

В. И. АЗАРЕНКОВ, ст. препод. НТУ «ХПИ»;
А. С. КУЦЕНКО, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

На основе решения уравнения теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда с аналогичными источниками тепла предлагаются математическая и тепловая модели и инженерная методика расчета температурного режима радиоэлектронной аппаратуры различного конструктивного исполнения.

Ключевые слова: тепловая модель, инженерная методика, уравнение теплопроводности, температурный режим.

На основі рішення рівняння теплопровідності для прямокутного паралелепіпеда з аналогічними джерелами тепла пропонуються математична і теплова моделі та інженерна методика розрахунку температурного режиму радіоелектронної апаратури різного конструктивного виконання.

Ключові слова: теплова модель, інженерна методика, рівняння теплопровідності, температурний режим.

Based on the solution of the heat equation for a rectangular parallelepiped pas similar heat source is proposed engineering method of calculation of the thermal regime of the design of electronic equipment.

Keywords: thermal model, engineering method, heat equation, the temperature regime.

Введение. С появлением интегральных схем с высокой плотностью размещения активных элементов на кристалле и с появлением плат, содержащих сотни интегральных схем, вопросы теплового расчета и проектирования надежной РЭА встали перед конструкторами так остро, как никогда прежде. Практика показала, что в этих условиях обеспечение теплового режима работы элементов и изделий электронной аппаратуры (ЭА) является одним из основных факторов обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры [1–3]. Дополнительные аспекты этой проблемы возникают при каждом новом достижении в области электрических характеристик приборов, например, при повышении быстродействия логических интегральных схем или увеличении выходной мощности аналоговых схем. Следовательно, в перспективе следует ожидать еще большее обострение вопросов проблемы теплофизического конструирования изделий РЭА.

Влияние изменения температуры на надежность аппаратуры проявляется, во-первых, в изменении (обратимом и необратимом) электрических параметров и характеристик изделий, во-вторых, в зависимости показателей надежности изделий от температуры.

Зависимость электрических характеристик и параметров элементов электронной аппаратуры от температуры в настоящее время изучено доста-

точно хорошо. Задача конструктора в этом случае сводится к обеспечению работы этих элементов в некотором заданном диапазоне температур, в котором, при предложенном схемотехническом решении, заданных условиях эксплуатации, существующей температурной зависимости параметров выбранной элементной базы, изменение выходного параметра изделия будет находиться в пределах оговоренной нормы.

Таким образом, проблема обеспечения заданного теплового режима РЭА является актуальной.

Анализ существующих методов и постановка задачи. Прежде чем перейти к обзору и анализу методов, позволяющих рассчитывать тепловые поля РЭА, целесообразно провести их предварительную классификацию [4].

Существующие методы решения краевых задач, описывающих температурное поле исследуемой РЭА, можно классифицировать по различным признакам [5]. Один из наиболее удобных, на наш взгляд, – в форме, в которой получаются результаты решений. Следуя выбранному критерию, можно выделить четыре класса или вида методов анализа тепловых полей РЭА: эмпирические, аналитические, численные и смешанные.

Следуя [5], отметим, что методы могут быть точными и приближенными. Среди аналитических методов встречаются и те и другие. Численные, смешанные и эмпирические методы всегда относятся к приближенным по своему определению, так как базируются на приближенной замене исходных дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений и систем уравнений их конечно-разностными (или иными) аппроксимациями для дискретных точек рассматриваемой области. В этом их недостаток.

Численным методам решения задач теплопроводности посвящено много специальных работ [5, 6] и др. Детальный анализ численных методов дан в [7], где отмечены основные недостатки последних: отсутствие, несмотря на отдельные теоретические успехи, способов получения априорных оценок погрешности получаемого решения; необходимость больших затрат вычислительного времени.

Основным достоинством численных методов следует считать возможность проводить математическую реализацию выбранных тепловых моделей с любой степенью детализации и возможность решать сложные краевые задачи.

Разработка конструкции РЭА охватывает ряд этапов, важнейшим из которых является этап проектирования [8]. Последний включает в себя и обеспечение теплового режима изделия. На основе анализа температурного поля конструкции проектировщик стремится выбрать наилучший вариант путем перебора различных предлагаемых решений. Такой подход на современном уровне развития науки и техники дает основание предположить, что в ближайшие годы математические модели инженерных задач тепло- и массопереноса начнут все чаще формулироваться как модели задач

оптимального управления [5, 9]. В связи с этим возрастает роль точных аналитических методов решения краевых задач для уравнения теплопроводности, в ряде случаев позволяющая представить общее решение в универсальном виде, удобном для оценки теплового режима твердого тела и выделения преобладающих факторов теплообмена с целью использования последних для оптимизации компоновки РЭА по тепловому режиму.

