

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМА ГЕРМЕТИЧНЫХ БЛОКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Н.П. ГАПОНЕНКО, О.В. СИРОТЮК, Е.В. ОГРЕНИЧ, Ю.А. ЛОПАТКА, Е.К. АРЕШКИН

Оптимизируется объём герметичного блока этажерочной конструкции. Тепловой режим моделируется с использованием программных средств инженерного анализа. Сходимость итерационного процесса обеспечивается отображением параметров в область обратных величин. Используется метод касательных гиперплоскостей.

Ключевые слова: герметичный блок, этажерочная конструкция, оптимизация объёма, тепловой режим, инженерный анализ, отображение параметров.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании бортовой радиоэлектронной аппаратуры актуальной задачей является разработка несущих конструкций с минимальным объёмом блоков [1, 2]. Особенно остро эта задача возникает при проектировании герметичных блоков этажерочной конструкции. Минимизация объёма таких блоков производится на этапе их компоновки, когда выбираются расстояния между платами и габаритные размеры блока. Поскольку эти параметры влияют на тепловой режим электрорадиоэлементов [3, 4], то компоновка блока производится в первую очередь при условии обеспечения теплового режима.

До недавнего времени сведения о реальном распределении температур в сложных радиоэлектронных устройствах можно было получить только в результате экспериментальных исследований. Теперь существует возможность отказаться от дорогостоящих и длительных экспериментов и проводить моделирование процессов теплопередачи в радиоэлектронных аппаратах с помощью программных средств инженерного анализа [5, 6]. Использование этих средств оказалось эффективным не только для анализа тепловых режимов, но и при оптимизации теплоотводящих элементов [7, 8].

Целью работы является разработка метода оптимизации объёмов герметичных радиоэлектронных аппаратов этажерочной конструкции с использованием современных программных средств инженерного анализа. Для решения этой задачи необходимо:

- создать тепловую модель герметичных блоков этажерочной конструкции;
- разработать метод оптимизации объёма герметичных блоков этажерочной конструкции с ограничениями по тепловому режиму;
- рассмотреть особенности применения метода.

Решение этой задачи возможно с использованием для моделирования распределения температур трехмерных моделей герметичных блоков, созданных с помощью средств инженерного проектирования CAD / CAM / CAE.

1. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ГЕРМЕТИЧНОГО БЛОКА

Блоки радиоэлектронной аппаратуры имеют большое количество конструктивных элементов, в том числе: печатные платы с электрорадиоэлементами, элементы крепления печатных плат, соединители, элементы объемного монтажа и т.д. Размеры этих элементов могут отличаться в сотни и тысячи раз. Обеспечить достаточную точность моделирования тепловых процессов в таких конструкциях современные компьютерные средства не могут. Поэтому при моделировании создаются тепловые модели путем исключения:

- конструктивных элементов, которые не влияют на распределение температур в блоке;
- локальных возмущений температур в печатных платах вблизи электрорадиоэлементов;
- элементов крепления блоков в аппаратуре.

Это позволяет в тепловой модели не учитывать элементы объемного монтажа, соединители и рассматривать равномерное распределение мощности по поверхности печатной платы. Влияние металлизации в печатной плате на тепловые процессы учитывается анизотропным коэффициентом теплопроводности. Указанные допущения приводят к теплообмену между блоком и внешней средой только конвекцией и излучением. На распределение температур внутри блока влияет также теплопередача теплопроводностью.

Тепловая модель герметичного блока с принятыми допущениями показана на рис. 1, где 1 – крышка корпуса; 2 – печатная плата; 3 – стойка; 4 – основание корпуса. На рис. 1 также обозначено: L_1 , L_2 та L_3 – ширина, длина и высота блока; l_1 и l_2 – длина и ширина печатной платы; d_p , d_0 и d_k – толщина печатной платы, основания и крышки корпуса; a и b – расстояние от боковых стенок крышки корпуса до плат; h_i и h_k – расстояние между платами и расстояние от верхней платы до крышки корпуса.

Объём герметичного блока с такими размерами определяется с помощью соотношений:

$$V = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3, \quad (1)$$

где $L_1 = l_1 + 2a + 2d_k$; $L_2 = l_2 + 2b + 2d_k$;
 $L_3 = d_0 + d_k + nd_{\text{п}} + h_k + \sum_{i=0}^{n-1} h_i$; n — количество печатных плат.

При исследовании теплового режима блока задавался коэффициент теплопроводности основания, крышки корпуса и стоек 140 Вт/м·К; печатной платы 3 и 40 Вт/м·К соответственно в аксиальном и радиальном направлениях.

