуемая от источника – один из главных параметров устройства. Часть этой мощности может быть использована для создания потока энергии \bar{N} на выходе из аппарата (для усилителя, передатчика, излучателя и т. п.); для обеспечения функционирования радиоэлектронной структуры используется мощность $N_\phi = N - \bar{N}$, она же будет теряться аппаратом, как тепловые потери в окружающую среду.

Соотношение N_ϕ с объемом и массой аппарата будет показывать совершенство конструктивных решений, обеспечивающих функционирование последнего. Важными показателями для РЭА являются параметрические критерии заполнения объема корпуса k_3 и использования массы k_m ; $k_3 = \bar{V}/V$ – характеристика рациональности компоновки (\bar{V} – объем, занятый электрорадиоэлементами – ЭРЭ и функциональными узлами – ФУ); $k_m = \bar{M}/M$ – характеристика массы радиоэлектронной структуры в аппарате (\bar{M} – масса ЭРЭ и ФУ).

Поскольку критерии качества должны быть безразмерными, критерий конструктивного совершенства РЭС имеет вид [1]:

$$K_Q = \frac{(N - \bar{N})(T_p)^3 k_m (k_3)^{2/3}}{M(V)^{2/3}}, \quad (3)$$

где T_p – технический ресурс (или время безотказной работы) всего аппарата.

Показатели степени для T_p и V обеспечивают безразмерность самого K_Q , а у k_3 и k_m они такие же, как и у параметров, с которыми эти критерии связаны (т.е. V и M). Выражение для K_Q – макропоказатель конструктивной структуры РЭС и технических решений, обеспечивших ее реализацию: чем меньше объем и масса корпуса, в котором осуществляется функционирование радиоэлектронной структуры аппарата, тем

совершеннее конструкция; видно также, какое значительное влияние на качество аппарата имеет показатель надежности T_p .

Технологическое совершенство конструкции может быть оценено основными показателями технологичности: критерием уровня технологичности $K_{рт}$ – по трудоемкости изготовления, и $K_{св}$ – себестоимости; они безразмерны, их можно объединить в один: $K_{Te} = K_{рт} \times K_{св}$.

Механические процессы в системе уравнений (1) отображены частичным критерием \bar{K}_2 [1]:

$$\bar{K}_2 = \phi_{2B_3} K_{B_3} + \phi_{2M} K_{M\Sigma} + \phi_{2P} K_{P\sigma}, \quad (4)$$

где K_{B_3} – коэффициент эффективности виброзащиты (ее можно оценить значениями $K_{\text{эф}} = 1/K_{\text{дин}}$ и $K_{\text{эф}} = 1/K_{\text{кин}}$ ($K_{\text{дин}} > 1$ и $K_{\text{кин}} > 1$), а в зарезонансной – $K_{\text{эф}} = 1 - K_{\text{дин}}$ или $K_{\text{эф}} = 1 - K_{\text{кин}}$ ($K_{\text{дин}} < 1$ и $K_{\text{кин}} < 1$).

В свою очередь, критерии динамического усиления $K_{\text{дин}}$ при силовом возбуждении, передачи $K_{\text{кин}}$ – при кинематическом – функции:

$$K_{\text{дин}} = \frac{s_b}{s_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - \varpi^2]^2 + 4\gamma^2 \varpi^2}}; \quad K_{\text{кин}} = \frac{s_b}{s_o} = \frac{\sqrt{1 + 4\gamma^2 \varpi^2}}{\sqrt{[1 - \varpi^2]^2 + 4\gamma^2 \varpi^2}},$$

где амплитуды перемещений: s_b – вынужденных аппарата, $s_{ст}$ – статических от действия внешней периодической силы, s_o – основания, к которому крепится аппарат; $\varpi = \omega/\omega_o$ – параметрический критерий расстройки (отношение частот – внешнего периодического фактора ω и собственной ω_o объекта); γ – коэффициенты механических потерь в виброизоляторах.

Единичный критерий $K_{M\Sigma}$ отображает использование несущих способностей материалов в деталях конструкции как отношение действующих механических напряжений и их допустимых значений:

$$K_{M\Sigma} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_p}\right)^\beta \cdot \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_{kp}}\right)^\gamma,$$

где α, β, γ – коэффициенты влияния соответствующих напряжений (σ – нормальных, τ – касательных, σ_k – контактных) на прочность конструкции.