Известны различные математические методы решения краевых задач теплопроводности [10]. Интересна, на наш взгляд, классификация аналитических методов названных выше задач, приведенная в [11], согласно которой в настоящее время в теории теплопроводности применяются классические методы, методы интегральных преобразований, вариационные методы, методы линеаризации, проекционные методы, интегральные методы, методы сведения краевой задачи к уравнениям и задачам других типов.

В работах [12, 13, 14, 15] получено решение уравнения теплопроводности методом Фурье для твердого тела формы параллелепипеда с источником тепла аналогичной формы и неравномерном теплообмене с граней нагретой зоны при нулевых начальных и граничных условиях третьего рода. Это решение и положено в основу разработки инженерной методики и универсального алгоритма расчета температурного режима аппаратуры различного конструктивного исполнения: стойка, шкаф, блок, субблок, плата, модуль, микросхема и т.п., пригодные для инженерных и компьютерных расчетов, обеспечивающие возможность эффективного перебора и сравнения различных вариантов конструкции, выбора способа охлаждения, габаритов и теплофизических характеристик конструкции и анализа их теплового режима без больших материальных и временных затрат.

Разработка тепловой модели. Радиоэлектронный аппарат представляет собой с теплофизической точки зрения сложную систему тел в виде набора большого количества источников тепла – радиокомпонентов, размещенных на монтажных платах или шасси, которые помещаются в оболочку-кожух изделия.

На основании обзора и анализа различных тепловых моделей РЭА в работе [16] показано, что игнорирование некоторых конструктивных особенностей изделия и источников тепла может привести к значительному снижению точности результатов расчетов. Особо отмечена возможность изменения формы тепловой модели при сохранении неизменной картины анализируемого температурного поля изделия. В [12, 17] экспериментально доказана возможность перехода к тепловой модели РЭА в виде квазиоднородного твердого тела с источниками тепла.

Подводя итог предыдущих исследований [12], можно утверждать, что тепловая модель радиоэлектронных аппаратов в виде квазиоднородного анизотропного тела с простой геометрической формой и размерами нагретой зоны и источниками тепла аналогичной формы позволяет создать единые

(универсальность) алгоритм и метод расчета тепловых режимов практически всех типов конструкций аппаратов и элементов РЭА [13].

Решение задачи анализа теплового состояния РЭА. Подход к решению рассматриваемой задачи строится на общем решении уравнения теплопроводности, полученном методом разделения переменных для тел и источников тепла формы параллелепипеда (рис. 1). Для инженерных расчетов

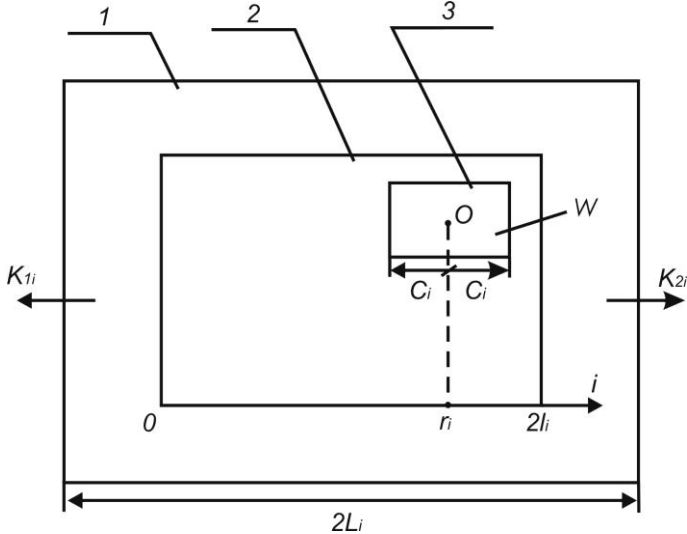


Рис. 1 – Тепловая модель изделия: 1 – кожух; 2 – нагретая зона; 3 – источник тепла; K_{1i} , K_{2i} – коэффициенты теплоотдачи с противоположных граней нагретой зоны в окружающее пространство; r_i – координата источника тепла; $2C_i$ – размер источника тепла; W – удельная мощность рассеивания источника тепла; $2L_i$ – размер нагретой зоны; $2L_i$ – размер кожуха аппарата; $i = x, y, z$ – координаты.

