

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭВС НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Среди задач проектирования аппаратуры электронно-вычислительных средств (ЭВС) особый практический интерес представляют задачи оптимизации размещения тепловых источников (микросхем, радиоэлементов, субблоков, блоков), так как обеспечение высокой надежности в условиях минимизации массы, объема, стоимости невозможно без учета теплового режима каждого источника. Поэтому разработка инженерных и машинных методов и алгоритмов решения задач оптимизации размещения источников теплоты в объеме нагретой зоны является основной задачей при проектировании современных технических систем.

Данный тип задач относится к обратным задачам теплопроводности, к задачам оптимизации многосвязных систем с распределенными параметрами. Они достаточно сложны и мало изучены. Анализ отечественной и зарубежной литературы подтверждает наличие неиспользованных математических и алгоритмических подходов к решению задач оптимального размещения тепловых источников, а также отсутствие приемлемого математического аппарата для решения таких задач с помощью ЭВМ.

Рассмотрим получение решения задачи размещения тепловых источников для следующих случаев: конструкция электронного аппарата минимальна по габаритным размерам, определить теплофизические параметры проектируемой аппаратуры; габаритные размеры конструкции заданы, определить способ охлаждения и теплофизические параметры будущей конструкции прибора; задан способ охлаждения аппарата, определить габаритные размеры изделия.

Считаем нагретую зону проектируемого аппарата анизотропной с постоянными теплофизическими коэффициентами. Температурне-зависимые тепловые источники имеют форму параллелепипеда. При произвольном размещении источников теплоты в нагретой зоне и различном теплообмене на противоположных гранях изделия решение уравнения теплопроводности записывается в виде [1]

$$\Theta(x, y, z, \tau) = \sum_{i=1}^N \frac{64W_i T(\tau)}{\sum_{i=x,y,z} \left(\frac{\mu_i}{2l_i}\right)^2 \lambda_i} \times \prod_{i=x,y,z} \frac{\sin \mu_i \frac{b_{ij}}{2l_i} \cos \mu_i \left(\frac{r_{ij}}{2l_i} - \frac{1}{m_i}\right) f_{\text{вн}}}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i \left(1 - \frac{2}{m_i}\right)}. \quad (1)$$

Здесь i — индекс ортогональных координат x, y, z ; Θ — температура перегрева, ; N — количество источников или стоков теплоты, шт.; W — удельная мощность источников ($W > 0$) или стоков ($W < 0$) теплоты, Вт/м³; $T(\tau)$ — функция разогрева источников теплоты,

$$T(\tau) = 1 - \exp \left\{ -\frac{\tau}{c\gamma} \left[\sum_{i=x,y,z} \left(\frac{\mu_i}{2l_i}\right)^2 \lambda_i \right] \right\};$$

$2b, 2l, r$ — размеры источника, нагретой зоны и координаты тепловыделяющего элемента, м; μ — собственные числа характеристического уравнения

$$ctg(\mu_i/m_i) = \mu_i/Bi_{1i}, \quad (2)$$

где $Bi_{1,2}$ — критерии Био,

$$Bi_{1i;2i} = 2k_{1i;2i}l_i/\lambda_i, \quad (3)$$

причем $k_{1,2}$ — коэффициенты теплопередачи от первой и второй грани нагретой зоны соответственно, Вт/(м²°С); через n обозначен коэффициент асимметрии теплообмена на противоположных гранях,

$$n_i = Bi_{2i}/Bi_{1i}; \quad Bi_{1i} \geq Bi_{2i};$$

$m_i = f(n_i)$ — функция влияния асимметрии на собственные числа характеристического уравнения; она определяется, например, графически из уравнения

$$n_i = ctg \frac{\mu_i}{m_i} \operatorname{tg} \mu_i \left(1 - \frac{1}{m_i} \right);$$

$f_{вл}$ — функция влияния собственного перегрева источников на перегрев в n -й произвольной точке; λ — эффективная теплопроводность нагретой зоны, Вт/(м·°С); c — удельная теплоемкость нагретой зоны, Дж/(кг·°С); γ — плотность нагретой зоны, кг/м³; τ — время работы аппаратуры с момента включения, с.

Анализ выражения (1) показал, что местом наихудшего (с точки зрения теплового режима) размещения тепловых источников являются координаты

$$r_i = 2l_i/m_i, \quad (4)$$

а наилучшего — грани нагретой зоны.