Критерий $K_{\text{гс}}$ – показатель надежности конструкции, учитывающий механические напряжения – это, например, вероятность безотказной работы $P_t(\tau)$ элемента конструкции, в котором действующие напряжения σ_e в соответствии с моделью DM –распределения наработки на отказ [3], определяются относительным сроком службы x , зависящим от предела выносливости материала σ_{-1} , показателем кривой усталости m , числами циклов нагружения N_c и базовым N_b :

$$x = \frac{N_c}{N_b} \left[\frac{\sigma_e}{\sigma_{-1}} \right]^m;$$

саму вероятность безотказной работы рассчитывают по формуле:

$$P(x) = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1-x}{\nu \sqrt{2x}} \right) \right],$$

где ν – коэффициент вариации процессов деградации.

Процессы тепломассообмена в системе уравнений (1) отображаются частичным критерием \bar{K}_3 [4]:

$$\bar{K}_3 = \phi_{3T} K_T + \phi_{3P} K_{P_t}, \quad (5)$$

с двумя единичными критериями: критерием теплового режима K_T и тепловой надежности K_{P_t} .

Совершенство поддержания температурных режимов элементов электронной структуры РЭС характеризует тепловой критерий K_T – это отношение абсолютных температур окружающей среды T_o и температур электрорадиоэлементов и электронных функциональных узлов (ЭРЭ и ФУ) $T_{эл}$ ($T_{эл}$ не должны превышать допустимых) [4]:

$$K_T = \frac{T_o}{T_{эл}} = 1 - \frac{N_k}{T_o F_k} \left(\frac{F_k}{k_{эл} F_{эл}} \cdot \frac{N_{эл}}{N_k} + \frac{1}{k_{вн}} + \frac{1}{k_{ст}} + \frac{1}{k_k} \right), \quad (6)$$

где $N_{эл}$ – мощность, выделяемая электронной структурой РЭС; $N_k = N_{эл} + N_{охл}$ – полная мощность, отводимая с поверхности корпуса и учитывающая дополнительную мощность системы охлаждения $N_{охл}$; $F_{эл}$, F_k – поверхности тепловыделяющих элементов и корпуса, соответственно; $k_{эл}$, $k_{вн}$, k_k – критерии теплоотдачи от поверхностей ЭРЭ к внутреннему объему, от последнего к корпусу, от корпуса к внешней среде, соответственно; $k_{ст}$ – коэффициент теплопередачи через стенки корпуса.

Критерий K_{P_t} – показатель надежности элементов электронной структуры: в его роли может использоваться вероятность безотказной работы $P_t(\tau)$. Этот показатель определяют в соответствии с моделью DN –распределения наработки на отказ [3] по уравнению:

$$P(x) = 0,5 \left\{ \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{1-x}{v\sqrt{2x}} \right) \right] + e^{\frac{2}{v^2}} \left[1 + \operatorname{erf} \left(-\frac{1+x}{v\sqrt{2x}} \right) \right] \right\},$$

где $x = \tau/T_p$ – относительный срок службы, T_p – базовая продолжительность безотказной работы ЭРЭ.

После формирования структурной модели (модели нулевого уровня) на последующих этапах проектируют структурные составляющие всего РЭС и определяют их конструктивные параметры, а также рассчитывают основные функциональные характеристики устройства. Это дает возможность рассчитать значения всех единичных, частичных и комплексного критерия \bar{K} . Для достижения наивысших показателей качества – максимума \bar{K} – необходимо последовательными итерациями провести параметрическую оптимизацию изменением значений первичных величин и параметров конструкции в единичных критериях.

III Оптимизация функциональных характеристик РЭС при механических воздействиях

Детальный анализ выражений для частичных и единичных критериев показывает, что конструктивные параметры, входящие в их состав, могут оказывать влияние (иногда существенное) не только на макропоказатели конструктивного совершенства (которые важны для мобильной или установленной на подвижных объектах аппаратуры), но и на показатели надежности всего РЭС.

