

Д. т. н. Б. М. УВАРОВ, д. т. н. Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: kyivbmu@ukr.net

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ТОПОЛОГИИ

Рассмотрены проблемы определения параметров надежности конструкций радиотехнических устройств в условиях воздействия механических и термических (внешних и внутренних) факторов, предложены методы расчета этих параметров для блоков, ячеек, микросборок. Предложены методы достижения максимальных значений показателей надежности с помощью топологической оптимизации конструкции.

Ключевые слова: радиотехническое устройство, механические воздействия, тепловой режим, параметрическая оптимизация, надежность, компьютерные программы.

Большинство радиотехнических устройств (РТУ) в процессе эксплуатации подвержены различного рода воздействиям. Анализ влияния на показатели надежности внешних дестабилизирующих факторов, таких как механическое воздействие, температура, влажность, ионизирующее излучение и другие, показывает, что в процессе эксплуатации РТУ число отказов, вызванных механическим и тепловым воздействием, составляет 70–80%. Поэтому для оценки надежности РТУ необходимы комплексные показатели, учитывающие влияние обоих этих факторов (внешних и внутренних), и проектирование оптимального РТУ должно проводиться таким образом, чтобы в реальном устройстве эти комплексные показатели были наивысшими.

Влияние внешних механических факторов — линейных ускорений, вибраций, ударов — приводит к возникновению в элементах конструкции РТУ, выводах элементов электронной структуры, паяных соединениях этих выводов усталостных механических напряжений и, в конечном счете, к нарушениям электрических контактов и отказам аппаратуры [1].

Показатели надежности, связанные с механическими напряжениями, определяются в соответствии со стандартами [2].

Внешние тепловые воздействия и внутренние тепловыделения в элементах электронной структуры РТУ приводят к повышению температуры этих элементов, вследствие чего снижается не только их надежность, но и устройства в целом. Методы определения температуры электрорадиоэлементов (ЭРЭ) рассмотрены в [3], а показателей их надежности, связанных с температурой — в [2].

Как показывает анализ, компоновка РТУ (блока, ячейки, микросборки) существенно

влияет на показатели как «механической», так и «тепловой» надежности [1, 3]. Поэтому при проектировании возникает проблема оптимальной компоновки РТУ, при которой могут быть обеспечены наилучшие показатели надежности всего устройства.

В настоящей работе предложены методы определения комплексных показателей надежности РТУ, а также методы оптимизации компоновки ячеек и микросборок, обеспечивающие наивысшие показатели надежности устройств при их эксплуатации.

Надежность ячейки при механических воздействиях

Основными причинами отказов ячеек РТУ при циклических воздействиях (вибрациях и ударах) являются нарушения целостности выводов микросхем (МС), микросборок (МСБ), функциональных узлов (ФУ), ЭРЭ и их паяных соединений вследствие усталостных напряжений [1].

Напряжения в выводах возникают в основном от изгиба платы-основы под действием механических воздействий. Эти деформации зависят от способа закрепления вершин или сторон платы. В паяных соединениях выводов появляются касательные напряжения сдвига, которые могут привести к нарушению электрического контакта в соединении.

В [1] приведены методы расчета деформаций плат, напряжений в выводах и паяных соединениях, а также расчетные соотношения для определения показателей выносливости и надежности этих элементов.

При вибрационных и ударных воздействиях на плату концы выводов, например, установленной на ней МС, которые соединены с проводниками печатного монтажа (рис. 1), смещаются от-

