

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШТЫРЕВЫХ РАДИАТОРОВ С ОПТИМАЛЬНЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Н.П. ГАПОНЕНКО, М.С. МАРУХНЯК, Е.В. ОГРЕНИЧ

Моделируются тепловые процессы в штыревых радиаторах с помощью компьютерных средств инженерного анализа. Получены оптимизационные соотношения. Рассматривается стратегии минимальной массы. Показана возможность в несколько раз уменьшить массу радиатора.

*Ключевые слова:* штыревой радиатор, стратегии проектирования, оптимизация, массогабаритные параметры.

### ВВЕДЕНИЕ

Для охлаждения мощных полупроводниковых приборов в аппаратуре используются радиаторы [1-3]. В связи с широким применением таких устройств, размеры радиатора были стандартизированы. Стандартизация проводилась во времена, когда компьютерные технологии не позволяли с достаточной точностью моделировать процессы теплопередачи в сложных конструктивных элементах радиоэлектронных аппаратов. Поэтому стандартизированные радиаторы, как правило, не обеспечивали оптимальных массогабаритных показателей. Рассматривалась оптимизация только отдельных элементов конструкции: ребра, штыри [4].

Современные системы автоматизированного проектирования предлагают разнообразные средства инженерного анализа, в том числе и моделирование тепловых процессов [5-7]. Использование таких средств при проектировании ребристых радиаторов позволило в несколько раз уменьшить их массу [8]. Подобные исследования для штыревых радиаторов не проводились.

Целью работы является оптимизация и исследование массогабаритных показателей штыревых радиаторов с использованием средств инженерного анализа. Для решения этой задачи необходимо:

- сформировать тепловую модель штыревого радиатора;
- получить оптимальные соотношения размеров элементов конструкции радиатора для стратегии минимальной массы;
- разработать алгоритм и исследовать массогабаритные показатели штыревого радиатора.

### 1. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ШТЫРЕВОГО РАДИАТОРА

Исследовался односторонний штыревой радиатор с коридорным расположением штырей. При построении тепловой модели приняты следующие допущения:

- теплоотвод от радиатора осуществляется излучением и свободной конвекцией воздуха;

- коэффициент теплопроводности материала не зависит от температуры;
- расположение штырей горизонтальное;
- в области контакта основания полупроводникового прибора и радиатора тепловой поток постоянен;
- однотипные размеры всех штырей одинаковы;
- расстояния между рядами штырей одинаковы.

Тепловая модель штыревого радиатора, построенная с учетом принятых допущений, показана на рис. 1, где:

- $\Omega_{VT}$  – область контакта основания полупроводникового прибора и радиатора;
- $d_p$  – толщина основания радиатора;
- $l_p$  – расстояние между штырями;
- $d_r$  – диаметр штыря;
- $l_r$  – высота штыря.

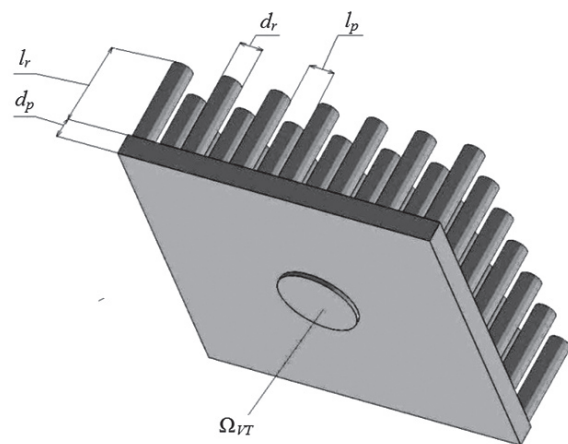


Рис. 1. Тепловая модель штыревого радиатора

Для решения оптимизационной задачи создавалась эллипсоидная модель [8]:

$$R_T = \sum_{i=1}^4 c_i x_i^2, \quad (1)$$

где  $R_T$  – входное тепловое сопротивление радиатора;  $c_j$  – коэффициенты модели;

$$x_1 = \frac{1}{d_p}; \quad x_2 = \frac{1}{l_p}; \quad x_3 = \frac{1}{d_r}; \quad x_4 = \frac{1}{l_r}.$$