В состав частичного критерия \bar{K}_2 входит единичный критерий K_{B3} , а значение последнего определяется параметрическим критерием расстройки $\varpi = \omega/\omega_0$. Например, собственная частота печатной платы (ПП) ячейки или подложки микросборки (МСб) РЭС зависит от ее т. н. приведенной массы m , цилиндрической жесткости платы D (последняя определяется механическими свойствами материала платы и ее толщиной), частотной функции $\varphi(\beta)$ (определяемой способом закрепления сторон платы и отношением сторон $\beta = a/b$):

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

Приведенная масса платы [1]:

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

где m_n – масса самой пластины ПП; m_s – суммарная масса ЭРЭ на плате; m_i – массы отдельных ЭРЭ и их координатные функции $w_i(x)$, $w_k(y)$.

Если в процессе оптимизации изменять координаты x и y каждой массы m_i , можно изменить и собственную частоту платы ω_0 . Это бывает необходимо, если нужно вывести плату из резонансной зоны, когда частоты внешних воздействий ω и собственных колебаний ПП ω_0 близки друг к другу. В этой зоне условия работы ячейки или МСб при механических воздействиях наихудшие, т. к. динамические прогибы платы, а следовательно и механические напряжения в выводах ЭРЭ, микросхем (МС), в паяных соединениях максимальны, их целостность может быть нарушена – произойдет отказ. При проектировании стремятся вывести плату из резонансной зоны, и это можно сделать, изменяя координаты установленных на ней ЭРЭ, МС, ФУ, тем самым повысить прочность и выносливость элементов конструкции РЭС.

При уменьшении напряжений в конструктивных элементах возрастает надежность всего РЭС – это дополнительно увеличивает значение критерия K_{P3} .

Таким образом, параметрическая оптимизация изменением только пространственной компоновки позволяет повысить стойкость РЭС к внешним механическим воздействиям, полностью сохраняя первоначально выбранные форму и размеры элементов конструкции, примененные для них материалы. При этом возрастают значения критериев K_{B3} , K_{P3} и объединяющего их частичного критерия \bar{K}_2 .

IV Оптимизация функциональных характеристик РЭС при тепловых воздействиях

Тепловые процессы в системе уравнений (1) отображаются частичным критерием \bar{K}_3 (5), в который входят два единичных – K_T и K_{P1} . Анализ показывает, что тепловой режим ПП и МСб в значительной мере определяется размещением тепловыделяющих элементов (ТВЭ) – ЭРЭ, МС, ФУ – на соответствующем основании.

Стационарный тепловой режим ячейки или МСб (температуры ТВЭ или любой точки с координатами x , y на основании с размерами $a \times b \times h$, с установленными на ней источниками тепла Q_i) может быть рассчитан для подобных структурных единиц РЭС по уравнению [4]:

$$T_{n,m}(x,y) = 8 \sum_{i=1}^k \frac{\text{Bi}}{\alpha} \frac{ab}{h^2} \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^{\infty} K_n^2 K_m^2 \frac{I_n(x_i) I_m(y_i)}{\mu_n^2 \frac{b}{a} + \mu_m^2 \frac{a}{b} + \text{Bi}} \frac{ab}{h^2} \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x\right) \cos\left(\frac{\mu_m}{b} y\right). \quad (7)$$

Это уравнение получено как решение исходного дифференциального уравнения Фурье методом конечных интегральных преобразований, поэтому в него входят корни характеристических уравнений μ_n, μ_m , ядра интегральных преобразований K_n, K_m , функции изменения температуры вдоль соответствующих координат $I_n(x), I_m(y)$; Bi – критерий Био, определяемый коэффициентом теплоотдачи α с плоскостей МСб.

Существенным в этом уравнении является зависимость температур ТВЭ от координат x и y : изменяя последние, можно оптимизировать температурное поле всей МСб – уменьшить температуры. Тем самым увеличивается значение критерия K_T . Дополнительно увеличивается “тепловая” надежность электронных ТВЭ – это влияние отображается критерием K_{Pt} .

Таким образом, оптимизируя компоновку ячейки или МСб, можно увеличить их надежность, не изменяя элементной базы и электрических режимов электронной структуры – эффект, подобный тому, как компоновка повышает надежность РЭС при механических воздействиях.

V Оптимизация показателей надежности аппаратуры защиты информации

Одним из важнейших свойств для аппаратуры защиты информации, иногда определяющими, являются показатели ее надежности. Как показано выше, надежность РЭС и при механических воздействиях, и при тепловых можно повысить оптимизацией компоновки – размещения элементов электронной структуры на основаниях ячеек или МСб.

