

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТОРЫХ ПРЕДСТАВЛЕНЫ ОПЕРАТОРАМИ С ВЕРОЯТНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

OPTIMIZATION OF RADIOELECTRONIC DEVICES, WHICH FUNCTIONAL CHARACTERISTICS ARE SUBMITTED BY THE OPERATORS WITH PROBABLE BY PROPERTIES

Ю. Ф. Зиньковский, Б. М. Уваров

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Abstract

The problems of representation and optimization of radio-electronic devices functional characteristics are considered during designing by the operators with probability properties. Were developed and offered the programs of automated designing allowing to receive maximal reliability of the device in conditions of influence of external mechanical and thermal factors.

Keywords: the radioelectronic equipment, functional characteristics, automated designing.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В соответствии с функциональным назначением каждое РЭС проектируется, как технический объект с рабочими характеристиками, которые можно представить множеством физических величин z_i , а их совокупность – оператором

$$\mathbf{Z} = [z_1, z_2 \dots z_i \dots z_n]^T. \quad (1)$$

При функционировании РЭС в нем осуществляются процессы, результатами которых должны быть выходные характеристики y_i , а их совокупностью будет оператор

$$\mathbf{Y} = [y_1, y_2 \dots y_i \dots y_n]^T. \quad (2)$$

Каждый оператор $\mathbf{Y}$ можно представить как результат:

- входных воздействий

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2 \dots x_j \dots x_m]^T, \quad (3)$$

- внутренних процессов

$$\mathbf{P} = [p_1, p_2 \dots p_k \dots p_l]^T, \quad (4)$$

- внешних воздействий

$$\mathbf{Q} = [q_1, q_2 \dots q_r \dots q_s]^T. \quad (5)$$

Следовательно, операторное изображение состояния РЭС в процессе функционирования представляется уравнением $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}, \mathbf{P}, \mathbf{Q})$, а все особенности этого процесса и самого объекта определяются из уравнений (2)...(5),

детализированных до соответствующего уровня с помощью методов системного анализа.

Функциональные характеристики РЭС – это различные операторы $\mathbf{Z}_v$, а комплексная функция всего устройства – функционал

$$\mathcal{F} = [\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2 \dots \mathbf{Z}_v \dots \mathbf{Z}_w]^T.$$

Особенность операторов $\mathbf{Y}$, $\mathbf{Z}$ и функционала $\mathcal{F}$ в реально функционирующем РЭС в том, что все они не являются детерминированными – каждый из них всегда имеет отклонения от номинальных значений и должен рассматриваться как случайная функция, находящаяся в границах рассеяния.

Методы проектирования РЭС как сложной иерархической системы взаимосвязанных компонентов должны соответствовать сути процессов, осуществляемых в нем при функционировании, изображаемых операторами $\mathbf{Y} = [y_1, y_2 \dots y_i \dots y_n]^T$.

В связи с этим возникает проблема создания методов проектирования и оптимизации РЭС, у которых функциональные характеристики – операторы с вероятностными показателями, а также определения последних для устройств, уже материализованных в виде конкретных конструкций.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ В РЭС

Начальный этап проектирования РЭС – создание математических моделей для процессов, представляемых операторами Y, Z и функционалом $\mathcal{F}$.

Основные процессы в РЭА: электромагнитные; теплопереноса; механические; ионизационные; информационные.

Необходимые функциональность и надежность изделия могут быть получены лишь комплексным одновременным учетом всех указанных процессов как подмножества взаимосвязанных явлений, устанавливающих влияние каждого из них на выходные системные параметры изделия.

Общие закономерности преобразования форм энергии целесообразно получить, используя принцип наименьшего действия Остроградского для вариаций кинетической энергии δT и обобщенной работы δA в виде:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} (\delta T + \delta A) d\tau = 0. \quad (6)$$

Если вариация элементарной работы δA равна вариации потенциальной энергии δP для консервативных систем, уравнение (6) преобразуется в выражение принципа Гамильтона:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} (\delta T - \delta P) d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\delta L) d\tau = \delta \int_{\tau_1}^{\tau_2} (L) d\tau = 0, \quad (7)$$

где $L = T - P$, или функция Лагранжа (лагранжиан).