Коэффициенты модели находились из условия тождества касательных гиперплоскостей к гиперповерхностям области работоспособности и модели (1). Уравнение касательной гиперплоскости к границам области работоспособности может быть записано в виде:

$$R_T = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i, \quad (2)$$

где  $a_i = \left. \frac{\partial R_T}{\partial x_i} \right|_{x_b}$  – линейные коэффициенты разложения функции  $R_T$  в ряд Тейлора;

$$a_0 = R_{Tb} - \sum_{i=1}^4 a_i x_{bi};$$

$X_b = \{x_{b1}, \dots, x_{bn}\}$  – координаты граничной точки области работоспособности, в которой определяются параметры модели;  $R_{Tb}$  – гранично-допустимое входное тепловое сопротивление радиатора.

Коэффициенты  $a_i$  находятся численным дифференцированием с помощью средств инженерного проектирования. Сравнение параметров гиперплоскости (2) с параметрами касательной гиперплоскости к гиперповерхности (1) приводит к выражению:

$$c_i = \frac{R_T}{R_T - a_0} \frac{a_i}{x_{bi}} \quad (i = \overline{1,4}) \quad (3)$$

Полученные соотношения однозначно устанавливают коэффициенты эллипсоидной модели и используются при оптимизации размеров элементов конструкций радиатора в стратегии минимальной стоимости ( $M$ -стратегия) [8].

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ МАССЫ РАДИАТОРА

Стратегию минимальной массы можно называть стратегией минимальной стоимости, так как она позволяет уменьшить расход материала и стоимость радиатора. Целевая функция  $M$ -стратегии оптимизации штыревого радиатора имеет вид:

$$m = \rho \left[ \left( (n-1)l_p + d_r n \right)^2 d_p + \frac{\pi n^2 d_r^2 l_r}{4} \right] \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $n$  – количество рядов штырей радиатора.

Оптимизационная задача может быть решена при условии:

$$R_T \leq R_{Tb}. \quad (5)$$

С учетом преобразований размеров (1) целевая функция получает вид:

$$m = \rho \left[ \left( \frac{n-1}{x_2} + \frac{n}{x_3} \right)^2 \cdot \frac{1}{x_1} + \frac{\pi n^2}{(2x_3)^2 x_4} \right] \rightarrow \min \quad (6)$$

Решение оптимизационной задачи проводится методом множителей Лагранжа.

Использование в этом методе выражений (6) приводит к сложной системе нелинейных уравнений. Поэтому для упрощения оптимизации использовалась гиперболическая модель весовой функции [8]:

$$G_a(x) = \sum_{i=1}^4 \frac{g_i}{x_i}, \quad (7)$$

где  $g_i$  – коэффициенты гиперболической модели.

Коэффициенты модели (7) определяются из условия параллельности касательных гиперплоскостей к гиперповерхностям (6) и (7):

$$g_i = -b_i \cdot x_{bi}^2,$$

где  $b_i = \left. \frac{\partial m}{\partial x} \right|_{x_b}$  – линейные коэффициенты разложения функции (6) в ряд Тейлора.

Вспомогательная функция в методе множителей Лагранжа для  $M$ -стратегии записывается в виде:

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^4 \frac{g_i}{x_i} + \lambda \sum_{i=1}^4 c_i x_i^2. \quad (8)$$

Оптимальное значение параметров достигается при:

$$\frac{\partial L(\lambda)}{\partial x_i} = 0, \quad (i = \overline{1,4}).$$

В результате составляются уравнения вида:

$$-\frac{g_i}{x_i^2} + 2\lambda c_i x_i = 0, \quad (i = \overline{1,4}). \quad (9)$$

Решение системы уравнений, составленной из уравнений (1) и (9) приводит к оптимальным параметрам радиатора при  $M$ -стратегии:

$$x_i = \left( \frac{g_i}{c_i} \right)^{1/3} \cdot \sqrt[4]{\frac{R_{Tb}}{\sum_{i=1}^4 (c_i \cdot g_i^2)^{1/3}}}, \quad (i = \overline{1,4}). \quad (10)$$

Значения размеров, полученных с помощью соотношения (10), зависят от положения граничной точки области работоспособности. Поэтому оптимальные значения размеров радиатора определяются в итерационном алгоритме:

**Шаг 1.** – Определяются начальные размеры радиатора.

Выбирается стандартизированный радиатор. Используются известные процедуры выбора и расчета радиаторов, например [3].

