

ОБЩАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ОДНОБЛОЧНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ И ЕЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Радиоэлектронный аппарат представляет собой с теплофизической точки зрения сложную систему тел в виде набора большого количества радиоэлементов, размещенных на монтажных платах или на шасси (рис. 1а). Все эти тела помещаются в оболочку – кожух аппарата, который выполняет или функцию герметизации, или пылезащиты, или защиты от внешних повреждений и т. д.

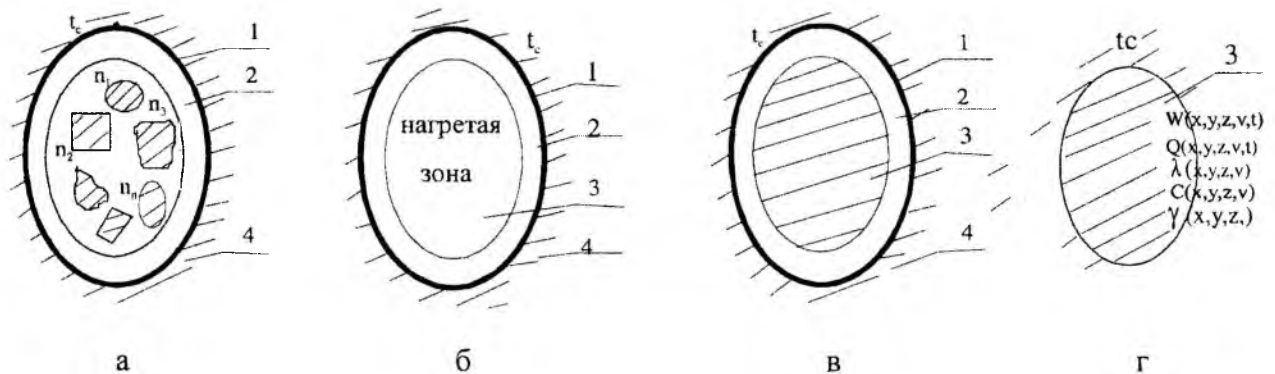


Рис. 1

Предпринятые, начиная с шестидесятых годов, широкие исследования теплофизических свойств сложных тепловых систем РЭА позволили проф. Дульневу Г.Н. и его ученикам ввести понятие о нагретой зоне аппарата 3, которое стало фундаментальным в теории последующих исследований тепловых режимов РЭА.

Нагретой зоной называется [1] часть объема аппарата, занятого шасси или платами и смонтированными на них элементами. Таким образом, тепловая модель РЭА из сложной системы тел перешла в трехсоставную систему (рис. 1б). Такая тепловая модель позволила создать аналитический аппарат для расчета средних температур кожуха 1 и нагретой зоны 3.

Поверхность нагретой зоны и кожух рассматривались как изометрические поверхности со средней поверхностной температурой t_k и t_s . Однако, такая модель не позволяла исследовать объемное температурное поле нагретой зоны, что особенно важно для современной микроэлементной базы с высокой плотностью монтажа. Исследования структуры нагретых зон одноблочных аппаратов, собранных на микромодулях [2], показало, что нагретые зоны, состоящие из однотипных элементов, представляют собой упорядоченные системы, полученные путем многократного повторения элементарной ячейки вдоль осей симметрии. Элементарная ячейка включает в себя элемент с участком платы и заполнитель. Такая нагретая зона может рассматриваться как квазиоднородное твердое тело. Теплопроводные свойства элементарной ячейки и системы в целом могут изменяться в трех основных направлениях осей симметрии системы $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$, т.е. полученное тело следует рассматривать как анизотропное по теплопроводности вдоль главных осей симметрии. Это также подтверждено расчетом и экспериментом при изучении температурных полей микромодульных аппаратов [1,2,3].

Исследование структуры нагретых зон РЭА с габаритными разнотипными элементами и малотеплопроводным заполнителем 2 (воздух) показали, что понятие квазиоднородного, анизотропного тела может быть распространено на все РЭА независимо от того, из однотипных или разнотипных элементов собрана нагретая зона [4 – 6].

Расчеты стационарных и нестационарных температурных полей РЭА, собранных на разнотипной элементной базе (резисторы разной ваттности, транзисторы, малогабаритные электромагнитные реле, полупроводниковые элементы, микромодули, интегральные схемы и т. д.) с представлением нагретой зоны в виде квазиоднородного анизотропного твердого тела, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [6,7].

Таким образом, приходим к выводу, что при исследовании температурных полей РЭА, собранных на современной малогабаритной элементной базе, их тепловая модель может быть представлена в виде трех составной системы тел: кожух, наполнитель, квазиоднородное анизотропное по теплопроводности твердое тело – нагретая зона.

