

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЛАТЕ С ТЕПЛОПРОВОДАМИ

Меркухин Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» Министерства образования и науки РФ, Махачкала, Россия (367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70), e-mail: dstu@dstu.ru

В статье предлагается способ решения задачи размещения электронных элементов на печатной плате с теплопроводами, позволяющий оптимизировать характеристики надежности изделия за счет снижения теплового воздействия. Определен критерий оптимизации, введены допущения, на основе которых выведены математические формулы для расчета перегревов электронных элементов, являющихся источниками тепла. Предложено использование метода ветвей и границ для поиска оптимального варианта размещения. Разработана методика определения граничных оценок для подмножеств вариантов размещения. Для иллюстрации рассмотрен пример размещения микросхем (электронных элементов) на теплопроводе предложенным способом. Представлены количественные расчеты граничных оценок, на основе которых построено дерево поиска. Показано, что предложенный способ позволяет не только найти нехудшее решение, но и оценить количественно, насколько оно отличается от оптимального.

Ключевые слова: плата, теплопровод, источник тепла, электронный элемент, перегрев, интенсивность отказов, метод ветвей и границ, граничные оценки.

## OPTIMIZATION OF RELIABILITY CHARACTERISTICS THROUGH THE RATIONAL PLACEMENT OF ELECTRONIC COMPONENTS ON THE CIRCUIT BOARD WITH HEAT PIPES

Merkukhin E.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dagestan State Technical University of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Makhachkala, Russia (367015, Makhachkala, I. Shamil Ave., 70), e-mail:dstu@dstu.ru

The article proposes a way of solving the problem of placement of electronic components on PCB with heat conductor, which allows to optimize the characteristics reliability of product by reducing thermal effects. Defined optimization criterion, introduced the assumptions based on which is derived a mathematical formula to calculate the overheating of electronic components, which are sources of heat. Suggested usage the method of the branch-and-bound search for optimal placement. Develop the method of determining the boundary estimates for subsets of placement. For illustrate an example of allocation of chips (electronic components) on the heat conductor by the proposed method. Present the quantitative calculations of boundary estimates, which were used to build the search tree. It is shown that the proposed method allows not only to find good solution, but also to quantify how it differs from optimal.

Keywords: board, a heat conductor, a heat source, an electronic element, overheating, failure rate, method of branches and boundaries, boundary estimates.

Задача обеспечения оптимального теплового режима относится к одной из важнейших задач проектирования, так как температура электронных элементов оказывает существенное влияние на надежность их функционирования [1]. Существует ряд способов решения данной задачи: снижение потребляемой мощности; активное охлаждение; пассивное охлаждение; рациональное размещение источников тепла.

### Цель исследования

В данной работе рассматривается задача повышения надежности за счет оптимизации теплового режима печатной платы путем рационального размещения электронных элементов, являющихся источниками тепла.

## Материал и методы исследования

В статье рассматривается вариант конструкции платы, представленный на рисунке 1. Плата имеет диэлектрическое основание, на котором наклеены в виде полос медные однотипные теплопроводы. Разногабаритные в общем случае интегральные микросхемы устанавливаются на теплопроводы, по которым отводится в одном направлении большая часть выделяемой ими тепловой энергии. Коэффициент теплопроводности материала теплопроводов на три порядка больше, чем материала платы. Хороший тепловой контакт интегральных микросхем с теплопроводом обеспечивается применением теплопроводной пасты. Плата эксплуатируется в разряженной атмосфере.

Указанные особенности конструкции и условий эксплуатации позволяют ввести следующие допущения: 1) теплопровод с источниками тепла теплоизолирован со всех сторон, кроме соединения с теплостоком; 2) тепловое контактное сопротивление между теплопроводом и источником тепла (корпусом микросхемы) не зависит от места его расположения на теплопроводе, и его влиянием на перегрев источника тепла можно пренебречь; 3) тепловой поток через поверхность контакта источника с теплопроводом однороден.

Введенные допущения позволяют рассмотреть каждый теплопровод в отдельности для определения оптимального порядка расположения на нем микросхем.