Однако для достижения оптимальных значений показателей надежности требуются различные компоновки ЭРЭ: одна при действии механических нагрузок (критерий $K_{P\sigma}$), другая – при действии температуры (критерий K_{Pt}). Если же оба показателя надежности для устройства являются определяющими, эти два критерия целесообразно объединить в один $K_{P\Sigma} = K_{P\sigma} K_{Pt}$, и оптимизацию – изменение координат ЭРЭ и ФУ на плате или подложке – проводить до получения максимального значения $K_{P\Sigma}$.

Особенно важна такая оптимизация для проектируемых аппаратных средств систем защиты информации – они все, как правило, должны иметь минимальные массогабаритные характеристики и обладать максимальной надежностью на протяжении длительного периода эксплуатации.

Сущность методов оптимизации обычно сводится к тому, что формируется ЦФ устройства в виде числового показателя и добиваются ее оптимального (минимального или максимального) значения параметрической оптимизацией – изменением влияющих параметров. Для РЭС сформирована ЦФ в виде комплексного критерия \bar{K} , максимума которой и необходимо достигнуть при оптимизации, добиваясь максимальных значений частичных и единичных критериев, в него входящих.

Выше показано, что оптимальная компоновка ячейки РЭС при механических воздействиях получается при оптимизации приведенной массы m , из выражения для которой можно выделить частичную ЦФ, которую и необходимо оптимизировать:

$$F(x_i, y_i) = \sum_{i,k} \frac{m_i w_i^2(x) w_k^2(y)}{ab \int_a^b w_i^2(x) dx \int_b^a w_k^2(x) dy}. \quad (8)$$

Оптимум функции $F(x,y) = \min$, или $F(x,y) = \max$ соответствует условию:

$$\frac{\partial F(x_i, y_i)}{\partial x_i \partial y_i} = \sum_i \frac{\partial F}{\partial x_i \partial y_i} = 0, \quad (9)$$

из которого и находят для всех масс m_i значения координат x_i, y_i , обеспечивающие этот оптимум.

Для реальных конструкций ячеек и МСб размерность функции (8) и соответствующей системы уравнений оптимизации может быть большой: положения каждого ЭРЭ или ФУ на плате задается двумя координатами, для n ФУ число их $2n$ (для пространственной компоновки $3n$), кроме того, координатные функции нелинейны, поэтому аналитические методы оптимизации непригодны.

Так, например, всего для одного ФУ, установленного на подложке МСб, функция (8) будет такой [1]:

$$F(x,y) = m \xi^2(x) \zeta^2(y),$$

где $\xi(x) = \sin(x) + a \cos(x) + b \text{sh}(x) + c \text{ch}(x)$, $\zeta(y) = \sin(y) + a \cos(y) + b \text{sh}(y) + c \text{ch}(y)$, а условия (8) дают систему двух уравнений:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 2\xi(x) \frac{\partial \xi(x)}{\partial x} \zeta^2(y) = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial y} = 2\zeta(y) \frac{\partial \zeta(y)}{\partial y} \xi^2(x) = 0,$$

решить которую аналитически практически невозможно.

Аналогичные проблемы возникают и при оптимизации тепловых режимов, когда частичной ЦФ для

оптимизации будет функция температуры (7), более сложная, чем выражение для приведенной массы (8).

Поэтому нахождение оптимума таких функций может производиться численными методами при помощи программ оптимизации для ПЭВМ. Эти программы должны быть объектно-ориентированными, т. е. создаваться для оптимизации конкретных технических объектов и учитывать соответствующую их специфику, и такие программы необходимо создавать, если они отсутствуют.

VI Программные средства оптимизации

Для параметрической оптимизации конструкции РЭС – достижения максимального значения комплексного критерия \bar{K} и его составляющих \bar{K}_2 , \bar{K}_3 , или критерия K_{PZ} , обеспечивающего максимальные показатели надежности, необходимо создавать т. н. объектно-ориентированные программные комплексы в интегрированных средах, например, в *C++Builder*.

Описания существующих программ и исходные их тексты на языке *C++* приведены в [1, 4].