Для системы объектов интеграл

$$S = \int_{\tau_1}^{\tau_2} L d\tau \quad \text{– действие по Гамильтону –}$$

Остроградскому, должен принимать минимальное значение на достаточно малом отрезке времени $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$

$$S = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (L) d\tau \rightarrow \min. \quad (8)$$

Использование выражений (6)...(8) для нахождения характеристик реальных энергетических процессов приводит к основной задаче вариационного исчисления: нахождения неизвестных скалярных функций $z_i(x, y)$, реализующих максимум или минимум определенных интегралов системы n функций $z_1(x, y), z_2(x, y), \dots, z_n(x, y)$ [1]:

$$I[z(x, y)] = \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} F[x, y, z, z'(x), z'(y), z''(x), z''(y)] dx dy. \quad (9)$$

Каждая из скалярных функций $z_i(x, y)$ в выражении функционала (9) должна удовлетворять системе дифференциальных уравнений Эйлера:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial y'_i} \right) - \frac{\partial F}{\partial y_i} = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Уравнения (6)...(10) отображают фундаментальную природу любого энергетического (в том числе и информационного) процесса и могут быть применены для определения его параметров, если найдены выражения для функций силовых факторов, кинетической и потенциальной энергий, присущие этому процессу.

Для электромагнитных процессов из (10) получают известные уравнения Максвелла для среды [2]:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial \tau}; \quad \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau};$$

$$\text{div } \vec{B} = 0; \quad \text{div } \vec{D} = \rho;$$

где векторы: $\vec{H}$ – магнитной напряженности, $\vec{j}$ – плотности тока, $\vec{D}$ – электрической индукции, $\vec{E}$ – электрической напряженности, $\vec{B}$ – магнитной индукции; ρ – плотность зарядов; τ – время.

Для процессов в электрических цепях соответствующие уравнения получают в виде [3]:

– для последовательного контура

$$L \frac{d^2 q_c}{d\tau^2} + R \frac{dq_c}{d\tau} + \frac{q_c}{C} = E(\tau); \quad (11)$$

– для параллельного контура

$$C \frac{d^2 U}{d\tau^2} + \frac{1}{R} \frac{dU}{d\tau} + \frac{U}{L} = \frac{di}{d\tau}; \quad (12)$$

где E – электродвижущая сила источника тока; U – напряжение; i – ток; L – индуктивность; R – сопротивление; C – емкость.

Математическая модель нестационарного процесса распространения тепла кондукцией в элементах конструкций РЭС (например, в печатных платах или подложках микросборок), которая также может быть получена из (10) – уравнение теплопроводности [4]:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} + \frac{Q(x, y, \tau)}{\lambda}, \quad (13)$$

где $T(x, y, \tau)$ – температура в точке пластины с координатами x, y в момент времени τ ; $Q(x, y, \tau)$ – мощность источника тепла; a и λ – коэффициенты температуро и теплопроводности.

Механические колебательные процессы в конструкциях РЭС описывают уравнениями, которые также могут быть получены из (10). Так, например, динамические прогибы $w(x, y, \tau)$ пластины (печатной платы) в точке с координатами x, y при кинематическом возбуждении смещением опор $z_o(\tau)$ [5]:

$$m \frac{\partial^2 w(x, y, \tau)}{\partial \tau^2} + D(1 + j\gamma) \times \left[\frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial y^4} \right] = m z_o(\tau), \quad (14)$$

где m – приведенная масса пластины; D – цилиндрическая жесткость; γ – коэффициент механических потерь материала; j – мнимая единица.

Решения уравнений (11) – (14) позволяют получить формулы для расчета необходимых параметров конструкции, а также и функциональных характеристик РЭС в виде операторов Y , Z и $\mathcal{F}$, если известны значения первичных параметров, входящих в эти уравнения – свойств конструкционных материалов, электрических параметров элементов, внешних воздействий.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ПРИРОДА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭС

Источником вероятностных свойств характеристик РЭС прежде всего должны быть свойства конструкционных материалов, значения которых должны иметь некоторое рассеяние, вызванное нестабильностью химического состава, особенностями технологического процесса получения материала, методами экспериментальных измерений свойств последнего. В большинстве случаев допуски на рассеяние характеристик электро и радиотехнических материалов неизвестны; повидимому, можно считать, что они не превышают $\pm 5\%$.

Значения параметров электрорадиоэлементов (ЭРЭ) – сопротивления, емкости, индуктивности и т.п., характеристики активных элементов (полупроводниковых приборов – ППП, микросхем – МС) также приводятся в технических условиях с допусками, иногда значительными. Для сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов допуски составляют $\pm 5, 10, 20\%$; на температурный коэффициент емкости конденсаторов допуски могут превышать $\pm 40\%$. Также достаточно велики допуски на параметры ППП и МС.

