

УДК 621.396

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-КОНСТРУКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ АППАРАТУРЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Зиньковский Юрий; Никитчук Артём; Уваров Борис
НТУУ „КПИ”

THE OPTIMIZATION OF RELIABILITY PARAMETERS OF STRUCTURE- CONSTRUCTIVE MODULES IN INFORMATION PROTECTION EQUIPMENT

Zinkovsky Juriy; Nikitchuk Artem; Uvarov Boris
NTUU „KPI”

Аннотация: Рассматриваются методы и программа автоматизированного размещения тепловыделяющих функциональных узлов и электрорадиоэлементов на печатной плате радиоэлектронного аппарата, обеспечивающие оптимальность теплового режима и повышение надежности. Температуры наиболее нагруженных в тепловом отношении тепловыделяющих элементов снижаются благодаря уменьшению их взаимного теплового влияния.

Ключевые слова: Тепловыделяющие элементы, радиоэлектронные устройства, отказ, тепловое поле, тепловыделение, интенсивность отказов, автоматизация, расчет надежности.

Summary: In this work discusses the methods of automated arrangement of the heat-producing functional units on the printed circuit board. Proposed mathematical models for determination the parameters of thermal fields in micro assemblies. The temperatures of heat-producing elements can be reduce by appropriately placing the latter.

Keywords: Heat-producing elements, radio electronic devices, failure, thermal field, heat, failure rate, automation, reliability calculation.

Введение

При проектировании ячеек радиоэлектронного аппарата (РЭА) размещение функциональных узлов (ФУ) и элементов электронной структуры (ЭЭС) на печатной плате чаще всего определяют, обеспечивая электрические и электромагнитные связи. Но надежность всего устройства существенно зависит от теплового режима электрорадиоэлементов (ЭРЭ), вибро- и ударозащищенности. Статистика показывает, что причинами отказов РЭА в 45 – 50 % случаев являются недопустимые перегревы ЭЭС.

Оптимизация теплового режима ячейки может быть достигнута соответствующим размещением тепловыделяющих элементов (ТВЭ), т.к. температура каждого из них определяется конвективными, кондуктивными и радиационными связями с элементами конструкции и друг с другом.

В статье рассмотрены методы размещения ТВЭ на печатных платах, дающие возможность обеспечить оптимальный тепловой режим – максимально снизить температуры ФУ и ЭЭС и тем повысить надежность всей ячейки. Такая же проблема возникает и при проектировании микросборок с размещенными на их подложках интегральными микросхемами.

Температуры ТВЭ на плате

Их обычно находят решением уравнения теплового баланса, которое для одного ТВЭ выглядит так:

$$P = Q_k + Q_m + Q_p,$$

где P – суммарная тепловая мощность ТВЭ; Q_k , Q_t , Q_p – тепловая мощность, которая отдается, соответственно, конвекцией, кондукцией (теплопроводностью), радиацией.

Теплоотдача конвекцией

Значение Q_k можно определить, если известны критерий конвективной теплоотдачи α_k , площадь ТВЭ S_k , с которой отдается теплота конвекцией, и разница температур T и T_c – т.е. поверхности ТВЭ и окружающей среды (ею, чаще всего, бывает воздух или другой газ):

$$Q_k = \alpha_k S_k (T - T_c).$$

При проектировании критерий α_k рассчитывают, определив критерий Нуссельта Nu для соответствующего режима теплоотдачи [1]:

$$\alpha_k = Nu \lambda / d, \quad (1)$$

где λ – критерий теплопроводности воздуха во внутреннем объеме РЭА (или самой ячейки, если она герметизирована); d – т.наз. определяющий размер для ТВЭ.

Для естественной конвекции $Nu = Nu(GrPr)$, для вынужденной $Nu = Nu(Re)$, где, в свою очередь, Gr – критерий Грасгофа, Pr – Прандтля, Re – Рейнольдса.

Теплоотдача кондукцией

Используя решение, полученное в [2] методом интегрального преобразования, для ТВЭ, установленного на плате с размерами $a \times b \times h$ (длина, ширина, толщина платы) и критерием теплопроводности материала λ , теплота, отводимая кондукцией к плате (потом она отдается от поверхности платы к окружающей среде) рассчитывают так:

$$Q_t = \frac{\lambda \delta}{\theta(x, y)} (T - T_c),$$

где $\theta(x, y)$ – функция, определяющая относительную температуру в точке платы с координатами $\xi = x/a$, $\vartheta = y/b$ в зависимости от координат ТВЭ на плате $\xi_0 = x_0/a$, $\vartheta_0 = y_0/b$, размеров контактной площадки ТВЭ $\Delta\xi = \Delta x/a$, $\Delta\vartheta = \Delta y/b$:

$$\begin{aligned} \theta(x, y) = & \frac{\beta}{Bi} + \\ & + \frac{4\alpha^2}{b\Delta x} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \xi_0) \sin(\mu_n \Delta\xi / 2)}{\mu_n (Bi_x + \mu_n^2)} \cos(\mu_n \xi) + \\ & + \frac{4b^2}{a\Delta y} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \vartheta_0) \sin(\mu_m \Delta\vartheta / 2)}{\mu_m (Bi_y + \mu_m^2)} \cos(\mu_m \vartheta) + \\ & + \frac{16ab}{\Delta x \Delta y} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\sin(\mu_n \Delta\xi / 2) \sin(\mu_m \Delta\vartheta / 2)}{Bi + \mu_n^2 / \beta + \beta \mu_m^2} \times \\ & \times \cos(\mu_n \xi_0) \cos(\mu_m \vartheta_0) \cos(\mu_n \xi) \cos(\mu_m \vartheta) \end{aligned} \quad (2)$$