Основными объектами оптимизации в РЭА должны быть структурно-конструктивные модули первого порядка (СКМ1) – т. н. ячейки и МСб – функционально законченные РЭС, ЭРЭ и ФУ которых размещены на пластмассовой, металлической или керамической печатной плате (ПП). У некоторых РЭС в СКМ1 сосредоточены все электромагнитные или электрические процессы, осуществление которых определяет функциональное назначение устройства; на долю других 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 общем объеме всей разнообразной РЭА СКМ1 составляют не менее 67–85% структурных элементов, поэтому можно считать, что именно они и должны рассматриваться как основные объекты, показатели конструктивного и функционального совершенства которых необходимо достичь в первую очередь, для них и должны прежде всего создаваться методы проектирования оптимальных конструкций.

При механических воздействиях (вибрациях, ударах) необходимо рассматривать три фактора, определяющие надежность СКМ1: механические напряжения в материале основы (ПП или МСб), напряжения в выводах ЭРЭ, МС, ФУ, напряжения в паяных соединениях (ПС) выводов. Все эти напряжения в конечном счете определяются деформациями пластины-основы, а напряжения в выводах и ПС зависят еще и от расположения (компоновки) элементов электронной структуры на основе.

Следовательно, показатели надежности СКМ1 (например, вероятность безотказной работы) должны определяться как результат всех трех вероятностей безотказной работы – материала платы, выводов и ПС.

Программа *OptPlat07* оптимизирует напряжения в материале пластины-основы (платы, подложки), изменяя координаты "навесных" элементов. В качестве показателя оптимальности принята минимальная дисперсия напряжений.

Работа программы демонстрируется на примере размещения на стеклотекстолитовой плате размерами $160 \times 120 \times 1,5$ мм пяти ФУ с массами от 10 до 50 г, а кроме того – равномерно распределенных по всей площади ЭРЭ суммарной массой 50 г. Плата подвергается вибрационным ускорениям с частотой 50 Гц, амплитудой 0,4 мм на протяжении 50 ч; 12000 ударам с перегрузкой 5g; плата оперта всеми четырьмя сторонами. На рис. 1, а показано начальное расположение ФУ на плате, на рис. 1, б – после оптимизации. При этом коэффициенты запаса по напряжениям в материале платы получены: до оптимизации – при вибрации 4,7, при ударах 4,3; после оптимизации – при вибрации 14,3, при ударах 12,3. Таким образом, выносливость материала путем рациональной компоновки ФУ увеличена ~ в 3 раза.

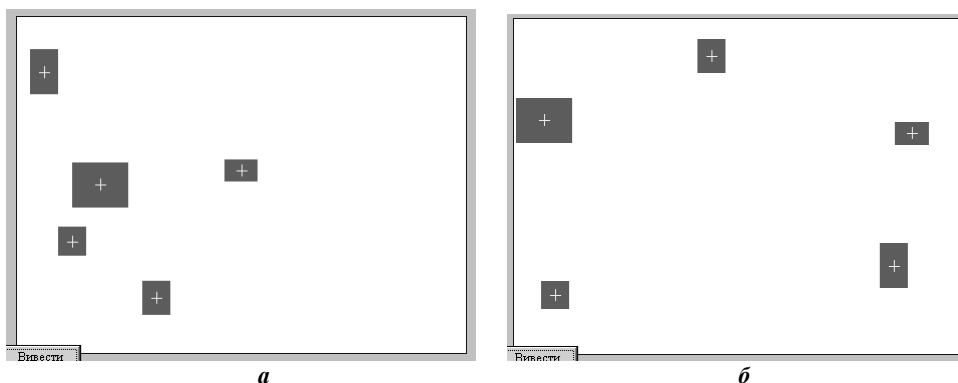


Рисунок 1 – Размещение ФУ на плате

а – исходное положение; б – после оптимизации

Программа *OptPIVuv7.1* позволяет найти оптимальную компоновку МС на плате, обеспечивая минимальные напряжения в их выводах и максимальную надежность всей ячейки, причем учитываются и напряжения в материале платы. В качестве примера рассмотрена плата размерами 160×120×2 мм, на которой установлены четыре МС в стандартных корпусах 4122.40-2, у каждого из которых 2×20 = 40 Г-образных выводов. Первоначальное положение МС – произвольное (оно все равно будет изменено программой на оптимальное), приведено на рис. 2, а, а после оптимизации – на рис. 2, б. Механические воздействия: вибрации с частотой 70 Гц, амплитудой 0,1 – 0,15 мм на протяжении 10 часов, 12000 ударов с перегрузкой 3g; плата заземлена всеми сторонами. Результаты оптимизации: вероятность безотказной работы выводов до оптимизации – при вибрации 0,1, при ударах 0,01; после оптимизации – при вибрации 0,989, при ударах 0,964; т. е. оптимизация позволяет получить достаточно надежную конструкцию (первоначально – непригодную для работы).