Поэтому операторы P (математические модели внутренних процессов), зависящие от свойств материалов и параметров ЭРЭ, должны определяться как вероятностные функции и характеризоваться соответствующими вероятностными или числовыми (невероятностными) показателями.

Параметры внешних факторов (температуры, механические воздействия и др.), влияющие на внутренние процессы в РЭС – операторы Q – также никогда не являются детерминированными, не остаются стабильными и всегда изменяются в некоторых пределах, т.е. являются случайными функциями.

Наиболее стабильными можно считать управляющие воздействия X , но и они в большинстве случаев имеют вероятностную природу. Так, например, если управляющий сигнал формируется человеком оператором, этот последний всегда подвержен в той или иной степени влиянию окружающей среды, параметры которой могут иметь случайный характер, а это приведет к рассеянию значений управляющих воздействий. Если же управляющий сигнал сам формируется техническим устройством (например, управляющим комплексом технологического процесса), то он также будет случайной величиной или функцией.

Таким образом, методика расчета значений функциональных характеристик РЭС – операторов $Y = Y(X, P, Q)$ – при проектировании должна учитывать их вероятностную природу.

Числовые характеристики операторов Y (моменты соответствующих порядков – математическое ожидание, дисперсию и т.д.) как случайных функций операторов X, P, Q

можно определить, например, таким образом. Предположим, что вероятностные характеристики каждого из операторов X, P, Q в составе оператора Y определены на основе имеющихся статистических данных или заданы, т.е. известны их условные плотности распределения $f_X = f(x_1, \dots, x_m), f_P = f(p_1, \dots, p_l), f_Q = f(q_1, \dots, q_s)$, а сами операторы X, P, Q независимы – в большинстве практических случаев последнее условие выполняется.

По аналогии с характеристиками случайных величин, для функционального оператора Y числовые характеристики:

плотность распределения:

$$f_Y = f_X f_P f_Q;$$

математическое ожидание:

$$m_Y = M[\varphi(X, P, Q)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(X, P, Q) f_Y dx dp dq; \quad (14)$$

дисперсия:

$$D_Y = D[\varphi(X, P, Q)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\varphi(X, P, Q) - m_Y]^2 f_Y dx dp dq. \quad (15)$$

В действительности задача определения числовых характеристик функциональных показателей проектируемого РЭС может оказаться более сложной по следующим причинам:

- функции $Y = Y(X, P, Q)$ могут быть достаточно сложными;

- операторы P, Q могут быть зависимыми.

При этом могут появиться трудности вычислительного характера расчета значений интегралов в формулах (14), (15). Такие расчеты обычно проводят с помощью математических пакетов (например, *MatCad*), однако для интегралов большой кратности или для сложных математических выражений операторов Y результат получить не всегда удается.

В этом случае дисперсию D_Y следует вычислять с учетом коэффициентов влияния дисперсий и нелинейности функции $\varphi(X, P, Q)$:

$$k_{Yx} = \frac{\partial \varphi}{\partial X}; \quad k_{Yp} = \frac{\partial \varphi}{\partial P}; \quad k_{Yq} = \frac{\partial \varphi}{\partial Q};$$

$$D_Y = \sum_i \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \Phi_i} \right)_i^2 D_{\Phi_i} + 0,5 \sum_i \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \Phi_i^2} \right)_i^2 D_{\Phi_i}^2 + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \Phi_i \partial \Phi_j} \right), \quad (16)$$

где Φ_i – операторы X, P, Q .

Коэффициенты влияния k_{Yi} при невозможности аналитического их определения, также как и дисперсия D_Y по уравнению (16), могут быть рассчитаны численными методами, но для этого, скорее всего, потребуется создать специальную программу.

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЭС

Сложность современных РЭС постоянно увеличивается, но одновременно повышаются требования к показателям качества РЭС – функциональным, техникоэкономическим, надежности в усложняющихся условиях эксплуатации. Поэтому методы проектирования должны обеспечить достижение наивысшего – оптимального для данных условий – уровня качества будущего РЭС, что можно выразить условием

$$\Delta Z = |Z - Z_P| \rightarrow \min.$$

Системный анализ структуры РЭА показывает, что основные составляющие конструктивной сложности любого РЭС – конструктивные модули первого – СКМ1 (ячейки и микросборки – МСб) и второго – СКМ2 (блоки) уровней. В общем объеме всей РЭА не менее 67–85% структурных элементов – СКМ1. Уровень конструктивной сложности МСб и ячейки практически одинаков: основой каждой из них является пластмассовая, металлическая или керамическая плата, на которой установлены ЭРЭ, МС, от которых нужно отводить тепло; МСб и ячейки необходимо защищать от механических воздействий, а некоторые экранировать.