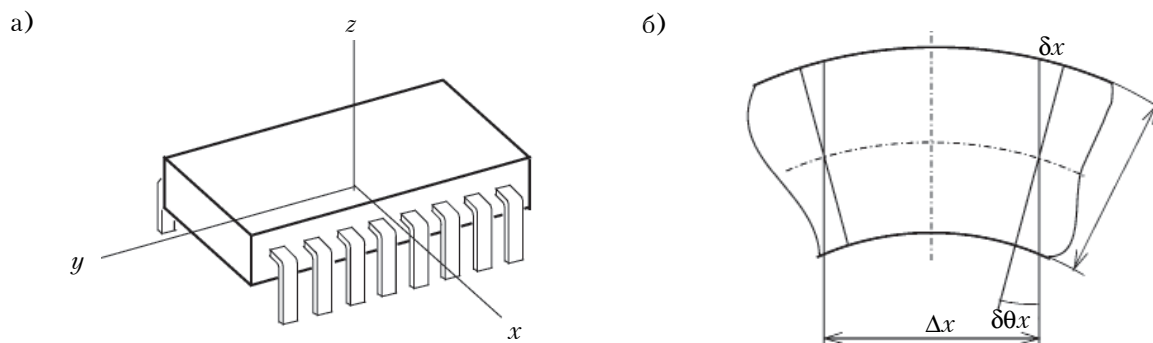


Рис. 1. Ориентация корпуса МС на плате (а) и деформации платы в плоскости X0Z (б)

носителю корпуса МС, причем такие смещения могут быть как линейными, так и угловыми.

Схема определения линейной (δx) и угловой ($\delta \theta_x$) деформации платы в плоскости X0Z для двух ее сечений, находящихся на расстоянии Δx друг от друга (например, для двух соседних выводов МС), приведена на рис. 1, б. Аналогично можно получить соответствующие деформации δy и $\delta \theta_y$ в плоскости Y0Z для сечений, находящихся на расстоянии Δy .

Прогиб платы $w(x, y)$, вызванный, например, смещением зон крепления при кинематическом возбуждении, можно найти по формуле [1]

$$w(x, y) = \sum_i \sum_k z_0 K R_z w_i(x) w_k(y), \quad (1)$$

где z_0 — расстояние, на которое смещается зона крепления;

K — коэффициент, учитывающий характер закрепления сторон платы;

R_z — коэффициент передачи ускорений при кинематическом возбуждении;

i, k — номера гармоник.

Входящие в формулу (1) величины $w_i(x)$, $w_k(y)$ — это так называемые базисные функции прогибов в продольном и поперечном направлениях (функции А. Н. Крылова).

Выражения для угловых смещений сечений платы (и концов выводов МС) в точке с координатами (x, y) можно записать как

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

$$\delta \theta_y = \frac{\partial w(x, y)}{\partial y}.$$

Линейные деформации описываются формулами

$$\delta x = 0,5d\delta \theta_x; \delta y = 0,5d\delta \theta_y,$$

где d — толщина платы (см. рис. 1, б).

Значения деформаций позволяют рассчитать в соответствии с методикой, изложенной в [1], напряжения в выводах в продольном (σ_x) и в поперечном (σ_y) 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 элементов электронной структуры РТУ.

Вероятность разрушения вывода (как и любого элемента конструкции) при циклических нагрузках увеличивается с ростом возникающих в нем напряжений и числа циклов нагружений. Число циклов N_p , соответствующее напряжению σ , определяют из уравнения усталости материала

$$N_p = N_0 \left[\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right]^m,$$

где N_0 — базовое число циклов (абсцисса точки излома кривой усталости), при котором определен предел выносливости σ_{-1} ;

m — показатель кривой усталости.

Относительный параметр χ (безразмерное время), используемый для определения показателей надежности, должен учитывать число циклов нагружения в единицу времени N_E , общее число циклов нагружения N_c , коэффициент режима нагружения элемента конструкции K_p [2]:

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

Для процессов, связанных с усталостными напряжениями в материале, вероятность безотказной работы при воздействии механических факторов $P_m(\chi)$ необходимо вычислять в соответствии с моделью ДМ-распределения (диффузионного монотонного) по формуле [2]

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

где $\Phi(u)$ — функция нормального распределения;

u — параметр интегрирования, $u = \frac{1-\chi}{v\sqrt{\chi}}$;

v — коэффициент вариации (рассеяния) процесса деградации при действии механических факторов.