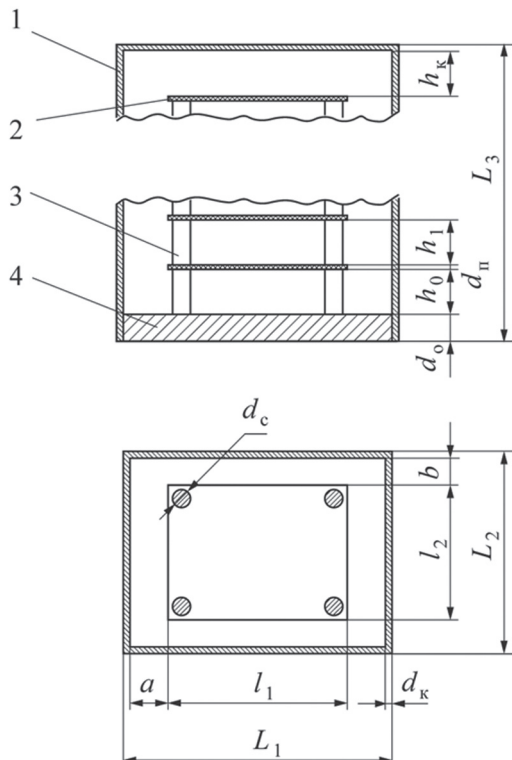


Рис. 1. Тепловая модель герметичного блока

Моделирование теплового режима блока при размерах плат $l_1 \times l_2 = 115 \times 115$, мм², расстояниях между платами $h_i = 10$ мм, температуре окружающей среды 50 °С и мощностях рассеивания на каждой плате 2 Вт показало, что максимальная температура наблюдается в центре средних плат и достигает 74,8 °С, что не обеспечивало тепловой режим некоторых электрорадиоэлементов. В этих условиях тепловой режим элементов может обеспечиваться выбором оптимальных расстояний между печатными платами и другими элементами конструкции герметичного корпуса.

2. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ

При оптимизации объема блока решается оптимизационная задача:

$$V(H) \rightarrow \min; \quad \vartheta \leq \vartheta_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где $V(H)$ — целевая функция (объем блока); $H = \{a, b, h_0, h_1, \dots, h_n, h_k\}$ — множество параметров, которые подлежат оптимизации; $\vartheta = t - t_c$ —

максимальный перепад температуры между платой и окружающей средой; t и t_c — максимальная температура на платах и температура окружающей среды; $\vartheta_{\text{доп}}$ — максимально допустимый перепад температуры между платами и окружающей средой.

При решении оптимизационной задачи использовалась линейная математическая модель зависимости температуры от параметров элементов:

$$\vartheta = a_0 + \sum_{i=0}^{n+2} a_i x_i, \quad (3)$$

где $a_i = \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x_i} \right|_{X_r}$ — линейные коэффициенты разложения ограничивающей функции в ряд Тейлора; $X_r = \{x_{r0}, \dots, x_{r(n+2)}\}$ — множество параметров блока, при которых определяются параметры модели; $a_0 = \vartheta_r - \sum_{i=0}^{n+2} a_i x_{ri}$; ϑ_r — максимальный перепад температуры между платами и окружающей средой при значениях параметров X_r ; $x_i = \frac{1}{h_i}$, ($i = \overline{0, n-1}$); $x_n = \frac{1}{h}$; $x_{n+1} = \frac{1}{a}$; $x_{n+2} = \frac{1}{b}$ — обратные параметры элементов конструкции.

Для улучшения сходимости алгоритмов оптимизации линейная модель (3) преобразуется в эллипсоидную:

$$\vartheta = \sum_{i=0}^{n+2} c_i x_i^2, \quad (4)$$

где c_i — коэффициенты модели.

Коэффициенты c_i определяются из условия тождественности касательных гиперплоскостей моделей (3) и (4). Касательная к модели (4) записывается в виде:

$$\frac{1}{\vartheta_r} \sum_{i=0}^{n+2} c_i x_{ri} x_i = 1. \quad (5)$$

Сравнение выражений (3) и (5) приводит к соотношению:

$$c_i = \frac{\vartheta_r}{\vartheta_r - a_0} \frac{a_i}{x_{ri}}, \quad (i = \overline{0, n+2}). \quad (6)$$

С целью упрощения оптимизационных соотношений используется гиперболическая модель целевой функции задачи (2):

$$V(X) = \sum_{i=0}^{n+2} \frac{g_i}{x_i}, \quad (7)$$

где g_i — коэффициенты модели.