критерии Био, определяющие конвективный теплообмен для платы:

$$\begin{aligned} Bi = \frac{\alpha ab}{\lambda h}; \quad Bi_x = \frac{\alpha a^2}{\lambda h}; \quad Bi_y = \frac{\alpha b^2}{\lambda h}; \\ \mu_n = \pi(n-1); \quad \mu_m = \pi(m-1); \quad \beta = \frac{b}{a} \end{aligned}$$

Теплоотдача радиацией

Часть теплоты, отводимая от ТВЭ радиацией [1]:

$$Q_p = c_0 \varepsilon S_p (T^4 - T_c^4),$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε – степень черноты излучающей поверхности; S_p – поверхность ТВЭ, отдающая тепло радиацией.

Температуры ЭЭС и температурное поле платы с многими ТВЭ

Уравнение теплового баланса для одного ТВЭ можно записать так:

$$\begin{aligned} P = \alpha_k S_k (T - T_c) + \frac{\lambda h}{\theta(x, y)} (T - T_c) + \\ + c_0 \varepsilon S_p (T^4 - T_c^4). \end{aligned}$$

Если считать температуру T_c заданной (например, $T_c = 273$ К) и выделить составляющие с температурой T , последнюю можно найти из уравнения:

$$c_0 \varepsilon S_p T^4 + \left(\alpha_k S_k + \frac{\lambda h}{\theta(x, y)} \right) T =$$

$$= P + \left(\alpha_k S_k + \frac{\lambda h}{\theta(x, y)} \right) T_c + c_0 \varepsilon S_p T_c^4.$$

В реальных ячейках на плате размещают иногда десятки ТВЭ, поэтому задача определения температур существенно усложняется: необходимо учитывать для каждого из них влияние всех других на температуру платы, а также взаимный радиационный теплообмен между ними.

Температурное поле платы, а также температуру каждого из ТВЭ можно найти суперпозицией отдельных температурных полей от всех ФУ и ЭЭС, если положения последних на плате определены.

Радиационный теплообмен между ФУ – взаимное облучение друг друга – может повлиять на температуру каждого из них. Количество теплоты Q_{12} , передаваемой радиацией между физическими телами с радиационными поверхностями F_1 и F_2 и абсолютными температурами T_1 и T_2 соответственно, определяют по закону Стефана – Больцмана [1]:

$$Q_{12} = c_0 \varepsilon_n (\varphi_{12} F_1 T_1^4 - \varphi_{21} F_2 T_2^4),$$

где φ_{12} и φ_{21} – коэффициенты взаимного облучения, которые можно рассчитать по формулам:

$$\varphi_{12} = \frac{F_2}{\pi r^2} \cos \psi_1 \cos \psi_2 ;$$

$$\varphi_{21} = \frac{F_1}{\pi r^2} \cos \psi_2 \cos \psi_1 ,$$
(3)

r – расстояние между центрами площадок F_1 и F_2 ; ψ_1 и ψ_2 – углы между нормалью к данной поверхности и направлением на другую; ε_n – приведенная степень черноты поверхностей: $\varepsilon_n = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$.

Для криволинейной поверхности в качестве площадки F_i рассматривают проекцию поверхности на площадку,

касательную к самой поверхности там, где проходит главная нормаль.

Температурное поле платы с n ТВЭ можно найти из системы уравнений:

$$\sum_{i=1}^n \left[\alpha_{ki} S_{ki} (T_i - T_c) + \frac{\lambda h}{\theta_i(x, y)} (T_i - T_c) + c_0 \varepsilon_i S_{pi} (T_i^4 - T_c^4) - \sum_{j \neq i}^n \frac{\lambda h}{\theta_{ij}(x, y)} (T_i - T_j) + \sum_{j=1}^n c_0 \varepsilon_{nj} (\varphi_{ij} F_i T_i^4 - \varphi_{ji} F_j T_j^4) - P_i = 0 \right] \quad (4)$$

В этих уравнениях системы отдельные составляющие для каждого ТВЭ определяют:

– теплота, отводимая от него конвекцией в окружающую среду

$$\alpha_{ki} S_{ki} (T_i - T_c);$$

– теплота, отводимая кондукцией в материал платы

$$\frac{\lambda h}{\theta_i(x, y)} (T_i - T_c);$$

– теплота, отводимая радиацией в окружающую среду

$$c_0 \varepsilon_i S_{pi} (T_i^4 - T_c^4);$$

– теплота, подводимая к элементу кондукцией от других ТВЭ через материал платы

$$\sum_{j \neq i}^n \frac{\lambda h}{\theta_{ij}(x, y)} (T_i - T_j);$$

– теплота, подводимая к элементу от других ТВЭ благодаря радиационному теплообмену

$$\sum_{j=1}^n c_0 \varepsilon_{nj} (\varphi_{ij} F_i T_i^4 - \varphi_{ji} F_j T_j^4); \quad (5)$$

P_i – тепловая мощность самого ТВЭ.