Для рассмотренных конструктивных модулей главные дестабилизирующие влияния, могущие привести к отказам от выполнения функционального назначения – механические и тепловые (внешние и внутренние). Внешние механические – вибрации, удары – приведут к появлению внутренних напряжений в элементах конструкции, ЭРЭ и МС; тепловые – к повышению температур ЭРЭ и МС вследствие внутреннего тепловыделения в них и влияния темпе-

ратуры внешней среды; все это отобразится на показателях надежности РЭС.

Аналогичные требования предъявляются к блокам РЭС, в составе которых объединены несколько СКМ1; корпус блока должен обеспечить защиту СКМ1 от вибрационных и ударных воздействий.

Системный анализ конструктивных особенностей структурных модулей первого и второго уровней РЭА приводит к выводам:

- оптимизировать нужно в первую очередь конструкции СКМ1 и СКМ2;
- оптимизация должна обеспечить максимальную прочность и выносливость элементов конструкции, ЭРЭ и МС, и тем самым повысить показатели надежности, связанные с механическими напряжениями;
- оптимизация должна максимально снизить температуры ЭРЭ и МС, и тем самым повысить показатели надежности, связанные с температурами;
- комплексными показателями качества, максимальные значения которых необходимо получить в процессе оптимизации, могут быть показатели надежности (вероятность безотказной работы, срок службы, технический ресурс), которые одновременно учитывают влияние и механических, и тепловых факторов.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЭС

Механическая стойкость конструкции СКМ1 определяется уровнем механических напряжений, причем анализ показывает, что наиболее нагруженные элементы РЭС – выводы ЭРЭ и МС, и их паяные соединения [6]. Для уменьшения напряжений в них необходимо стремиться к обеспечению минимальных динамических деформаций (прогибов плат и, как следствие, угловых деформаций в местах выводов и паяк) при воздействии вибраций и ударов. Деформации платы с размерами $a \times b$, полученные как результат решения уравнения (14):

$$w(x, y) = \sum_i \sum_k z_o K R_z w_i(\xi) w_k(\vartheta), \quad (17)$$

где K – коэффициент, учитывающий характер закрепления сторон; $w_i(\xi), w_k(\vartheta)$ – т.наз. базисные функции относительных координат $\xi = x/a, \vartheta = y/b$ [5].

Коэффициент передачи R_z зависит от соотношения частот внешнего возбуждения ω_z и собственной ω_0 – коэффициента расстройки $\varpi = \omega_z/\omega_0$:

$$R_z = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2 \varpi^2}}{\sqrt{(1 - \varpi^2)^2 + \gamma^2 \varpi^2}}; \quad (18)$$

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

– функция, учитывающая соотношение сторон платы $\beta = a/b$ и характер закрепления сторон; m – приведенная масса платы [5]:

$$m = m_n + \sum_{i,k} \frac{m_i w_i^2(\xi) w_k^2(\vartheta)}{ab \int_a^b w_i^2(\xi) d\xi \int_b^a w_k^2(\vartheta) d\vartheta}, \quad (19)$$

где m_n – масса самой платы.

Анализ связей величин в формулах (17) – (19) показывает, что минимум линейных и угловых деформаций платы может быть достигнут изменением координат ξ_i и ϑ_i для каждой массы m_i – этим можно оптимизировать механическую стойкость СКМ1, а в качестве показателя оптимальности принять вероятность безотказной работы $P_1(\tau)$, как функцию, зависящую от действующих в выводах ЭРЭ, МС, их паяных соединениях механических напряжений. Эта функция может быть рассчитана по стандартной методике на основе модели деградации, соответствующей DM распределению (диффузионному монотонному).