Коэффициенты модели определяются по условиям тождеств касательных к функциям (1) и (7). Уравнение касательной к функции (1) записывается в виде:

$$\frac{1}{V_r - b_0} \sum_{i=0}^{n+2} b_i x_i = 1, \quad (8)$$

где V_r — значение объема блока при множестве параметров X_r ; $b_i = \left. \frac{\partial V}{\partial x_i} \right|_{X_r}$ — коэффициент разложения функции (1) в ряд Тейлора; $b_0 = V_r - \sum_{i=0}^{n+2} b_i x_{ri}$.

Уравнение касательной к функции (7) описывается соотношением:

$$\frac{1}{V_r} \sum_{i=0}^{n+2} \frac{g_i x_i}{x_i^2} = 1. \quad (9)$$

Касательные (8) и (9) тождественны, если выполняются условия:

$$g_i = \frac{V_r}{V_r - b_0} b_i x_i^2, \quad (i = \overline{0, n+2}). \quad (10)$$

Оптимизация объема блока проводилась методом множителей Лагранжа. Для этого создавалась вспомогательная функция:

$$L(\lambda) = V(X) + \lambda \sum_{i=0}^{n+2} c_i x_i^2, \quad (11)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Оптимальные значения параметров блока достигаются при выполнении условий:

$$\frac{\partial L(\lambda)}{\partial x_i} = 0, \quad (i = \overline{0, n+2}). \quad (12)$$

С учетом соотношений (7) система (12) преобразуется к виду:

$$-\frac{g_i}{x_i^2} + 2\lambda c_i x_i = 0, \quad (i = \overline{0, n+2}). \quad (13)$$

Множитель Лагранжа определяется при дополнении системы (13) уравнением (4), что с учетом условий задачи (2) приводит к оптимальным значениям параметров:

$$x_i = \left(\frac{g_i}{c_i} \right)^{1/3} \left(\frac{\vartheta_{доп}}{\sum_{i=0}^{n+2} c_i^{1/3} g_i^{2/3}} \right)^{1/2}, \quad (i = \overline{0, n+2}). \quad (14)$$

Обратные параметры (14) пересчитываются к линейным размерам элементов конструкции с помощью соотношений (3).

3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Параметры, определенные с помощью соотношения (14), содержат коэффициенты моделей, которые имеют нелинейную зависимость от условий теплового режима. Поэтому при оптимизации объема блока используется итерационный алгоритм:

Шаг 1. Проводится компоновка блока по определенному количеству функциональных узлов (плат) и минимально допустимыми расстояниями между платами, между платами и корпусом (минимальная компоновка). При определении допустимых расстояний учитывается высота электрорадиоэлементов, размер соединителей и элементы объемного монтажа.

Шаг 2. Создается трехмерная модель, проводится моделирование тепловых процессов в блоке и проверяются условия обеспечения теплового режима (2) с учетом локальных перепадов температуры, обусловленных электрорадиоэлементами. Если условия (2) выполняются для всех электрорадиоэлементов, алгоритм завершается с выводами о нецелесообразности проведения оптимизации.

Шаг 3. Проводится компоновка, создается трехмерная модель блока по определенному количеству функциональных узлов и максимально целесообразными расстояниями между платами, между платами и корпусом (максимальная компоновка). Проводится моделирование тепловых процессов в блоке и проверяемого условия (2) обеспечения теплового режима всех электрорадиоэлементов. Если условия (2) не выполняются, алгоритм завершается с выводами о необходимости интенсификации механизмов охлаждения блока.

Шаг 4. Проводится моделирование при измененных параметрах и определяются параметры математической модели области работоспособности. Используются соотношения (3) и (6).

Шаг 5. Определяются параметры модели целевой функции и оптимальные параметры элементов. Используются соотношения (8), (10) и (14).

Шаг 6. Проверяется соблюдение конструктивных ограничений на параметры элементов. Элементы с нарушенными ограничениями исключаются из оптимизационной процедуры путем назначения минимально допустимых значений.

Шаг 7. Проводится моделирование тепловых процессов в блоке с оптимизированными значениями параметров. Проверяется условие:

$$\left| \frac{\vartheta - \vartheta_{доп}}{\vartheta_{доп}} \right| \leq \varepsilon, \quad (15)$$

где ε – погрешность расчетов.

Выполнение условия (15) приводит к завершению алгоритма с определенными размерами оптимальной компоновки. Иначе происходит переход к шагу 4.

Результаты применения предложенного алгоритма приведены в табл.1 для герметичного блока с количеством печатных плат $n=3$. Обеспечивалась точность вычислений $\varepsilon=2,5 \cdot 10^{-3}$. Максимально допустимая температура задавалась значением $\vartheta_{доп} = 70^\circ\text{C}$. Другие тепловые нагрузки блока такие же, как в разделе 1. Объем блока составлял 1,09; 2,93 и 1,61 л при минимальной, максимальной и оптимальной компоновках.