Решение системы (4) и даст температуры каждого ФУ или ЭЭС. Такую систему уравнений можно решить численными методами, используя математические пакеты **Mathcad**,

MATLAB или интегрированные программные среды (например, **C++Builder, Visual Studio**).

В большинстве реальных случаев учет взаимного радиационного теплообмена – составляющей (5) – приводит к изменению температур ТВЭ на 2...4 %; если этим пренебречь, для определения температур ЭЭС ячеек или микросборок (МСБ) можно использовать аналитическое решение, полученное методом конечных интегральных преобразований [3].

Дифференциальное уравнение стационарного теплового процесса для пластины с многими ТВЭ выглядит так:

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} - \frac{\alpha}{\lambda h} T(x, y, \tau) + \sum_{i=1}^n \frac{q_i(x, y)}{\lambda h} = 0, \quad (6)$$

где q_i – поверхностная мощность теплового потока от локальных ТВЭ Q_i :

$$q_i(x, y) = \begin{cases} \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} & \text{на основании} \\ & \text{площадки ТВЭ;} \\ 0 & \text{вне площадки.} \end{cases}$$

Граничные условия на торцах пластины:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + kT &= 0 \text{ при } x = 0; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + kT &= 0 \text{ при } x = l_1; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} + kT &= 0 \text{ при } y = 0; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + kT &= 0 \text{ при } y = l_2; \end{aligned}$$

Ядра интегральных преобразований таковы:

$$K(\mu_n, x) = \sqrt{\frac{2}{l_1}} \cdot \frac{\mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{l_1} x\right) + Bi_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{l_1} x\right)}{\sqrt{(\mu_n^2 + Bi_1^2) \cdot \left(1 + Bi_1 + \frac{Bi_1}{\mu_n^2 + Bi_1^2}\right)}};$$

$$K(\mu_m, y) = \sqrt{\frac{2}{l_2}} \cdot \frac{\mu_m \cos\left(\frac{\mu_m}{l_2} y\right) + Bi_2 \sin\left(\frac{\mu_m}{l_2} y\right)}{\sqrt{(\mu_m^2 + Bi_2^2) \cdot \left(1 + Bi_2 + \frac{Bi_2}{\mu_m^2 + Bi_2^2}\right)}};$$

где μ_n, μ_m – корни характеристических уравнений:

$$\begin{aligned} \tan \mu_n &= \frac{2\mu_n Bi_1}{\mu_n^2 - Bi_1^2}; \quad \tan \mu_m = \frac{2\mu_m Bi_2}{\mu_m^2 - Bi_2^2}; \\ Bi_1 &= \frac{kl_1}{\lambda}; \quad Bi_2 = \frac{kl_2}{\lambda}; \quad Bi = \frac{ah}{\lambda}; \end{aligned}$$

Решение уравнения (6) – температуры ТВЭ – имеет такой вид:

$$\begin{aligned} T(x, y) &= 16 \sum_{i=1}^k \frac{Bi}{\alpha} \frac{l_1 l_2}{h^2} \frac{q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} K_n^2 \times \\ &\times K_m^2 \frac{I_n(x_i) I_m(y_i)}{\mu_n^2 \frac{l_2}{l_1} + \mu_m^2 \frac{l_1}{l_2} + Bi} \frac{l_1 l_2}{h^2} \times \\ &\times \left[\mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{l_1} x\right) + Bi_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{l_1} x\right) \right] \times \\ &\times \left[\mu_m \cos\left(\frac{\mu_m}{l_2} y\right) + Bi_2 \sin\left(\frac{\mu_m}{l_2} y\right) \right]; \end{aligned}$$

где $I_n(x_i), I_m(y_i)$ – функции, определяющие распределение температур соответственно вдоль координат x и y :

$$I_n(x_i) = \left[\begin{aligned} &\cos\left(\frac{\mu_n}{l_1} x_i\right) + \\ &+ \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{l_1} x_i\right) \end{aligned} \right] \sin\left(\frac{\mu_n \Delta x_i}{l_1 2}\right);$$

$$I_m(y_i) = \left[\begin{aligned} &\cos\left(\frac{\mu_m}{l_2} y_i\right) + \\ &+ \frac{Bi_2}{\mu_m} \sin\left(\frac{\mu_m}{l_2} y_i\right) \end{aligned} \right] \sin\left(\frac{\mu_m \Delta y_i}{l_2 2}\right).$$

Температура ЭЭС прямо определяет показатели его надежности: интенсивности отказов λ для ЭЭС связаны с их температурой T функциями вида $\lambda = \lambda_0 K_T$, где λ_0 – значение λ при нормальной температуре, K_T – температурный коэффициент [4]. Значения λ_0 для различных ЭЭС (резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов, трансформаторов) а также аналитические зависимости $K_T = K(T)$ приведены в [4].