Из общего класса аппаратов, описываемых тепловой моделью (рис. 1в), рассмотрим РЭА с достаточно тонким металлическим кожухом, так что полная теплоемкость кожуха c_k (Джс/град.) будет меньше полной теплоемкости нагретой зоны c (Джс/град.) – этим ограничениям подчиняется широкий класс аппаратов, используемых в системах автоматического управления и др., так как оно совпадает с требованием минимизации веса конструкции. Как показано в работе [7], в таких моделях можно пренебречь аккумуляцией (накоплением) тепла кожухом, действие кожуха сказывается лишь на количественном изменении взаимодействия нагретой зоны с окружающими аппарат стоками энергии.

С учетом этих ограничений приходим к тепловой модели аппарата в виде квазиоднородного анизотропного тела с формой и размерами нагретой зоны (рис. 1г).

Для изучения температурного поля полученной тепловой модели необходимо установить характер энергетических воздействий в системе тело – окружающая среда. В нагретой зоне действуют источники тепла (источниками тепла являются радиоэлементы, рассеивающие тепло в виде джоулевых потерь в активных элементах, потери на вихревые токи в трансформаторах, дросселях и т. д.), которые характеризуются некоторой удельной мощностью w (Вт/м³). В общем случае мощность рассеивания может зависит от температуры (ϑ), времени (τ), если блок функционирует по определенным временным диаграммам, координат x, y, z , характеризующих характер распределения источников по объему нагретой зоны, т.е. $W=W(x, y, z, \vartheta, \tau)$. Естественно, если ограничиться только источниками тепла, то вся выделяемая тепловая энергия пойдет на нагревание элементов нагретой зоны, т.е. температура их начнет неограниченно возрастать во времени. Такие системы, с теплофизической точки зрения, являются неустойчивыми и могут функционировать лишь в течение строго определенного отрезка времени, т.е. являются аппаратами однократного или кратковременного действия. В практическом применении такие аппараты составляют небольшой процент. Основная масса РЭА предназначена для длительного функционирования, т.е. температура в нагретой зоне должна быть ограничена. А это значит, что наряду с источниками энергии система (рис. 1г) должна иметь стоки тепловой энергии, с удельной мощностью $Q(x, y, z, \vartheta, \tau) \frac{Вт}{м^3}$ в объеме нагретой зоны или с удельной мощностью $Q_s(S, \vartheta_s, \tau)$, размещенные на поверхности нагретой зоны (кожуха) аппарата.

Если будет иметь место тождество, начиная с момента начала функционирования аппарата

$$W=Q \text{ при } 0 < \tau \leq \infty, \quad (1)$$

то будем иметь «идеальную» систему охлаждения, так как прогрев аппарата будет полностью снят.

Если тождество (1) начнет выполняться спустя некоторое время $\tau_{уст}$ после начала функционирования аппарата:

$$W=Q, 0 < \tau \leq \tau_{уст}. \quad (2)$$

$$W \equiv Q, \tau_{уст.} < \tau < \infty, \quad (3)$$

– то элементы нагретой зоны аккумулируют определенную часть тепловой энергии (ΔI), определяемую интегралом

$$\Delta I = \int_v \int_0^{\tau_{уст.}} (W - Q) \cdot dv \cdot d\tau \text{ (Дж)},$$

что вызовет повышение температуры в различных точках аппарата до некоторого установившегося значения $\vartheta_{ст.}$, определяемого условием (3). Системы, в которых выполняются условия (1), (2), (3), с теплофизической точки зрения являются устойчивыми, т.е. способными к многократному, длительному функционированию. Для РЭА, устойчивая тепловая система лишь тогда будет удовлетворять нормальным условиям работы аппарата, когда она обеспечивает требуемый тепловой режим; т.е. приходим к задаче синтеза тепловой системы, включающей в себя собственно радиоэлектронный аппарат и систему охлаждения (стоки тепла) с заданным тепловым режимом. Дифференциальное уравнение теплопроводности для квазизнородного, анизотропного твердого тела (рис.1г) с источниками (W), а также объемными (Q) и поверхностными (Q_s) стоками тепловой энергии, граничные и начальные условия запишутся в следующем виде :

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} = \frac{1}{c\gamma} \operatorname{div}[\lambda \cdot \operatorname{grad}\vartheta] + \frac{W}{c\gamma} - \frac{Q}{c\gamma}, \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{d\vartheta}{dn} \Big|_s = Q_s, \quad (5)$$

$$\vartheta(x, y, z, 0) = 0, \quad (6)$$

$$\vartheta(x, y, z, \nu) = t(x, y, z, \tau) - t_c, \quad (7)$$

где $c(x, y, z)$ – удельная теплоемкость, Дж/кг.град.;

$\gamma(x, y, z)$ – плотность, кг/м³; $\lambda(x, y, z)$ – теплопроводность, Вт/м.град;

n – направление нормали к поверхности нагретой зоны;

t – температура окружающей среды, °С.