Таблица 1

Результаты применения алгоритма

Компоновка	Параметры, мм					t, °C
	a=b	h ₀	h ₁	h ₂	h _к	
Минимальная	5	20	10	10	10	74,8
Максимальная	5	40	40	40	40	66,6
Оптимальная	5	20	25,8	25	10	70,05

В процессе оптимизации назначены минимально допустимые по конструктивным ограничениям параметры $a = b, h_0$ и $h_к$, поскольку их оптимальные значения меньше минимально допустимых.

Оптимизационная процедура позволила уменьшить объем блока на 82% по сравнению с максимальной компоновкой. При одинаковой тепловой нагрузке расстояния между платами почти не отличались.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод оптимизации габаритных размеров герметичных блоков использует программные средства моделирования тепловых процессов, что позволяет отказаться от длительных и кропотливых экспериментальных исследований. Оптимальные значения размеров элементов конструкции получены с использованием метода касательных гиперплоскостей при создании моделей границы области работоспособности и целевой функции. В связи с нелинейной зависимостью параметров моделей от условий процессов теплопередачи оптимальные соотношения определялись в итерационном алгоритме.

Разработанный алгоритм оптимизации учитывает конструктивные ограничения на размеры элементов конструкции и проводит проверку целесообразности и возможности проведения оптимизационной процедуры. Применение алгоритма позволяет уменьшить объем герметичных блоков на десятки процентов. В случае невозможности проведения оптимизационных процедур делается вывод о необходимости использования механизмов интенсификации процессов теплообмена.

Литература

- [1] Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1991. — 204 с., ил.
- [2] Овсицер П.И., Голованов Ю.В. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1988. — 232 с., ил.
- [3] Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Высш. шк., 1984. — 247 с., ил.
- [4] Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1976. — 232 с., ил.
- [5] Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Корщиков С.Б. и др. NX для конструктора-машиностроителя. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 504 с., ил.
- [6] Алямовский А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 1040 с., ил.
- [7] Шило Г.Н., Огренич Е.В., Гапоненко Н.П. Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. № 1-2. — С. 30 — 33.
- [8] Гапоненко Н.П., Марухняк М.С., Огренич Е.В. Проектирование штыревых радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами // Прикладная радиоэлектроника. — 2012. №1. — С. 112—115.

Поступила в редколлегию 12.06.2012



Гапоненко Николай Прокофьевич, доцент кафедры ИТЭС ЗНТУ, канд. техн. наук. Область научных интересов: тепловые режимы и допусковое проектирование электронных аппаратов.



Сиротюк Оксана Валентиновна, аспирантка кафедры ИТЭС ЗНТУ. Область научных интересов: проектирование несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры.



Огренич Евгений Викторович, ассистент кафедры ИТЭС ЗНТУ. Область научных интересов: автоматизация конструирования электронной аппаратуры.



Лопатка Юлия Анатолиевна, студентка кафедры ИТЭС ЗНТУ. Область научных интересов: конструирование радиоэлектронной аппаратуры.



Арешкин Евгений Константинович, студент кафедры ИТЭС ЗНТУ. Область научных интересов: конструирование радиоэлектронной аппаратуры.

УДК 621.396.6

Оптимізація об'єму герметичних блоків радіоелектронної апаратури / М.П. Гапоненко, О.В. Сиротюк, Є.В. Огренич, Ю.А. Лопатка, Є.К. Арешкін // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2012. Том 11. № 3. — С. 455—458.

Оптимізується об'єм герметичного блоку етажерної конструкції. Тепловий режим моделюється з використанням програмних засобів інженерного аналізу. Збіжність ітераційного процесу забезпечується відображенням параметрів в область обернених величин. Використовується метод дотичних гіперплощин.

Ключові слова: герметичний блок, етажерна конструкція, оптимізація об'єму, тепловий режим, інженерний аналіз, відображення параметрів.

Табл. 1. Лл. 1. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 621.396.6

Volume optimization of electronic equipment hermetic units / M.P. Gaponenko, O.V. Sirotyuk, E.V. Ogrenich, J.A. Lopatka, E.K. Arshkin // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2012. Vol. 11. № 3. — P. 455—458.

The volume of a stack package sealed unit is optimized. Thermal mode is simulated by a computer-aided engineering system. Convergence of an iterative process is provided by the mapping of parameters into the region of inverse values. The method of tangent hyperplanes is used.

Keywords: sealed unit, stack package, volume optimization, thermal mode, computer-aided engineering system, mapping of parameters.

Tab. 1. Fig. 1. Ref.: 08 items.