Например, выражения коэффициентов режима K_p в математических моделях для интегральных микросхем (ИМС) имеют вид:

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

где A и B — константы, определенные для соответствующих групп ИМС.

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

Более сложны детализованные выражения K_p в моделях для дискретных полупроводниковых приборов (ППП) — транзисторов, диодов.

Для кремниевых ППП:

$$K_p = A \cdot \exp\left[\frac{N_T}{\phi} + \left(\frac{\phi}{T_M}\right)^L\right];$$

$$\phi = 273 + t + (175 - t_{\text{пм}}) + \Delta t \cdot K_{\text{эл}} \left(\frac{t_{\text{пм}} - t_{\text{зн}}}{150}\right),$$

где A , N_T , T_M , L , Δt — постоянные модели; $K_{\text{эл}}$ — отношения рабочего электрического напряжения к максимально допустимому; $t_{\text{зн}}$ — максимальная температура, для которой температура перехода не превышает максимальную $t_{\text{пм}}$.

Оптимизация теплового режима ТВЭ

Обычно при проектировании стремятся уменьшать температуры ФУ и ЭЭС, а этого можно достигнуть соответствующим размещением последних, удаляя их друг от друга,

чтобы уменьшить взаимное влияние и улучшить условия теплоотдачи. В системе уравнений (4) это влияние учитывается функцией $\theta(x, y)$ и коэффициентами ϕ_{ij} и ϕ_{ji} — выражениями (2) и (3).

Оптимизация теплового режима может быть достигнута выбором координат x , y каждого из ТВЭ, что приводит к типовой проблеме параметрической оптимизации целевой функции (ЦФ) — $F(x_1, x_2 \dots x_n)$ многих переменных. В качестве такой функции может быть выбрана, например, сумма всех температур $TempSum$ или дисперсия температур; а если связать температуры ТВЭ с показателями надежности — интенсивностью отказов λ каждого из элементов, то и с одним из интегральных показателей надежности всей ячейки.

Для указанной цели необходимы программы условной оптимизации, т.е. оптимизации с ограничениями. Программа должна определять параметры $x_1, x_2 \dots x_n$ — это координаты центров ФУ и ЭЭС, а ограничениями служат расстояния между последними — площадки оснований ТВЭ не могут “перекрывать” друг друга. Наилучшие программы условной оптимизации, пригодные для решения такой задачи — это методы случайного поиска с уменьшением интервала поиска (СПУИП) и обобщенный алгоритм переменного порядка (ОАПП) [5].

По методу СПУИП минимум ЦФ находят последовательными итерациями, генерируя векторы параметров x_{ik} , которые будут варьироваться, случайным образом:

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

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

Начальные значения параметров x_{imin} , x_{imax} определяются границами зоны существования функции $F(x_1, x_2 \dots x_n)$. Оптимизация проводится изменением параметров x_i и проверкой значения ЦФ $F(x_1, x_2 \dots x_n)$ на каждом

шаге. Если последнее уменьшается сравнительно с предыдущим, шаг считается успешным, а значения x_i принимаются как исходные для следующего шага.

Для надежного удержания ЦФ в заданных границах количество сгенерированных комплектов x_{ik} (и соответственных значений ЦФ) должно быть достаточно большим: 30 – 80. Алгоритм обеспечивает нахождение глобального минимума для функции $F(x_1, x_2 \dots x_n)$. Если при оптимизации процесс “расходится”, применяется более сложный метод ОАПП или комбинированные методы [5].

Программный модуль автоматизированного расчета надежности РЕА

Для автоматизированного расчета температур ЭЭС ячеек или МСб, а по ними - показателей надежности - в интегрированном программной среде **Visual Studio** создана программа **ReliaREA**.

Для расчета температур ТВЭ и температурного поля ячейки или микросборки должны быть заданы значения критериев теплоотдачи α от боковых поверхностей пластины-основы и температура теплоносителя T_c во внутреннем объеме корпуса. Эти показатели получают из предыдущих этапов проектирования, на которых определяют форму и размеры ячеек, корпуса РЕА, параметры теплового режима в корпусе.

Входные данные для программы **ReliaREA** задаются в окнах программы. Окно для ввода параметров платы-основы приведено на рис. 1, в него вводятся размеры платы: длина, ширина, толщина; критерий теплопроводности материала платы; критерии теплоотдачи $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$; температуры T_1, T_2, T_3, T_4 .