Рассмотрим стационарный режим работы аппаратуры ($\tau \rightarrow \infty$) в случае симметричного теплообмена на противоположных гранях зоны:

$$T(\tau) = 1, k_{1i} = k_{2i}, n_i = 1, m_i = 2. \quad (5)$$

Считаем также, что $f_{вл i} = 1$.

Это своего рода допущение, которое, во-первых, значительно упрощает вычисления, а во-вторых, создает некоторый запас по перегреву. Таким образом, расчет ведется на несколько более высокую температуру, что повышает надежность вычислений.

Запишем (1) следующим образом:

$$\Theta(x, y, z) = \Theta_x \Theta_y \Theta_z, \quad (6)$$

где с учетом (5)

$$\Theta = \frac{4W_x \sin \mu_x \frac{b_x}{2l_x} \cos \mu_x \left(\frac{r_x}{2l_x} - \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{\mu_x}{2l_x} \right)^2 \lambda_x \mu_x + \sin \mu_x}; \quad (7)$$

$$\Theta_y = \frac{4W_y \sin \mu_y \frac{b_y}{2l_y} \cos \mu_y \left(\frac{r_y}{2l_y} - \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{\mu_y}{2l_y} \right)^2 \lambda_y \mu_y + \sin \mu_y}; \quad (8)$$

$$\frac{\left(\frac{\mu_x}{2l_x} \right)^2 \lambda_x}{\left(\frac{\mu_x}{2l_x} \right)^2 \lambda_x} + 1$$

$$\Theta_z = \frac{4W_z \sin \mu_z \frac{b_z}{2l_z} \cos \mu_z \left(\frac{r_z}{2l_z} - \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{\mu_z}{2l_z} \right)^2 \lambda_z \mu_z + \sin \mu_z}; \quad (9)$$

$$\frac{\left(\frac{\mu_x}{2l_x} \right)^2 \lambda_x + \left(\frac{\mu_y}{2l_y} \right)^2 \lambda_y}{\left(\frac{\mu_x}{2l_x} \right)^2 \lambda_x + \left(\frac{\mu_y}{2l_y} \right)^2 \lambda_y} + 1,$$

$$W = W_x W_y W_z.$$

Из условий обеспечения надежности ясно, что перегрев элементов конструируемой электронной аппаратуры не должен превышать некоторого значения Θ [2]. Считаем этот перегрев максимально допустимым для элементов данного изделия. Определим исходя из названного условия размеры и теплофизические параметры аппаратуры, координаты размещения источников теплоты.

Разбиваем удельные мощности источников на координатные составляющие

$$W_i = \sqrt[3]{P/2b_i}.$$

Осуществляем предварительную компоновку изделия из элементов отдельно по координатам. При этом возможны несколько вариантов, обусловленных наличием различного рода ограничений, изложенных в техническом задании: а) аппаратура должна быть минимальной по габаритным размерам; б) габаритные размеры конструкции изделия заданы; в) задан способ охлаждения прибора.

При ограничениях "а" и "в" предварительная компоновка выполняется по принципу максимальной плотности монтажа, т. е. элементы или блоки размещают вплотную друг к другу с минимально возможным зазором. При ограничении "б" элементы размещаются в заданном объеме. При компоновке источников теплоты геометрический центр наименее теплонагруженного элемента (или наиболее надежного) следует располагать в точке с координатами (4). Остальные — в порядке возрастания тепловой нагрузки (или уменьшения надежности) от первого элемента в стороны граней нагретой зоны данной координаты таким образом, чтобы наиболее теплонагруженные источники оказались вблизи граней последней (грани источника и нагретой зоны совпали). При компоновке следует учитывать электромагнитную совместимость, принцип минимизации длины электрических связей и др., т. е. решать комплексную задачу.

После размещения определяются габаритные размеры нагретой зоны, координаты расположения источников теплоты.

Задаемся значением эффективной теплопроводности λ_1 . Значение λ_1 устанавливается экспериментально для данного типа аппаратов либо из рекомендаций, имеющих в специальной литературе для аналогичного класса изделий — для ограничений "а" и "б". При ограничениях "в" диапазон значений λ_1 известен и приведен в соответствующей литературе, например [2].