можно использовать только первый член суммы бесконечного ряда Фурье. В этом случае из-за несимметричного размещения источника тепла в нагретой зоне данное допущение повлечет необходимость искать выражение для функции влияния, чтобы сохранить приемлемой точность вычислений по первому члену ряда. Перегрев в любой точке конструкции для любого конечного числа N источников тепла можно определить по формуле [12, 13, 18]:

$$\vartheta(x, y, z) = \sum_{j=1}^N \vartheta_j(x, y, z) f_{вд j}, \quad (1)$$

где $\vartheta_j(x, y, z)$ – собственный перегрев j -го источника, $^{\circ}\text{C}$, определяется выражением:

$$\vartheta_j = \frac{64W_j}{\sum_{i=x,y,z} \left(\frac{\mu_i}{l_i}\right)^2 \lambda_i} \prod_{i=x,y,z} \frac{\sin \mu_i \frac{C_{ij}}{l_i} \cos \mu_i \left(\frac{r_{ji}}{l_i} - 1\right)}{2\mu_i + \sin 2\mu_i}, \quad (2)$$

$f_{вл j}$ – функция влияния j -го источника на интересующую координату конструкции анализируемого изделия:

$$f_{вл j} = \prod_{i=x,y,z} f_{вл ji}, \quad (3)$$

$$f_{вл ji} = \begin{cases} \frac{K_i i + \lambda_i}{K_i r_{ji} + \lambda_i}, & \text{если } r_{ji} \geq i; \\ \frac{K_i (2l_i - i) + \lambda_i}{K_i (2l_i - r_{ji}) + \lambda_i} & \text{если } r_{ji} \leq i. \end{cases}; \quad (4)$$

μ – собственные числа характеристического уравнения:

$$\operatorname{ctg} \mu_i = \frac{\mu_i}{Bi_i}, \quad (5)$$

Bi – Число Био – критерий подобия стационарного теплообмена между нагретым или охлажденным твёрдым телом и окружающей средой:

$$Bi_i = \frac{K_i \cdot l_i}{\lambda_i}, \quad (6)$$

λ – эффективная теплопроводность нагретой зоны при условии, что теплопроводность внутри источников тепла равна бесконечности, $\frac{Bm}{m\text{-град}}$.

В результате расчетов получаем искомую температуру в нужной точке конструкции (искомые перегревы в анализируемых координатах). При необходимости, используя тот же алгоритм и те же математические зависимости, можно рассчитать распределение температуры внутри интересующих источников тепла. При этом, считая интересующий нас источник тепла нагретой зоной и выделив в нем источники тепла, проводятся аналогичные расчеты распределения температуры внутри данного источника.

Алгоритм и методика инженерного расчета теплового режима РЭА.

1. Подготавливаются исходные данные [18]. В конструкции выделяется нагретая зона, источники тепла. Определяются размеры нагретой зоны, размеры и координаты источников тепла. Вычисляются площади поверхности изделия, нагретой зоны, источников, объемы изделия, нагретой

зоны, источников, удельная поверхностная мощность, удельная объемная мощность. Определяются эффективные теплопроводности нагретой зоны и коэффициенты теплопередачи.

2. Вычисляются критерии Био (6), находятся собственные числа характеристического уравнения (5).

3. По формуле (2) вычисляются собственные перегревы источников в условиях изделия.

4. По формуле (1) с использованием зависимостей (3) и (4) вычисляются перегревы в искомым точках. Принятое допущение, что внутри источника теплота $\lambda = \infty$, означает, что в последнем принимается равномерное распределение температуры. Расчет ведется по координатам геометрических центров источников. Полученный результат соотносится ко всему объему, рассеивающему тепло.

Пример расчета теплового режима. На примере расчета теплового режима стойки управления газовой станции «КВАРЦ–2М» (представлена на рис. 2 в обычном и приоткрытом состоянии; конструктив включает 18 блоков и 2 панели) была продемонстрирована универсальность и работоспособность