В [3] было выведено условие расположения микросхем на теплопроводе для стационарного теплового режима, минимизирующее максимальный перегрев теплопровода  $V_{\text{тmax}} \rightarrow \min$ :

$$\frac{P_{k_1}}{\Delta x + l_{k_1}} \geq \frac{P_{k_2}}{\Delta x + l_{k_2}} \geq \dots \geq \frac{P_{k_i}}{\Delta x + l_{k_i}} \geq \dots \geq \frac{P_{k_n}}{\Delta x + l_{k_n}}, \quad (1)$$

где  $P_{k_i}$  - мощность рассеивания  $i$ -го по порядку источника, считая от теплостока;

$\Delta x$  - расстояние между источниками;

$l_{k_i}$  - размер (по оси X)  $i$ -го по порядку источника, считая от теплостока.

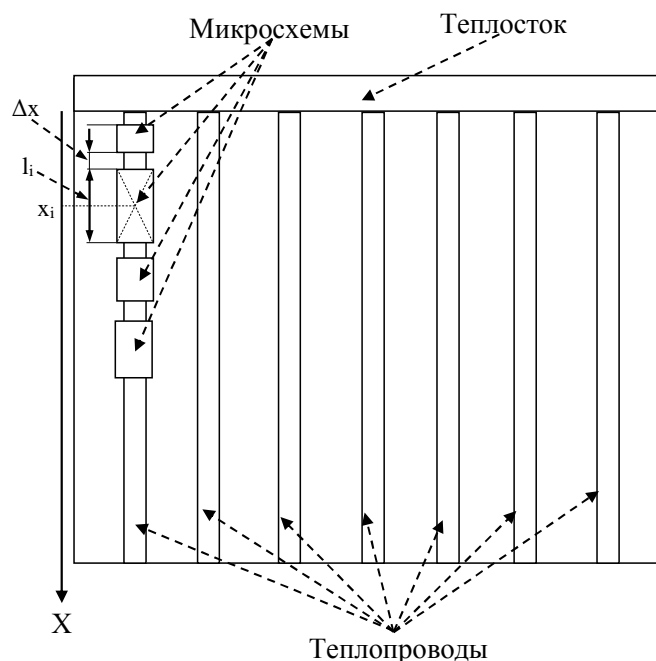


Рис. 1. Плата с теплопроводами

Рассмотрим теперь задачу расположения микросхем (источников тепла) на теплопроводе минимизирующего интенсивность отказов электронного устройства.

Интенсивность отказов электронных элементов является в общем случае нелинейной функцией температуры. В диапазоне рабочих температур электронного аппарата зависимость интенсивности отказов электронных элементов от температуры может быть аппроксимирована линейной функцией вида [4]:

$$\lambda_i(t_i) = \lambda_{i0} + k_i(t_i - t_0),$$

где  $\lambda_i(t_i)$  – интенсивность отказов  $i$ -го электронного элемента при его рабочей температуре  $t_i$ ;  $\lambda_{i0}$  – интенсивность отказов  $i$ -го электронного элемента при температуре окружающей среды  $t_0$ ;  $k_i$  – коэффициент линеаризации.

В [2] показано, что задачу размещения  $n$  источников тепла (электронных элементов), минимизирующего интенсивность отказов аппарата, можно свести к минимизации выражения:

$$\sum_{i=1}^n k_i v_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $v_i$  – перегрев  $i$ -го электронного элемента относительно окружающей среды.

С учетом принятых выше допущений перегрев  $i$ -го по порядку источника тепла (интегральной микросхемы) относительно теплостока в точке с координатой  $(x_i + l_i/2)$  можно определить по формуле:

$$v_i = v_{i\text{собр}} + v_{i\text{-нав}} + v_{i\text{+нав}}, \quad (3)$$

где  $v_{icob}$  - собственный перегрев;  $v_{-inaв}$  - перегрев, наведенный источниками тепла, стоящими на теплопроводе ближе к теплостоку, чем  $i$ -й по порядку источник;  $v_{+inaв}$  - перегрев, наведенный источниками, стоящими на теплопроводе относительно теплостока дальше, чем  $i$ -й по порядку источник.