Для конструкции, состоящей из нескольких структурно-конструктивных уровней n , в каж-

дый из которых входят k элементов, а отказ любого из них приводит к выходу из строя всего РТУ, общую вероятность безотказной работы следует рассчитывать по формуле

$$P_m(\chi) = \prod_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^k P_i(\chi) \right]_j. \quad (2)$$

Вследствие достаточной сложности таких расчетов, а главное — большого количества элементов РТУ (в современных устройствах оно может исчисляться сотнями и тысячами), в которых необходимо определять механические напряжения и показатели надежности, такие вычисления реально можно проводить только с помощью программ автоматизированного проектирования. Комплекс таких программных модулей описан в [1].

Надежность ячейки при тепловых воздействиях

Ячейка блока обычно представляет собой прямоугольную пластину из диэлектрика или металла, на которой закреплены МСб, МС, ФУ или ЭРЭ, причем каждый из элементов электронной структуры следует рассматривать как тепловыделяющий элемент (ТВЭ). Внешние тепловые воздействия определяют средний уровень температуры T_0 внутри блока РТУ, а внутренние — дополнительный перегрев каждого ТВЭ.

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

Тепловой моделью ячейки может быть двухмерная пластина размерами $a \times b \times d$ с дискретными источниками теплоты Q_i с центрами в координатах (x_i, y_i) и размером оснований $\Delta x_i \times \Delta y_i$. Для пластин из металла или керамики с хорошей теплопроводностью целесообразно учитывать теплоотвод через их торцы с коэффициентами теплоотдачи α_x, α_y .

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

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} C_{in} C_{im} \varphi_{in}(x) \varphi_{im}(y), \quad (3)$$

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 $0x, 0y$ соответственно.

По уравнению (3) можно рассчитать параметры теплового поля (температуру) в любой точке с координатами (x, y) и температуру самих элементов.

Надежность отдельных ЭРЭ рассчитывают в соответствии с математической моделью [4, 5]

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p \prod_{i=1}^n K_i, \quad (4)$$

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 и коэффициента нагрузки β ;

K_i — коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов как функции различных факторов.

Выражение для коэффициента режима в математических моделях, например, для интегральных схем (ИС) имеет такой вид:

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

где A, B — константы, соответствующие группам 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 детализированы выражения для K_p в моделях дискретных полупроводниковых приборов — транзисторов, диодов [4].

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

Для каждого ТВЭ можно рассчитать показатели надежности (вероятность безотказной работы, технический ресурс и др.) элементов электронной структуры РТУ в соответствии со стандартом [2] по модели DN -распределения (диффузионного немоного). Так, вероятность безотказной работы при воздействии температур вычисляется как

$$P_T(\chi) = \Phi(u_1) + \exp(2/v^2) \cdot \Phi(u_2),$$

где $\Phi(u_i)$ — функция нормального распределения;

u_1, u_2 — параметры интегрирования,

$$u_1 = \frac{1-\chi}{v\sqrt{\chi}}, \quad u_2 = -\frac{1+\chi}{v\sqrt{\chi}};$$

v — коэффициент вариации процессов деградации при тепловом воздействии.

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

Комплекс объектно-ориентированных программных модулей, которые позволяют проводить вычисления показателей надежности, определяемых температурой электронных элементов современных РТУ, описан в [3].

Комплексные показатели надежности РТУ

Комплексным показателем надежности РТУ, учитывающим воздействие механических и тепловых факторов, может быть вероятность безотказной работы, полученная как произведение двух независимых частных показателей, отображающих влияние механических напряжений — $P_m(\chi_m)$ и температуры — $P_t(\chi_t)$:

$$P(\chi) = P_m(\chi_m) P_t(\chi_t). \quad (5)$$

Особенность определения частных показателей заключается 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 обычно задается небольшим (продолжительность вибраций 0,5–1,0 ч; число ударов 12000–13000, что соответствует времени их воздействия не более 3 ч). Время же воздействия температуры 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 РТУ надежность ячеек и МСб, а следовательно и устройства в целом, может быть повышена топологической оптимизацией — рациональным размещением электрорадиоэлементов и функциональных узлов на плате ячейки или подложки микросборки [1, 3].