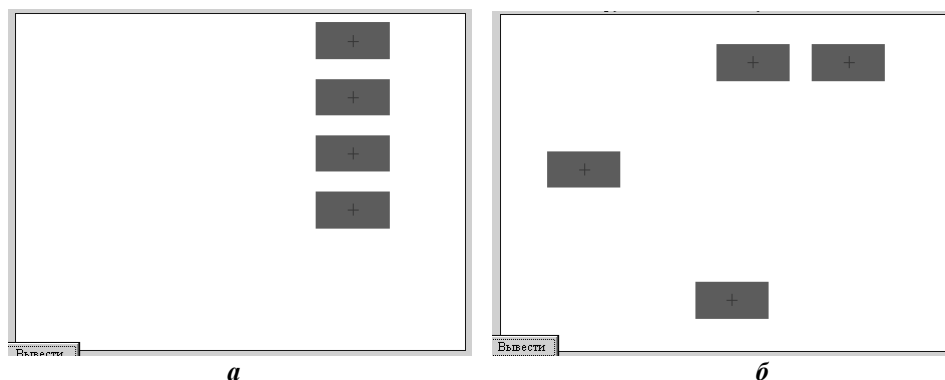


Рисунок 2 – Размещение корпусов МС на плате при оптимизации выводов
а – исходное положение; б – после оптимизации

Программа *OptPIVuv7.2* оптимизирует размещение МС на плате, обеспечивающее максимальную надежность нахлесточных ПС, которыми присоединяются к печатным проводникам выводы МС. Рассматривалась плата из предыдущего примера, отличие – плата закреплена в четырех вершинах. Положения МС до и после оптимизации показаны на рис. 3, а, б. Результаты оптимизации: вероятность безотказной работы выводов до оптимизации – при вибрации 0,858, при ударах 0,972; после оптимизации – при вибрации 0,994, при ударах 1,0; т. е. оптимизация позволяет получить практически надежную конструкцию.

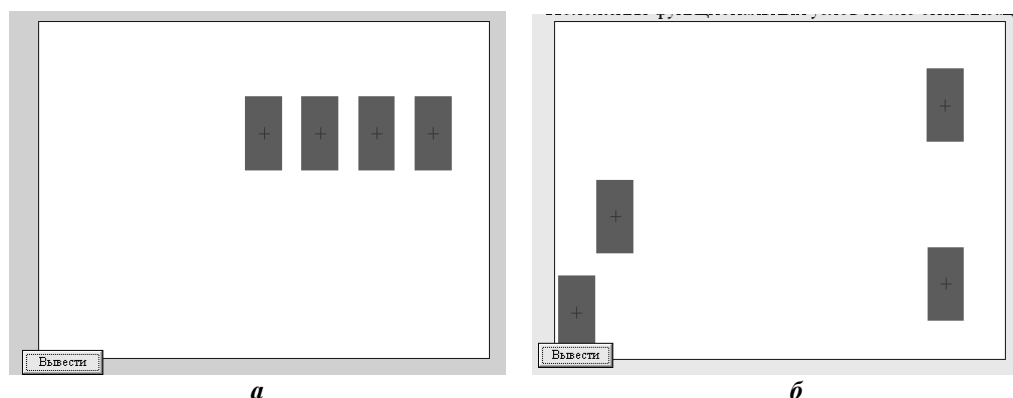


Рисунок 3 – Размещение корпусов МС на плате при оптимизации ПС
а – до оптимизации; б – после нее

Надежность СКМ1 при тепловых воздействиях также может быть оптимизирована рациональным размещением ТВЭ – для этого следует применить программу *OptPlat6* [4]. Она обеспечивает получение такой компоновки ТВЭ на плате, при которой их температуры будут минимальны. Оптимизация проводится до получения максимальной вероятности безотказной работы электронных компонентов СКМ1. В качестве примера рассмотрена стеклотекстолитовая ПП размерами 220×160×2 мм, на которой установлены восемь ФУ с тепловыделениями от 1 до 2 Вт (это МС), с коэффициентами электрической нагрузки (по мощности) от 0,5

до 1. Плата и ТВЭ охлаждаются воздушной средой с температурой 30°C, режим охлаждения – естественная конвекция.