Вычисление трех составляющих выражения (3) осуществляется по формулам:

$$v_{icob} = \int_{x_i - l_i/2}^{x_i + l_i/2} \frac{x P_i}{S_t \lambda_t} dx = \frac{x_i P_i}{S_t \lambda_t}; \quad v_{-inaв} = \frac{1}{\lambda_t S_t} \left( \sum_{\alpha=1}^{i-1} P_\alpha x_\alpha \right);$$

$$v_{+inaв} = \frac{1}{\lambda_t S_t} (x_i + l_i/2) \sum_{\beta=i+1}^n P_\beta,$$

где  $x_i, x_\alpha, x_\beta$  - координаты центра посадочного места соответственно  $i$ -го,  $\alpha$ -го и  $\beta$ -го по порядку источника;  $P_i, P_\alpha, P_\beta$  - мощности рассеивания соответственно  $i$ -го,  $\alpha$ -го и  $\beta$ -го по порядку источника;  $S_t$  - площадь сечения теплопровода;  $\lambda_t$  - коэффициент теплопроводности материала теплопровода;  $n$  - количество источников на теплопроводе.

Для решения задачи (2) предлагается использовать метод ветвей и границ. При этом нижняя граничная оценка на нулевом шаге может быть вычислена следующим образом. Сначала все источники располагаются на теплопроводе в порядке, соответствующем требованию выражения (1), и для каждого из них вычисляется перегрев для нулевого шага  $v_i^0$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). После этого величины  $v_i^0$  упорядочиваются по неубыванию ( $v_{i_1}^0 \leq v_{i_2}^0 \leq \dots \leq v_{i_k}^0 \leq \dots \leq v_{i_n}^0$ ), а величины  $k_i$  - по невозрастанию ( $k_{i_1} \geq k_{i_2} \geq \dots \geq k_{i_k} \geq \dots \geq k_{i_n}$ ).

В качестве нижней граничной оценки на нулевом шаге принимаем величину:

$$X^{H_0} = v_{i_1}^0 k_{i_1} + v_{i_2}^0 k_{i_2} + \dots + v_{i_k}^0 k_{i_k} + \dots + v_{i_n}^0 k_{i_n}. \quad (4)$$

Далее все множество решений разбивается на  $n$  подмножеств:

$$H_0 = H_1^{(1)} \cup H_1^{(2)} \cup \dots \cup H_1^{(i)} \cup \dots \cup H_1^{(n)}.$$

Для каждого подмножества вычисляется нижняя граничная оценка. Подмножество  $H_1^{(i)}$  включает в себя множество решений, когда первым по порядку стоит  $i$ -й источник (электронный элемент). Оценка подсчитывается следующим образом. Первым располагается  $i$ -й источник, а оставшиеся размещаются в порядке, соответствующем условию (1). Для всех

электронных элементов вычисляются значения перегревов по формуле (3) и выполняется процедура, аналогичная вычислению  $X^{H_0}$ . При этом нижняя граничная оценка уточняется:

$$X^{H_1^{(i)}} = v_i^{H_1^{(i)}} k_i + v_{i_1}^{H_1^{(i)}} k_{i_1} + \dots + v_{i_k}^{H_1^{(i)}} k_{i_k} + \dots + v_{i_{n-1}}^{H_1^{(i)}} k_{i_{n-1}}. \quad (5)$$

Для уменьшения трудоемкости вычислений можно ограничиться поиском вглубь на дереве решений, выбирая для ветвления каждый раз вершину с меньшей граничной оценкой.

Использование метода ветвей и границ позволяет найти одно из нехудших решений, а также получить оценку близости этого решения к оптимальному, сравнивая величины оценок на нулевом и последнем шаге.

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим пример использования предложенного метода. Чтобы не загромождать статью чрезмерным количеством расчетов, рассмотрим случай размещения на теплопроводе 5 микросхем. В таблице 1 приведены исходные параметры, необходимые для решения задачи предложенным методом ( $\Delta x=4$  мм). Принятые значения коэффициентов  $k_i$  согласуются с данными, приведенными в [5].