Уравнение для расчета температур отдельных источников тепла q_i (ЭРЭ), установленных на плате СКМ1, полученное методом конечных интегральных преобразований, как решение уравнения (13), имеет вид (20) [7], где K_n, K_m – ядра интегральных преобразований; I_n, I_m – функции распределения температур в продольном и поперечном направлениях; V_i – критерии Био, характеризующие теплоотдачу с поверхностей платы; μ_n, μ_m – корни характеристических уравнений.

$$T(x, y) = 16 \sum_{i=1}^k \frac{Bi}{\alpha} \frac{ab}{h^2} \frac{q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} K_n^2 K_m^2 \times \\ \times \frac{I_n(\xi) I_m(\vartheta)}{\mu_n^2 \frac{b}{a} + \mu_m^2 \frac{a}{b} + Bi \frac{ab}{h^2}} [\mu_n \cos(\mu_n \xi) + Bi_1 \sin(\mu_n \xi)] \times \\ \times [\mu_m \cos(\mu_m \vartheta) + Bi_2 \sin(\mu_m \vartheta)]. \quad (20)$$

Температурное поле платы можно оптимизировать изменением координат ξ и ϑ отдельных ЭРЭ. Показателем оптимальности в этом случае можно принять вероятность безотказной работы $P_2(\tau)$, как функцию, зависящую от температур ЭРЭ и МС. Ее рассчитывают по стандартной методике на основе модели деградации, соответствующей DN -распределению (диффузионному немономонному).

Следовательно, максимума и механической, и тепловой стойкости элементов электронной структуры СКМ1 можно достичь параметрической оптимизацией – одновременным изменением координат расположения на плате ЭРЭ, МС, функциональных узлов (ФУ), если в качестве комплексного показателя оптимальности принять вероятность безотказной работы СКМ1, полученную как произведение частных показателей:

$$P(\tau) = P_1(\tau) \cdot P_2(\tau).$$

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ

Программы (программные модули) для систем автоматизированного проектирования и оптимизации функциональных показателей СКМ1 в соответствии с рассмотренными выше принципами описаны в [6,7,8].

Программа **OptPIVuv7** производит оптимизацию размещения МС на плате СКМ1, обеспечивая минимум напряжений в выводах и паяных соединениях, т.е. достижение максимального значения вероятности $P_1(\tau)$. Эксплуатация программы показала, что увеличение надежности для оптимального размещения МС по сравнению с произвольным первоначальным может достигать 15-20%.

Программа **OptPlat6** предназначена для оптимизации температур ЭРЭ, МС, ФУ и увеличения вероятности $P_2(\tau)$ СКМ1. С помощью ее надежность повышалась на 8-15%.

Программа комплексной оптимизации **OptPlat8** обеспечивает снижение механических напряжений в выводах, паяных соединениях и одновременно температур ЭРЭ, МС, ФУ.

ВЫВОДЫ:

- показано, что функциональные характеристики РЭС представляют собой взаимно коррелированные функции высокой сложности с вероятностными свойствами;
- показано, что все показатели прочности, выносливости, тепловых режимов, надежности структурноконструктивных модулей (СКМ) РЭС должны при проектировании рассматриваться как случайные;
- разработаны программы автоматизированного проектирования и оптимизации, позволяющие получить конструкцию СКМ максимальной надежности в заданных условиях эксплуатации при воздействии внешних механических и тепловых факторов;
- установлено имитационным моделированием, что доминирующими факторами, определяющими надежность структурноконструктивных модулей РЭС для периода эксплуатации $T_p \leq 3 \cdot 10^4$ ч, являются механические – вибрации и удары, а тепловые режимы играют второстепенную роль.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1982. – 424 с.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — Издание 7-е, исправленное. — М.: Наука, 1988. — 512 с.
- [3] Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1982. – 624 с.
- [4] Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1978. – 480 с.
- [5] Бабаков И.М. Теория колебаний: Учеб. Пособие для студентов втузов. — М.: Наука, 1968. — 560 с.
- [6] Уваров Б.М., Зиньковский Ю.Ф. Проективання та оптимізація механостійких конструкцій радіоелектронних засобів з імовірносними характеристиками — Луганськ, ЛНПУ, 2010. — 201 с.
- [7] Уваров Б.М., Зиньковский Ю.Ф. Оптимізація стійкості до теплових впливів конструкцій радіо-електронних засобів з

імовірносними характеристиками –
Луганськ, ЛНПУ, 2010. – 190 с.

- [8] Оптимальное схмотехническое проектирование в машиностроении: Учебное пособие / А.И. Петренко, В.В. Ладогубец, В.В. Чкалов. – К., УМК ВО, 1989. – 164 с.