Координаты положения ЭРЭ, МС, ФУ с сосредоточенными массами m_i на основании ячейки или микросборки входят в выражение для так называемой приведенной массы [1]

$$m = m_{\pi} + m_{\Sigma} + \sum_{i,k} \frac{m_i \omega_i^2(x) \omega_k^2(y)}{ab \int_a^b \omega_i^2(x) dx \int_a^b \omega_k^2(y) dy},$$

где m_{π} — масса самой платы;

m_{Σ} — суммарная масса равномерно распределенных на плате ЭРЭ (без m_i).

Приведенная масса определяет механическую частоту платы

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

где $\varphi(\beta)$ — частотная постоянная платы (является функцией способа закрепления ее сторон);

D — цилиндрическая жесткость платы.

Таким образом, изменяя топологию, можно:

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

Все это повышает показатели надежности РТУ при действии механических нагрузок,

т. е. показатель $P_m(\chi_m)$ и время безотказной работы [1].

Анализ уравнения (3) показывает, что тепловой режим ячейки или МСб, т. е. значения температуры ЭРЭ, МС, ФУ, также определяется координатами расположения этих элементов на основании ячейки, поэтому оптимальные показатели надежности РТУ при тепловых воздействиях также могут быть достигнуты оптимальной компоновкой.

Оптимизация теплового режима — это достижение минимальных (в условиях применения РТУ) температур элементов электронной структуры, а значит и повышение их надежности, т. е. достижение максимального значения показателя $P_t(\chi_t)$ и времени безотказной работы [3].

Комплексная оптимизация конструкции ячейки — это достижение такой ее топологии, при которой обеспечивается максимальное значение комплексного показателя (5). В этом случае одновременно будут обеспечены минимальные значения как механических напряжений в выводах ЭРЭ и в их паяных соединениях, так и температуры самих ЭРЭ, а в конечном счете — максимальная надежность конструкции.

Методы оптимизации

Оптимизация комплексного показателя надежности (5) сложна не только как математическая задача (аналитически определить координаты (x_i, y_i) , обеспечивающие максимум надежности, невозможно), но и как вычислительная процедура (расчеты деформации, напряжения, температуры, показателей надежности для сотен и тысяч элементов РТУ).

Как уже указывалось выше, соответствующие программы параметрической оптимизации описаны в [1, 3]. Они разработаны в интегрированной среде C++Builder. В алгоритмах оптимизации использованы методы СПУИП (случайного поиска с уменьшением интервала поиска) и ОАПП (обобщенного алгоритма переменного порядка) [5].

Целевая функция оптимизации — комплексный показатель надежности $P(\chi)$, описываемый выражением (5). Его максимум находят методом СПУИП при проведении последовательных итераций с генерированием векторов параметров x_{ik} как случайных чисел:

$$x_{ik} = x_{i\min k} + (x_{i\max k} - x_{i\min k}) \eta_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где η_{ik} — множитель, создаваемый генератором равномерно распределенных случайных чисел;

k — номер итерации;

n — последовательность чисел натурального ряда.

Начальные значения параметров $x_{i\min}$, $x_{i\max}$ определяются размерами зоны платы, где устанавливаются элементы электронной структуры, и изменяются до тех пор, пока не будет получен максимум $P(\chi)$. Отметим, что реализуемая оптимизация является условной, поскольку