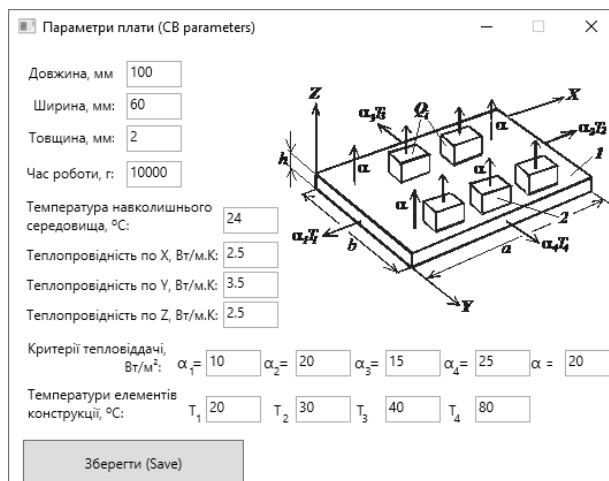


Рис. 1. Введение исходных данных платы.

Задав параметры платы, на ней размещают ТВЭ. Для этого на экран выводится окно задания параметров ТВЭ: размера элемента, координат положения на плате, тепловой мощности (рис. 2). Аналогично на плату последовательно добавляются остальные элементы. В программе предусмотрена возможность редактирования параметров ТВЭ и плат, для которых расчеты были предварительно проведены.

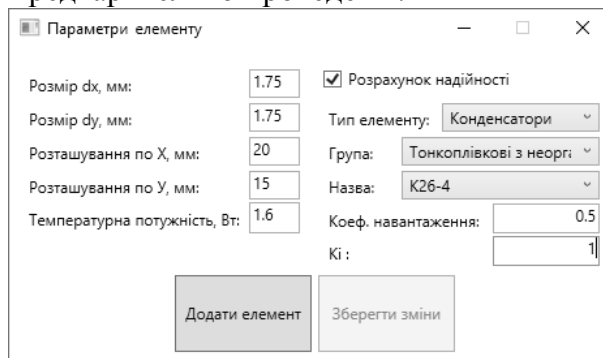


Рис. 2. Введение исходных данных для ТВЭ на плате

После ввода параметров ТВЭ программные модули рассчитывают температуры каждого из них.

Для расчета показателей надежности необходимо для каждого ТВЭ ввести его тип (с дополнительными признаками, которые всегда есть), коэффициенты электрической нагрузки K_n и дополнительные коэффициенты влияния K_i .

В самой программе **ReliaREA** записана база данных (БД) ЭЭС, которые

чаще всего применяют в электрических схемах РЭА:

– резисторов типов Р, С, РП, СП, ПП, КМТ, ММТ, СТ, ТР, 301-319, НР, Б, ПР ;

– конденсаторов типов: К, СГМ, МБГ, ФТ, КТ, Б, КС, КБП;

– трансформаторов типов ТА, ТН, ТО, ТВ, ТП, БТИ, МТИ, ММТИ, ТИ, ТИИ, ТИМ, ТИР, ФИТ, ГХ, ММТС, Т, ТВЛ, ТНЧ, ТОТ, ТУМ, ТФ;

– полупроводниковых приборов типов Д, 2Д, 2Ц, 2В, 2ДС, 2С, 2Т, 1НТ, 2ТС, 2ПС, 2П, 3П, 2У, 2А, 3А;

– интегральных микросхем.

В ячейках «Тип элемента», «Группа», «Название» (рис. 2) нужно выбрать из БД согласно электрической схеме нужный элемент. Значение базовой интенсивности отказов для выбранного элемента находятся в БД, программа их определяет сама. Согласно этим данным, а также соответствующими математическими моделями, программа рассчитывает коэффициент режима K_p для каждого элемента.

Полученные температуры используются в программе для расчета вероятности безотказной работы каждого ЭЭС согласно модели DN -распределения (диффузионного немонотонного).

Вероятность безотказной работы всего РЭА программа **ReliaREA** рассчитывает, исходя из предположения, что отказ каждого из ЭЭС приводит к отказу всего РЭА, то есть как произведение вероятностей $P_k(\tau)$ каждого из элементов.

Результаты расчетов сохраняются в соответствующем файле – это показатели надежности: коэффициенты режима, эксплуатационные интенсивности отказов, время наработки на отказ, вероятность безотказной работы.

Для автоматизированного размещения ЭЭС на основании печатной платы структурно-конструктивного модуля первого уровня (СКМ1 – ячейки или МСб) разработана программа **OptPlat2015**, могущая быть модулем системы автоматизированного

проектирования (САПР) ячейки или блока РЭА.

Для введения исходных данных (типа ЭЭС, их размеров) и расчета показателей надежности используются модули программы **ReliaREA**. Координаты установки ЭЭС могут задаваться в соответствии с электрической схемой – обычно группируются элементы, принадлежащие одной функциональной группе всего СКМ1, или

произвольно. В дальнейшем, в процессе поиска оптимальной топологии, эти координаты программой **OptPlat2015** все равно будут изменяться до тех пор, пока не будут получены максимальные показатели надежности. Практика эксплуатации программы **OptPlat2015** показала, что определенная группировка ЭЭС по функциональному назначению в известной мере соблюдается даже и при оптимальной (по надежности) топологии.