Исследования [3] показывают, что для интервала температурных режимов РЭА, не превышающих 100 °С, теплофизические коэффициенты c , λ , γ практически не зависят от температуры. Зависимость λ от координат выражается анизотропностью вдоль основных осей x, y, z , перпендикулярных к поверхности граней нагретой зоны и кожухом. Учет зависимости c и γ от координат, W и Q от температуры и времени может быть осуществлен, если использовать численные методы решения уравнения теплопроводности (4) – (7), например, метод элементарных балансов [4].

Для получения аналитического решения и выявления параметров синтеза и их влияния на температурный режим (правильное наложение ограничений) примем следующие ограничения:

$$c(x, y, z, \vartheta) \equiv c, \quad \gamma(x, y, z, \vartheta) \equiv \gamma,$$

$$W(x, y, z, \vartheta, \tau) = W(x, y, z), \quad Q(x, y, z, \vartheta, \tau) = Q_0 + q_0 \cdot \vartheta; \quad Q_s = k \cdot \vartheta, \quad (8)$$

где q_0 – температурный коэффициент мощности, или его принято называть для жидкостных и газовых систем охлаждения объемным коэффициентом теплообмена, Вт/м². град. Из (8)

следует, что объемные стоки тепла (Q) распределены равномерно по всему объему нагретой зоны, а поверхностные стоки – по поверхности, и мощность их линейно растет с ростом температуры элементов и поверхности нагретой зоны РЭА. Такая схема, как показывает литературный обзор, типично для существующих систем охлаждения. С учетом влияния кожуха выражение для K примет вид:

$$K = \frac{K^{iii} \cdot \frac{S_k}{S}}{1 + \frac{K^{iii} \cdot S}{\alpha \cdot S_k}}, \quad (9)$$

где K – коэффициент теплообмена поверхности кожуха с окружающей средой, Вт/м².град.;

K^{iii} – коэффициент теплообмена через газовую прослойку от нагретой зоны к кожуху, Вт/м².град.;

α – коэффициент теплообмена между поверхностью кожуха и окружающей средой.

Методика расчета K^{iii} и α для поверхностей кожуха и газовых прослоек приведена в работах [1,3,4,5]. Исследования показывают, что расчеты коэффициентов K^{iii} и α для нестационарных режимов следует вести по стационарной температуре. Совпадение экспериментальных данных и расчетов получаются при этом наилучшими [3,4,5].

С учетом ограничений (8) уравнение теплопроводности (4), начальные и граничные условия для анизотропных нагретых зон РЭА в форме параллелепипеда, если начало прямоугольной системы координат поместить в центр параллелепипеда, а распределение источников и условия теплообмена (стоков) на гранях параллелепипеда принять симметричными, примут вид:

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} = \frac{1}{c\gamma} \left[\lambda_x \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \lambda_y \frac{d^2\vartheta}{dy^2} + \lambda_z \frac{d^2\vartheta}{dz^2} \right] + \frac{W(x, y, z)}{c\gamma} - Q_0(x, y, z) - \frac{q_v\vartheta}{c\gamma}, \quad (10)$$

$$\left[\lambda_i \frac{d\vartheta}{di} + k_i\vartheta \right]_{i=l_i} = 0, \quad i=x,y,z, \quad (11)$$

$$\left. \frac{d\vartheta}{di} \right| = 0, \quad i=x,y,z, \quad (12)$$

$$\vartheta(x, y, z, 0) = 0, \quad (13)$$

где $2l_i$ – длина стороны параллелепипеда соответственно вдоль осей x, y, z .

Список литературы: 1. Дульнев Г.Н., Тарнавский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л.: «Энергия», 1971. 287 с. 2. Дульнева Н.М. Исследование тепловых режимов радиоэлектронных блоков в микромодульном исполнении: Автореф. диссертации канд. техн. наук / Л, 1972. 21 с. 3. Майко И.М., Синотин А.М. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности нагретых зон РЭА // Вопросы радиоэлектроники. 1972. № 2. 6 с. 4. Майко И.М. Исследование нестационарных тепловых режимов РЭА: Автореф. диссертации канд. техн. наук / ЭНИН. 1971. 5. Майко И.М., Синотин А.М., Дединов Ю.М. О теплофизическом конструировании одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом // Вопросы радиоэлектроники. 1974. № 1. 8 с. 6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Госэнергоиздат. 1952. 7. Михеев М.А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат. 1956. с. 315.