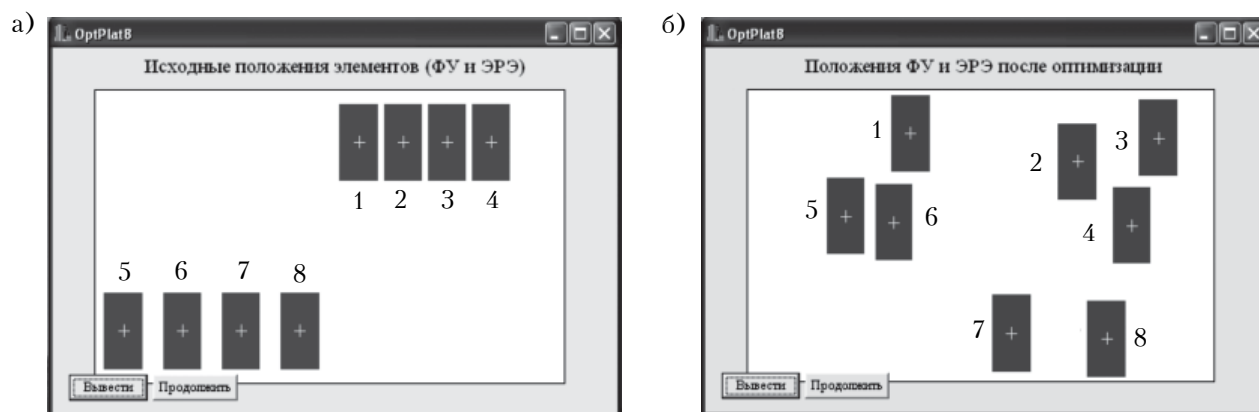


Рис. 2. Топологическая оптимизация ячейки (1–8 — номера корпусов МС):
а — исходная топология ячейки; б — топология после оптимизации

значения параметров x_{ik} ограничены размерами основания платы.

Для надежного удержания целевой функции в заданных границах число сгенерированных комплектов x_{ik} (и соответствующих значений $P_k(\chi)$) должно быть достаточно велико: 30–80. Указанный алгоритм обеспечивает нахождение для функции $P(\chi)$ глобального максимума.

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 [1, 3] основным методом оптимизации является СПУИП, в случае же когда процесс «расходится», программа переходит на более сложный метод — ОАПП или комбинированные методы [5].

Имитационное моделирование процесса оптимизации конструкций ячеек и микросборок с помощью разработанного комплекса программ показало, что показатели надежности указанных конструкций могут быть существенно повышены.

Приведем результаты комплексной оптимизации на примере ячейки, на плате которой установлены восемь микросхем, а их выводы припаяны к проводникам печатного монтажа. Размеры платы 160×100×2 мм, корпуса МС 26×13×4 мм, число выводов 40.

На ячейку действуют вибрации с частотой $f = 50$ Гц и удары с перегрузкой $3g$. Охлаждаются плата и МС воздухом температурой 30°C.

Для топологической оптимизации разработанная программа OptPlat8, а результаты ее использования представлены на рис. 2. Результаты компьютерного моделирования для различных ячеек и микросборок показали, что в результате топологической оптимизации выносимость вы-

водов ЭРЭ и их паяных соединений может быть повышена на 45–50% по сравнению с первоначальной произвольной компоновкой. Тепловую надежность структурно-конструктивных модулей РТУ в большинстве случаев можно повысить как минимум на 20–25%.

Выводы

Таким образом, использование при проектировании радиотехнических устройств предложенного метода оптимизации комплексного показателя надежности, учитывающего влияние механических и тепловых воздействий, позволяет существенно повысить надежность устройств путем поиска оптимальной топологии ячеек (рациональным размещением электрорадиоэлементов). Оптимизация конструкции по предложенному комплексному критерию наиболее эффективна для радиотехнических устройств с максимальным техническим ресурсом, а факторами, определяющими показатели надежности, являются вибрационные и ударные нагрузки, в особенности для периода эксплуатации $T_p \leq 3 \cdot 10^4$ ч.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Уваров Б.М., Зиньковский Ю.Ф. Проективання та оптимізація механостійких конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками. — Київ: Корнійчук, 2011.
2. ДСТУ 2992-96. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності.
3. Уваров Б.М., Зиньковский Ю.Ф. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками. — Київ: Корнійчук, 2011.
4. Прытков С.Ф., Горбачева В.М., Мартынова М.Н., Петров Г.А. Надежность электрорадиоизделий: Справочник. — Москва: МО РФ и НИИ «Электронстандарт», 2004 — 620 с. (Rus)
5. Петренко А.И., Ладогубец В.В., Чкалов В.В. Оптимальное схмотехническое проектирование в машиностроении. — Киев: УМК ВО, 1989.