Алгоритм программы **OptPlat2015** (как и программы **ReliaREA**) обеспечивает решение системы уравнений (4).

Формирование ЦФ $F(x_1, x_2 \dots x_n)$, минимума которой стремятся достигнуть при параметрической оптимизации, в программе **OptPlat2015** – это сумма температур отдельных ТВЭ:

$$F(x_1, x_2 \dots x_n) = \sum_n T_i;$$

Ее значение вычисляется на каждом шаге оптимизации, если изменяются параметры x_i , т.е. координаты центров ТВЭ x_i, y_i ; когда они определены (на каждом шаге оптимизационного процесса), температуры ТВЭ находят из системы уравнений (4) – это система нелинейных уравнений $\sum_n f(x_1, x_2 \dots x_n) = 0$ с n неизвестными. Для решения таких систем существуют различные методы [6].

Начальные значения температур ТВЭ можно найти из условия, что все тепло от ТВЭ отводится только конвекцией и кондукцией:

$$T_i = \frac{P_i}{\alpha S_{ki} + \frac{\lambda h}{\theta_i(x,y)}} - T_c$$

Для определения температур T_i на каждом шаге использован метод Ньютона – формируется система линейных уравнений с матрицей частных производных $\partial f_j(x_i)/\partial x_i$, векторами невязок Δx_i и самих функций $f_j(x_i)$:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1 \\ \dots \\ -f_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

В системе (7) функции $f_j(x_i)$ сформированы из соответствующих уравнений системы (4):

$$f_i = \frac{1}{\alpha S_{ki} + \frac{\lambda h}{\theta_i(x,y)}} \times \left[\begin{aligned} & P_i - c_0 \varepsilon_i S_{pi} (T_i^4 - T_c^4) + \\ & + \sum_{j \neq i}^n \frac{\lambda h}{\theta_{ij}(x,y)} (T_j - T_c) + c \\ & + c_0 F_{ij} (T_j^4 - T_i^4) + T \end{aligned} \right] - T_i$$

Решение системы линейных уравнений (5), т.е. определение Δx_i , проводилось методом Гаусса. Когда достигались $\Delta x_i \leq 10^{-3}$, считалось, что температуры T_i определены. После этого вычислялось значение ЦФ.

Модуль параметрической оптимизации соответствует алгоритму метода СПУИП. На каждом шаге оптимизации генерируются 84 комплекта параметров x_i (количество x_i вдвое больше количества ТВЭ: для каждого из последних есть две координаты – x и y), и вычисляются 84 значения ЦФ; из них выбирается такая, у которой минимальное значение. В процессе вычисления координат выполняются условные ограничения – исключаются

возможности перекрытия контактных площадок ТВЭ одна другой. Если после какого-либо шага изменение ЦФ стало меньшим 10^{-3} , оптимизация заканчивается.

Программа вычисляет ЦФ – *TempSum* и ресурс *Tau* для исходного произвольного расположения ТВЭ и значения тех же величин после оптимизации, а также увеличение ресурса ΔTau , полученное оптимизацией.

Модуль визуализации выводит на экран монитора конструктивную схему платы с размещением ФУ и ЭЭС. Размеры платы и площадок контакта ТВЭ, места размещения последних изображаются в масштабе, и можно сравнить оптимальную компоновку ФУ и ЭЭС с исходной.

Начальные значения координат и температур ТВЭ, а также полученные после оптимизации значения этих параметров программа записывает в файл результатов. Кроме того, фиксируются значения ЦФ – начальное и полученное как результат, а также справочная информация – количество проведенных итераций и вычислений ЦФ.

Результаты моделирования процесса оптимизации

Моделирование процесса оптимизации проведено на нескольких вариантах печатных плат ячеек и при различном расположении ФУ и ТВЭ.

Ниже приведены результаты оптимизации топологии платы с размерами $120 \times 100 \times 1.5$ мм, из керамики с $\lambda = 15$ Вт/м.К, на которой установлены ФУ и ТВЭ общей мощностью $P_{\Sigma} = 9.5$ Вт. Критерии теплоотдачи с поверхностей платы и ТВЭ ($\alpha = 12$ Вт/м²К) соответствуют конвективной теплоотдаче при вынужденной конвекции. Интервал времени, для которого определялась вероятность безотказной работы принят 10^5 часов.

Продолжительность самого итерационного процесса зависит от мощности персонального компьютера (ПК) и количества ТВЭ; для комплекса исходных параметров, приведенных выше – для 8 ТВЭ – ПК с тактовой частотой 3,3 ГГц провел оптимизацию за 6 итераций и 493 вычисления ЦФ, и на это потрачено 85 с.

На рис. 3 показаны положения ФУ – до и после оптимизации.