Таблица 1

Исходные параметры

Обозначение микросхемы	Длина микросхемы $l$ (мм)	Мощность рассеивания $P$ (вт)	Отношение $P/(l+\Delta x)$ (Вт/мм)	Коэффициент линеаризации $k * 10^{-6}$ (град $^{-1}$ час $^{-1}$ )
ИС 1	20	1,5	0,0625	0,015
ИС 2	30	2	0,0588	0,018
ИС 3	16	1,3	0,065	0,0020
ИС 4	20	1,2	0,050	0,025
ИС 5	14	0,9	0,050	0,012

Будем считать, что теплопровод медный ( $\lambda_t=380$  вт/м\*град) и площадь его сечения  $S_t= 0,000015$  м $^2$ . В таблице 2 приведены результаты расчета перегревов микросхем по формуле (3) при их расположении, удовлетворяющем условию (1), и нижняя граничная оценка, рассчитанная по формуле (4):

$$X^{H_0} = 0,025 * 10^{-6} * 22,386 + 0,020 * 10^{-6} * 43,333 + 0,018 * 10^{-6} * 62,526 + 0,015 * 10^{-6} * 68,053 + 0,012 * 10^{-6} * 71,000 = 4,425 * 10^{-6}.$$

Если рассмотреть варианты размещения, когда на первом месте закреплена микросхема ИС 3, то нижняя граничная оценка уточняется по формуле (5):

$$X^{H_1^{(3)}} = 0,020 * 10^{-6} * 22,386 + 0,025 * 10^{-6} * 43,333 + 0,018 * 10^{-6} * 62,526 + 0,015 * 10^{-6} * 68,053 + 0,012 * 10^{-6} * 71,000 = 4,529 * 10^{-6}.$$

Результаты расчета перегревов микросхем

Порядок расположения микросхем на теплопроводе	Координата центра микросхемы (м)	Коэффициент линеаризации $k \cdot 10^{-6}$ (град $^{-1}$ час $^{-1}$ )	Перегрев микросхемы °С	Нижняя граничная оценка $X^{H_0}$
ИС 3	0,012	0,020	22,386	4,425*10 $^{-6}$
ИС 1	0,034	0,015	43,333	
ИС 2	0,063	0,018	62,526	
ИС 5	0,089	0,025	68,053	
ИС 4	0,110	0,012	71,000	

Процедуру нахождения варианта размещения при использовании поиска вглубь на дереве решений иллюстрирует рис. 2.