**Шаг 2.** – Определяются параметры моделей (1), (2) и (7).

**Шаг 3.** – Определяются оптимальные значения размеров элементов конструкции радиаторов с использованием выражения (10).

**Шаг 4.** – Проверяется условие:

$$\left| \frac{R_T^{(i)} - R_{Tb}}{R_{Tb}} \right| \leq \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – погрешность вычислений.

Если условие не выполняется, то переход на шаг 2. Иначе – конец алгоритма.

Приведенный алгоритм позволяет разрабатывать штыревые радиаторы с одинаковыми размерами однотипных элементов. Подобные радиаторы используются, когда необходимо упростить технологический процесс их изготовления. Алгоритм также может использоваться и при проектировании других типов радиаторов.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Особенность применения метода рассмотрена на примере штыревого радиатора из алюминиевого сплава АЛ2 с допустимым входным тепловым сопротивлением  $R_{Tb}=3$  К/Вт и диаметром основания корпуса полупроводникового прибора 19 мм. Задавалась мощность источника  $P=10$  Вт и температура окружающей среды  $t_c=40^\circ\text{C}$ . Принимался коэффициент черноты поверхности радиатора  $\epsilon=0,91$ .

Этим условиям удовлетворяет выбранный радиатор с размерами:

- диаметр штыря  $d_r=3$  мм;
- высота штыря  $l_r=20$  мм;
- толщина основания  $d_p=5$  мм;
- шаг штырей для свободной конвекции

$l_p=4$  мм.

На квадратном основании радиатора размещена штыревая решетка коридорного типа. Количество штырей в каждом ряду решетки составляет  $n=13$ .

Предложенный алгоритм обеспечивает сходимость итерационного процесса за несколько итераций, что подтверждает его высокую эффективность. Для оценки сходимости алгоритма использовались графики, представленные на рис. 2, где  $i$  – количество итераций.

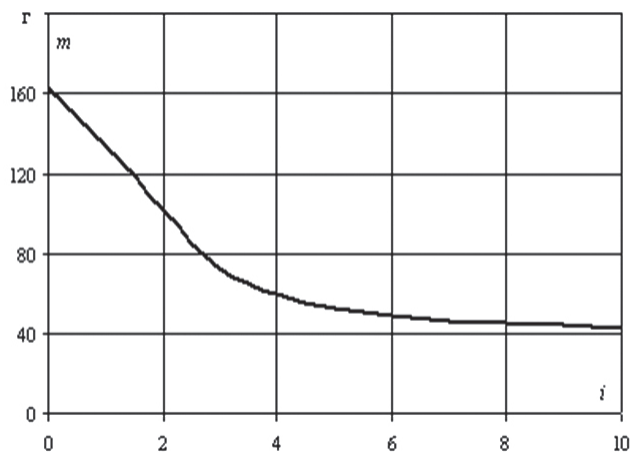


Рис. 2. Сходимость итерационного процесса

Из рис. 2 видно, что уже на 9-10 итерациях процесс оптимизации может быть завершён.