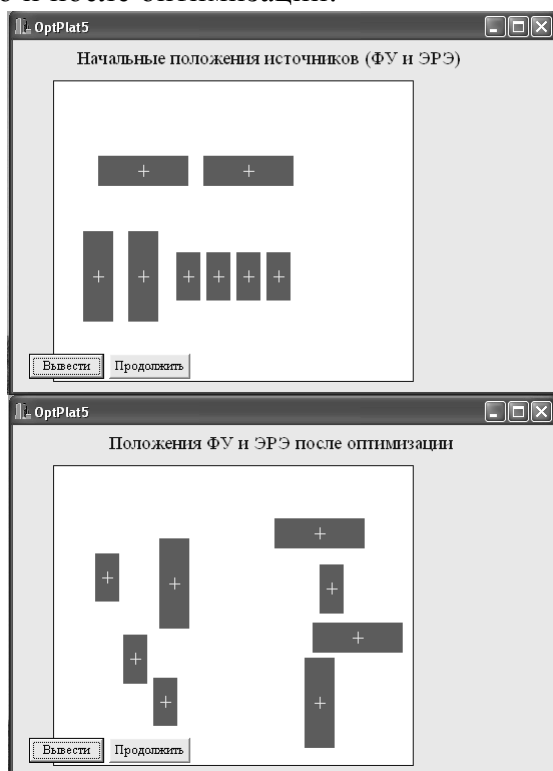


Рис. 3. Размещение ФУ на плате до и после оптимизации

Показатель $TempSum$ до оптимизации был 626°C , после нее – 537°C , т. е. температуры снизились на 14%; вероятность безотказной работы увеличилась на 20,3%.

Выводы

Эксплуатация программы **OptPlat2015** показала, что с ее помощью можно оптимизировать температурное поле платы размещением ТВЭ на ней – уменьшить температуры большинства ФУ и ЭРЭ, установленных на плате ячейки или на подложке микросборки. Температуры наиболее нагруженных в

тепловом отношении ТВЭ снижаются благодаря уменьшению их взаимного теплового влияния. Это снижение для конкретного ТВЭ будет тем более заметным, чем больше его тепловая мощность. Если выявится, что температура какого-либо из них недопустимо высока, это будет указанием для проектировщика: необходимо применить дополнительное охлаждение этого элемента, например, с помощью радиатора. Влияние радиатора учитывается увеличением площади теплоотдающей поверхности соответствующего источника.

Перелік посилань

- [1] В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел *Теплопередача*. Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. – М., Энергия, 1975. – 488 с.
- [2] Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов *Методы расчета теплового режима приборов*. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
- [3] Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зиньковский *Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками* – К.: «Корнійчук», 2011. – 204 с.
- [4] С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, М. Н. Мартынова, Г. А. Петров *Надежность электрорадиоизделий/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.
- [6] Н. Н. Калиткин *Численные методы*. – М., Наука, 1978. – 512 с.

References

- [1] V. P. Ysachenko, V. A. Osypova, A. S. Sukomel *Teplotperedacha*. Uchebnyk dlia vuzov, yzd. 3-e, pererab. y dop. – M., Enerhiya, 1975. – 488 s.
- [2] H. N. Dulnev, V. H. Parfenov, A. V. Syhalov *Metodu rascheta teplovoho rezhyma pryborov*. – M.: Radyo y sviaz, 1990. – 312 s.

- [3] В. М. Uvarov, Yu. F. Zinkovskiy *Optimizatsiia teplovykh rezhymiv ta nadiinosti konstruksii radioelektronnykh zasobiv z imovirnisnyu kharakterystykamy* – К.: «Korniichuk», 2011. – 204 s.
- [4] S. F. Pritkov, V. M. Horbacheva, M. N. Martunova, H. A. Petrov *Nadezhnost Elektroradyoyzdelyi/Spravochnyk*. – МО RF y NYU “Elektronstandart”, 2004 – 620 c.
- [5] *Optymalnoe skhemotekhnicheskoe proektyrovanye v mashynostroenyy: Uchebnoe posobyie* / A. Y. Petrenko, V. V. Ladohubets, V. V. Chkalov. – К., УМК ВО, 1989. – 164 s.
- [6] N. N. Kalytkyn *Chyslennie metody*. – М., Nauka, 1978. – 512 s.

Реферат

*Зиньковський Юрій, Нікітчук Артем,
Уваров Борис*

Оптимізація показників надійності структурно-конструктивних модулів апаратури захисту інформації

Надійність всього пристрою істотно залежить від теплового режиму електрорадіоелементів, вібро- та ударозахищеності. Статистика показує, що причинами відмов РЕА в 45 - 50% випадків є неприпустимі перегріву ЕЕС.

Оптимізація теплового режиму чарунки може бути досягнута відповідним розміщенням тепловиділяючих елементів (ТВЕ), тому що температура кожного з них визначається конвективними, кондуктивними та радіаційними зв'язками з елементами конструкції і один з одним.