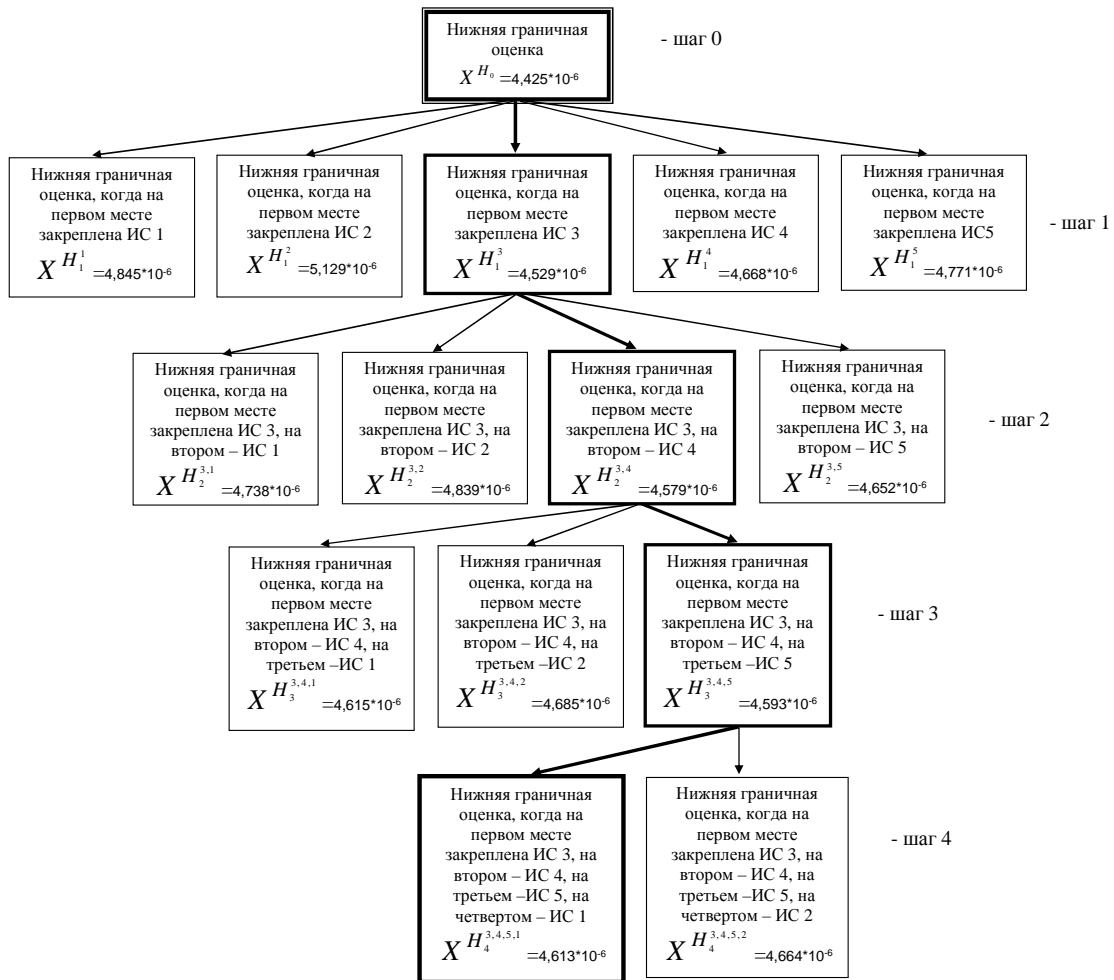


Рис. 2. Поиск вглубь на дереве решений

Как видно из рисунка 2, наилучшее решение соответствует порядку размещения микросхем относительно теплостока: ИС 3, ИС 4, ИС 5, ИС 1, ИС 2. При этом можно количественно оценить качество полученного решения, сравнивая  $X^{H_0}$  и  $X^{H_4^{3,4,5,1}}$ :

$$(X^{H_4^{3,4,5,1}} - X^{H_0}) * 100\% / X^{H_0} =$$

$$= (4,613 * 10^{-6} - 4,425 * 10^{-6}) * 100\% / 4,425 * 10^{-6} = 4,25\% .$$

Количественная оценка показывает, что значение критерия оптимизации для полученного решения отличается от оптимального решения не более чем на 4,25%.

### **Выводы**

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что предложенный способ может быть использован в задачах размещения электронных элементов на платах с теплопроводами, эксплуатирующихся в условиях, оговоренных выше. Приведенный пример показывает, что за приемлемое количество шагов можно получить достаточно хорошее решение и дать ему количественную оценку.

### **Список литературы**

1. Иофин А.А., Яблонский Н.С. Практические результаты анализа повышения надежности бортовых РЭС летательных аппаратов при повышенных температурах эксплуатации // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». - 2013. - Т. 1. – С. 101-103.
2. Лебедев Б.К., Меркухин Е.Н. Оптимизация тепловых характеристик при размещении элементов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1988. – Вып. 11. – С. 186–194.
3. Меркухин Е.Н. Оптимальное по тепловому режиму размещение цифровых ИМС на плате с теплопроводами // Проектирование электронной аппаратуры с применением САПР : научно-тематический сборник. – Махачкала : РИО ДГУ, 1988. - С. 46-49.
4. Роткоп Л.Л., Гидалевич В.Б. Оптимальное размещение радиоэлектронной аппаратуры с принудительным охлаждением // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1970. – Вып. 1. – С. 69–82.
5. Сборник задач по теории надежности / А.М. Половко, И.М. Маликов, А.Н. Жигарев, В.И. Зарудный; под ред. А.М. Половко, И.М. Маликова. – М. : Советское радио, 1972. - 108 с.

### **Рецензенты:**

Баламирзоев А.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры математики и информатики Махачкалинского филиала ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Махачкала.

Кобзаренко Д.Н., д.т.н., заведующий лабораторией информационных технологий в энергетике ФГБУН «Институт проблем геотермии ДНЦ РАН», г. Махачкала.