Имитационное моделирование тепловых режимов с помощью программы показало, что для реальных температурных режимов СКМ1 (когда температуры всей конструкции не превышают ~ 100°C) температуры ЭРЭ практически не влияют на показатели надежности РЭС в пределах сроков службы $(1...2) \cdot 10^4$ ч, существенное снижение надежности начинается после $\sim 5 \cdot 10^4$ ч, поэтому для рассматриваемого примера вероятность безотказной работы ТВЭ рассчитывалась для периода $1,2 \cdot 10^5$ ч.

Результаты работы программы – изменение компоновки – иллюстрирует рис. 4.

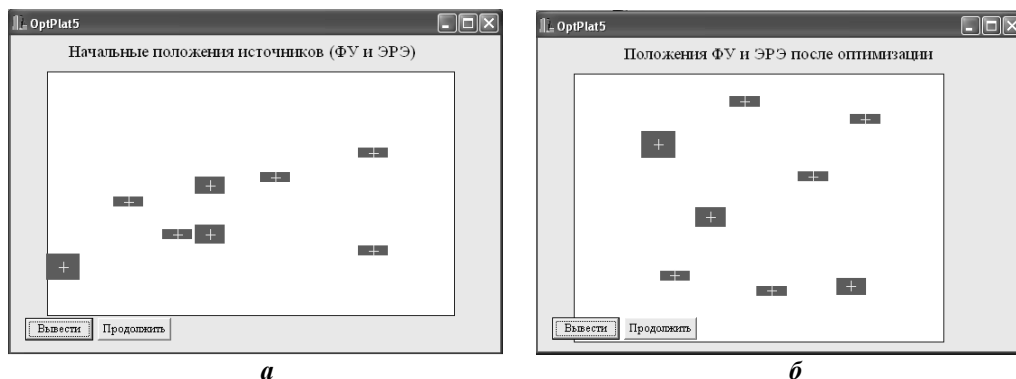


Рисунок 4 – Размещение ТВЭ на плате при оптимизации температур
***a* – до оптимизации; *б* – после нее**

Для исходной компоновки вероятность безотказной работы составляла $P(\tau) = 0,223$, после оптимизации $P(\tau) = 0,271$, т. е. увеличилась на 22,4%.

VII Выводы

1. Сформулировано положение о том, что для достижения наивысших показателей качества радиоэлектронного аппарата должны быть разработаны методы проектирования, позволяющие сформировать оптимальную структуру будущего устройства в виде целевой функции – системы уравнений, описывающих основные функциональные свойства РЭС и их взаимосвязи.

2. Предложено систему уравнений целевой функции РЭС получать с помощью методов теории подобия в виде безразмерных критериальных уравнений. Система содержит как единичные, так и частичные критерии, описывающие основные процессы, протекающие в РЭС – электрические, механические, тепловые. Целевая функция должна быть выражена числовым показателем – комплексным критерием, оптимизация которого обеспечивает наивысшие показатели качества проектируемого объекта.

3. Отмечено, что параметрическая оптимизация ЦФ представляет собой задачу большой размерности (число варьируемых параметров может достигать сотен и тысяч), а для этого необходимы эффективные методы условной оптимизации и вычислительная техника (ЭВМ, ПЭВМ) большой мощности (быстродействия).

4. Показано численным моделированием, что рациональная компоновка ЭРЭ, МС, ФУ на основании печатной платы или подложки микросборки может в ряде случаев повысить вероятность безотказной работы РЭС при механических воздействиях на 45 – 50%, а при тепловых – на 20 – 35%; в результате параметрической оптимизации топологии конструктивных модулей с указанными элементами будет получена максимальная надежность конструкции РЭС.

5. Приведены примеры оптимизации конструкции РЭС с помощью разработанных программ автоматизированного проектирования и оптимизации.

Литература: 1. Уваров Б. М., Зиньковский Ю. Ф. *Проектування та оптимізація механостійких конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками.* – К.: "Корнійчук", 2011. – 248 с. 2. Хоменюк В. В. *Элементы теории многоцелевой оптимизации.* М.: Наука, 1983. – 124 с. 3. ДСТУ 2862-94. *Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги.* 4. Уваров Б. М., Зиньковский Ю. Ф. *Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками.* – К.: "Корнійчук", 2011. – 204 с.