У статті розглядаються методи та програма автоматизованого розміщення тепловиділяючих функціональних вузлів та електрорадіоелементів на друкованій платі радіоелектронного апарату, які забезпечують оптимальність теплового режиму та підвищення надійності.

Експлуатація програми OptPlat показала, що при її допомозі можна оптимізувати температурне поле плати розміщенням ТВЕ на ній - зменшити температури більшості ФУ і ЕРЕ,

встановлених на платі чаруці або на підкладці мікро збірки.

Температури найбільш навантажених в тепловому відношенні тепловиділяючих елементів знижуються завдяки зменшенню їх взаємного теплового впливу. Зазвичай при проектуванні прагнуть зменшувати температури функціональних вузлів та електрорадіоелементів, а цього можна досягти відповідним розміщенням останніх, віддаляючи їх один від одного, щоб зменшити взаємний вплив і поліпшити умови тепловіддачі.

*Зиньковський Юрій, Нікітчук Артем,
Уваров Борис*

Оптимізація показателів надійності структурно-конструктивних модулів апаратури захисту інформації

Надежность всего устройства существенно зависит от теплового режима ЭРЭ, вибро- и ударозащищенности. Статистика показывает, что причинами отказов РЕА в 45 – 50 % случаев являются недопустимые перегревы ЭЭС.

Оптимізація теплового режиму ячейки может быть достигнута соответствующим размещением тепловыделяющих элементов (ТВЭ), т.к. температура каждого из них определяется конвективными, кондуктивными и радиационными связями с элементами конструкции и друг с другом.

В статье рассматриваются методы и программа автоматизированного размещения тепловыделяющих функциональных узлов и электрорадиоэлементов на печатной плате радиоэлектронного аппарата, обеспечивающие оптимальность теплового режима и повышение надежности.

Експлуатація програми OptPlat показала, що при її допомозі можна

оптимизировать температурное поле платы размещением ТВЭ на ней – уменьшить температуры большинства ФУ и ЭРЭ, установленных на плате ячейки или на подложке микросборки.

Температуры наиболее нагруженных в тепловом отношении тепловыделяющих элементов снижаются благодаря уменьшению их взаимного теплового влияния. Обычно при проектировании стремятся уменьшать температуры функциональных узлов и электрорадиоэлементов, а этого можно достигнуть соответствующим размещением последних, удаляя их друг от друга, чтобы уменьшить взаимное влияние и улучшить условия теплоотдачи.

Zinkovsky Juriy, Nikitchuk Artem, Uvarov Boris

The optimization of reliability parameters of structure-constructive modules in information protection equipment

The reliability of all device essentially depends from the thermal regime of EC, vibration and shock resistance. Optimization of the thermal regime of the cell can be achieved by an appropriate placement of the heat-producing elements (HPE), because the temperature of each of them is determined by convective, conductive and radiative connections with elements of construction and each other.

Therefore, the necessary are the methods for determining placement of HPE on printed circuit boards, enabling to provide optimal thermal conditions - to reduce the maximum temperature of FU and EC, and improve the reliability of the entire cell. The same problem arises in the design of micro assemblies with their substrates placed on integrated microcircuits.

The methods and program of the automated arrangement of the heat-producing functional units and radioelements on the printed circuit board of the radio electronic device ensuring an optimality of a thermal mode and increase of reliability are considered.

Operation of the program OptPlat showed that with its help it is possible to optimize the temperature field of the PCB by the right placement of HPE on it – to reduce the temperature of most of the FU and ERE installed on board of a cell or on a substrate of micro assembly.

Temperatures of the most loaded thermally heat-producing elements reduced by reducing their mutual thermal influence. Typically, the design aim to reduce the temperature of functional units and heat-producing elements, and this can be achieved by appropriately placing the latter, removing them from each other to reduce interference and improve heat transfer.

Відомості про автора

Зиньковский Юрий Францевич

Освіта: Вища, за спеціальністю «Інженер-фізик» (РТФ, 1956).

Місце роботи: кафедра радіоконструювання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», професор д.т.н (1974).

Область знань: електромагнітна сумісність, проектування радіоелектронної апаратури.

Наукові інтереси: підвищення функціональної ефективності радіоелектронної техніки.

Email: juzinkovsky@ukr.net

Уваров Борис Михайлович

Освіта: Вища, за спеціальністю «Інженер-механік» (КПІ, 1956).

Місце роботи: кафедра радіоконструювання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», професор, д.т.н (2011).

Область знань: проектування радіоелектронної апаратури.

Наукові інтереси: імовірнісні характеристики фізичних процесів.

Email: kyivbmu@ukr.net

Никитчук Артём Валерійович

Освіта: Базова вища, за спеціальністю «Електронні прилади та пристрої» (2013).

Місце роботи: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

Область знань: радіотехнічні та телевізійні системи.

Наукові інтереси: надійність радіоелектронних пристроїв, комп'ютерне моделювання, програмування.

Email: Nikitchuk-artem@yandex.ua