Размеры исходного и оптимизированного радиаторов приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что выбор стратегии приводит к существенному изменению размеров ребер и участков основания. По сравнению с исходным

радиатором  $M$ -стратегия проектирования привела к уменьшению толщины основания и диаметра штырей примерно в 3 раза. Одновременно увеличивались высота штырей и их шаг. Массогабаритные показатели исследуемых радиаторов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Размеры радиатора

Стратегия	$d_p$ , мм	$l_p$ , мм	$d_r$ , мм	$l_r$ , мм
Исходный радиатор	5	4	3	20
$M$	1,43	6,02	0,975	47,344

Таблица 2

Массогабаритные показатели радиаторов

Стратегия	$m$ , г	$V$ , см <sup>3</sup>	$mV$ , г·дм <sup>3</sup>
Исходный радиатор	163,6	189,2	31,0
$M$	43,2	351,7	15,2

Как и следовало ожидать, после оптимизации произошло существенное уменьшение массы радиатора. По сравнению с исходным радиатором, масса уменьшилась в 3,8 раза. Объем радиатора при этой стратегии по сравнению с начальным увеличился в 1,9 раза.

### ВЫВОДЫ

Предложенный метод проектирования штыревых радиаторов с помощью средств инженерного анализа позволяет существенно улучшить их массогабаритные показатели. Процедура проектирования реализована в виде итерационного алгоритма, который учитывает нелинейные свойства входных тепловых сопротивлений радиатора. Алгоритм обладает высокой сходимостью, позволяя закончить процедуру оптимизации за несколько итераций.

Сравнение массогабаритных показателей исходного радиатора и радиатора  $M$ -стратегии проектирования показало, что  $M$ -стратегия приводит к уменьшению массы почти в 4 раза. За это приходится расплачиваться увеличением объема практически в 2 раза. Массогабаритный показатель оптимизированного радиатора по сравнению с начальным уменьшился около двух раз.

Дальнейшее уменьшение массогабаритных показателей радиатора возможно при:

- снятии ограничений на равенство однотипных размеров радиатора;
- использовании штырей треугольной или параболической формы;
- изменении количества штырей.

Это позволит снизить массу радиатора еще на 20-30%. Предложенный метод и алгоритм может использоваться для проектирования двухсторонних штыревых радиаторов и радиаторов с шахматным расположением штырей. В этих случаях необходимы только некоторые изменения выражений для целевой функции.

## Литература.

- [1] Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976. – 232 с.
- [2] Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. «Конструир. и произв. радиоаппаратуры». – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с., ил.
- [3] Скрипников Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 48 с., ил.
- [4] Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. Тепловой расчет оребренных поверхностей. / Под. ред. В.Г. Фастовского. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.
- [5] Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с., ил, DVD.
- [6] Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272с.
- [7] Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Корщиков С.Б. и др. NX для конструктора-машиностроителя. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 504 с., ил, CD.
- [8] Шило Г.Н., Гапоненко Н.П., Огренич Е.В. Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. №1-2. – С. 30-33.

Поступила в редколлегию 30.01.2012



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



**Огренич Евгений Викторович**, ассистент кафедры КТПР ЗНТУ. Область научных интересов: автоматизации конструирования электронной аппаратуры



**Марухняк Марина Сергеевна**, магистр кафедры КТПР ЗНТУ. Область научных интересов: конструирование электронной аппаратуры.

УДК 621.396.6.017:004.942

**Проектування штирьових радіаторів з оптимальними массогабаритними параметрами** / М.П. Гапоненко, М.С. Марухняк, Є.В. Огренич // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 112-115.

Моделюються теплові процеси в штирьових радіаторах за допомогою комп'ютерних засобів інженерного аналізу. Отримано оптимізаційні співвідношення. Розглядається стратегія мінімальної маси. Показана можливість у кілька разів зменшити масу радіатора.

*Ключові слова:* штирьовий радіатор, стратегії проектування, оптимізація, массогабаритні параметри.

Табл. 2. Лл. 2. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 621.396.6.017:004.942

**Designing pin radiators with optimal mass and overall parameters** / N.P. Gaponenko, M.S. Maruhnnyak, E.V. Ogrenich // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 112-115.

Thermal processes in pin radiators with computer facilities of engineering analysis are modelled. Optimizing ratios are obtained. Strategies of the minimum mass are reviewed. The possibility to reduce mass of the radiator by several fold is shown.

*Keywords:* pin radiator, design strategies, optimization, mass and overall parameters.

Tab. 2. Fig. 2. Ref.: 08 items.