Дата поступления рукописи
в редакцию 29.10 2015 г.

Б. М. УВАРОВ, Ю. Ф. ЗИНЬКОВСЬКИЙ

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут»

E-mail: kyivbmu@ukr.net

ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА НАДІЙНОСТІ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ЇХ ТОПОЛОГІЇ

Розглянуто проблеми визначення параметрів надійності конструкцій радіотехнічних пристроїв в умовах впливу механічних і термічних (зовнішніх і внутрішніх) чинників, запропоновано методи розрахунку цих параметрів для блоків, комірок, мікроскладань. Запропоновано методи досягнення максимальних значень показників надійності за допомогою топологічної оптимізації конструкції.

Ключові слова: радіотехнічний пристрій, механічні дії, тепловий режим, параметрична оптимізація, надійність, комп'ютерні програми

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.03
UDC 621.396.67.095

B. M. UVAROV, Yu. F. ZIN'KOVSKII

Ukraine, Kiev, NTUU «Kiev Polytechnic Institute»

E-mail: kyivbmu@ukr.net

OPTIMIZATION OF COMPLEX RELIABILITY INDICATOR OF WIRELESS DEVICES BY CHANGING THEIR TOPOLOGY

The authors consider problems of determination of reliability parameters for designs of radio engineering devices (RED) under the influence of mechanical and thermal (external and internal) factors. Mechanical factors (linear acceleration, vibration, impact) cause mechanical effect on the outputs of elements of electronic structure (EES) and soldered connections, which can result in decrease of reliability. External thermal effects and internal heat release in the elements of the electronic structure of radioelectronic devices raises the temperature of these elements, thereby reducing the reliability not only of the elements, but of the device as a whole. The paper presents the methods for determination of versatility indicators of reliability depending on mechanical and thermal effects on REDs. Optimization of configuration of the cell (topology) using computer programs allows reducing mechanical and thermal effect on the outputs of EESs and to obtain maximum parameters of reliability of a design. The optimum topology of a cell obtained by such program is illustrated. As a result of optimization, reliability of cells has increased.

Keywords: wireless devices, mechanical stress, thermal regime, parametric optimization, reliability, software.

REFERENCES

1. Uvarov B.M., Zin'kovs'kyi Yu.F. *Proektuvannya ta optimizatsiya mekhanostiikikh konstruktsii radioelektronnykh zasobiv z imovirnisnimi kharakteristikami*. Kiev, Korniiichuk, 2011, 248 p. (Ukr)
2. DSTU 2992-96. *Vyrobny elektronnoi tekhniki. Metody rozrakhunku nadiinosti* [State Standard of Ukraine 2992-96. Electronic product. Methods of reliability] (Ukr)
3. Uvarov B.M., Zin'kovs'kyj Ju.F. *Optymizacija teplovykh rezhymiv ta nadiijnosti konstrukcij radioelektronnykh zasobiv z imovirnisnymi kharakterystykamy* [Optimization

of thermal conditions and reliability of electronic means of stochastic characteristics]. Kiev, Kornijichuk, 2011, 201 p. (Ukr)

4. Prytkov S.F., Gorbacheva V.M., Martynova M.N., Petrov G.A. *Nadezhnost' elektroradioizdelij: Spravochnik* [The reliability of electric articles: Handbook]. Moscow, Elektronstandart, 2004, 620 p. (Rus)

5. Petrenko A.I., Ladogubec V.V., Chkalov V.V. *Optimal'noe skhemotekhnicheskoe proektirovanie v mashinostroenii* [Optimal schematic design in mechanical engineering]. Kiev, UMK VO, 1989, 164 p. (Rus)