Далее находится коэффициент теплопередачи [3]. Рассчитываются критерии Био (3) и собственные числа характеристического уравнения (2). Вычисляются координатные составляющие заданного перепада из (6):

$$\Theta_i = \sqrt[3]{\Theta}. \quad (10)$$

Выбирается один из параллельных рядов по координате X , по которому в дальнейшем будет вестись расчет, например: ряд с наибольшей суммарной мощностью источников (тепловое взаимодействие между рядами учитывается при расчетах по другим координатам).

Распределяется перегрев Θ_x между источниками ряда пропорционально их удельной мощности рассеивания, размерам и координатам размещения. Для j -го источника

$$\Theta_{xj} = \frac{\Theta_x W_{xj} \sin \mu_x \frac{b_{xj}}{2l_x} \cos \mu_x \left(\frac{r_{xj}}{2l_x} - \frac{1}{2} \right)}{\sum_{m=1}^q W_{xm} \sin \mu_x \frac{b_{xm}}{2l_x} \cos \mu_x \left(\frac{r_{xm}}{2l_x} - \frac{1}{2} \right)},$$

где q — количество источников в выбранном ряду.

Вычисляем с помощью (7) значение эффективной теплопроводности λ_1 , которое при данных габаритных размерах нагретой зоны, размерах источника и его координатах размещения обеспечит перегрев Θ_{xj} :

$$\lambda_{x2} = \frac{4W_{xj} \sin \mu_x \frac{b_{xj}}{2l_x} \cos \mu_x \left(\frac{r_{xj}}{2l_x} - \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{\mu_x}{2l_x} \right)^2 \Theta_{xj} (\mu_x + \sin \mu_x)}. \quad (11)$$

Считаем λ_2 истинным значением теплопроводности. Задаемся допустимой погрешностью расчетов ε . Если выполняется неравенство $|\lambda_1 - \lambda_2| \leq \varepsilon$, цикл расчетов прекращаем. В противном случае по λ_2 отыскиваем критерий Био и корни характеристического уравнения (2). По (11) находим λ_3 . Далее расчеты производятся до тех пор, пока не выполнится условие

$$|\lambda_{n-1} - \lambda_n| \leq \varepsilon. \quad (12)$$

Допустим, что (12) выполняется. Тогда можно считать, что при данных габаритных размерах нагретой зоны перегрев элементов будет меньше заданного только в том случае, если значение эффективной теплопроводности равно λ_n . Фактически дальнейшее конструирование сводится к обеспечению полученного значения теплопроводности

структивными методами: конкретизируются материал несущей конструкции, использование теплостоков, количество последних и т.п. Конструктор не устраивает способ необходимого охлаждения (по значению λ_n), габаритные размеры конструкции можно увеличить за счет расширения зазора между источниками теплоты. Таким образом, при ограничении "в" получаем габаритные размеры, при которых указанный способ охлаждения обеспечит заданный перегрев. Параметры принудительной системы охлаждения определяются исходя из уровня избыточной мощности по данной координате — $W_{x_{изб}}$. Он может быть определен следующим образом. Из (11) находится мощность источника, обеспечивающая при естественных условиях охлаждения его заданный перегрев. Разница между этой мощностью и реальной и есть $W_{x_{изб}}$.

По координате X рассчитываются все параметры, т.е. $2x, 2\lambda_x, \lambda_x$ — величины известные. Затем надо перейти к координате Y, повторить весь цикл расчетов, начиная с использования (10) и (8). Аналогичен расчет и по координате Z на основании (9). Итак, в спроектированном изделии габаритные размеры, координаты размещения источников и теплофизические параметры таковы, что перегрев любого элемента прибора не превысит заданного значения Θ .

Заметим, что в реальной конструкции не всегда можно четко выстроить ряды по выбранным направлениям координат и не все источники имеют форму параллелепипеда. При решении задачи форму источников теплоты и размеры последних можно искусственно менять таким образом, чтобы интенсивность тепловыделения у элементов в модели не изменялась [4]. Это позволяет значительно формализовать задачу даже в том случае, если в конструкции отсутствует дальний порядок.

Список литературы: 1. Майко И.М., Азаренков В.И. Исследование температурного поля радиоэлектронных устройств в стоечном исполнении // Локальные автоматизированные системы автоматики: Сб. науч. тр. К., 1989. С. 148 — 151. 2. Роткоп Л.П., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М.: Сов. радио, 1976. 232 с. 3. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. М.: Энергия, 1968. 359 с. 4. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердотельных устройств. Л.: Энергия, 1976. 352 с.

Поступила в редколлегию 31.03.97