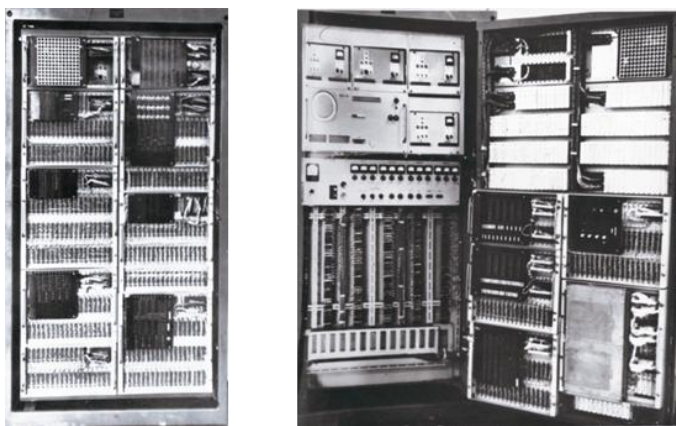


Рис. 2 – Внешний вид стойки управления «КВАРЦ–2М»

предлагаемой инженерной методики, показан алгоритм её использования и экспериментально проверены полученные в результате расчета значения перегревов в различных точках изделия. Примеры использования методики и алгоритма на примере стойки «КВАРЦ–2М» опубликованы в работах [12, 19]. Все теоретические расчеты были проверены в результате специально проводившихся экспериментальных замеров температуры внутри выбранных блоков и элементов. Подробные расчеты и результаты измерений приведены в [12, 19] (см. таблицу ниже) и оказались весьма удовлетворительными. Полученные результаты подтверждают адекватность модели, что и позволило утвердить данную методику в виде стандарта предприятия [18].

Выводы. В результате применения разработанной методики мы получаем возможность определить приближённое значение средней температуры любого выделенного объёма анализируемой конструкции РЭА, а в результате следующего цикла подобных расчетов, можем получить и распределение температуры внутри этого же объёма.

Полученные результаты подтверждают адекватность модели и работоспособность разработанной методики и могут быть использованы в реальных конструкторских разработках.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений перегревов блоков стойки «КВАРЦ–2М»

Название блока	Расчетное значение		Эксперимент
	удельная мощность рассеивания, Вт/м ³	средний перегрев блока, °С	среднее значение перегрева блока °С
БП1	7195,67	16,2	17,0
БП2	6893,38	20,4	17,5
БП3	6791,26	17,0	17,2
БП4	3815,36	18,3	12,0
У	735,85	6,1	4,9
ШПО	69,42	9,7	8,2
ЗРД	1067,21	8,2	5,6
ДД	789,28	3,4	2,3
БЗ	876,84	5,9	5,3

Список литературы: 1. *Роткоп, Л. Л.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА [Текст] / *Л. Л. Роткоп, Ю. Е. Спокойный.* – М. : Советское радио, 1976. – 230 с. 2. *Дульнев, Г. Н.* Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах [Текст] / *Г. Н. Дульнев, Э. М. Семьяшкин.* – Л. : Энергия, 1968. – 360 с. 3. *Дульнев, Г. Н.* Тепловые режимы электронной аппаратуры [Текст] / *Г. Н. Дульнев, Н. Н. Тарковский.* – Л. : Энергия, 1971. – 286 с. 4. *Азаренков, В. И.* Анализ методов расчета температурных полей РЭА [Текст] / *В. И. Азаренков // Восточно-европейский журнал передовых технологий.* – 2006. – Вып. 4/3 (22). – С. 20–36. 5. *Коздоба, Л. А.* Методы решения нелинейных задач теплопроводности [Текст] / *Л. А. Коздоба.* – М. : Наука, 1975. – 282 с. 6. *Самарский, А. А.* Введение в теорию разностных схем [Текст] / *А. А. Самарский.* – М. : Наука, 1971. – 338 с. 7. *Потягайло, А. Ю.* Методы анализа теплового режима системы тел и их приложение в приборостроении. Автореферат кандидатской диссертации [Текст] / *А. Ю. Потягайло.* – Л. : ЖТМО, 1976. – 18 с. 8. *Преснухин, Л. Н.* Основы конструирования микроселекционных вычислительных машин [Текст] / *Л. Н. Преснухин, В. А. Шахнов, В. А. Кустов.* – М. : Высшая школа, 1976. – 276 с. 9. *Егоров, А. И.* Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами [Текст] / *А. И. Егоров.* – М. : Наука, 1978. – 464 с. 10. *Беляев, Н. М.* Методы нестационарной теплопроводности [Текст] / *Н. М. Беляев, А. А. Рядно.* – М. : Высшая школа, 1978. – 328 с. 11. *Бицадзе, А. В.* Уравнения математической физики [Текст] / *А. В. Бицадзе.* – М. : Наука, 1976. – 296 с. 12. *Азаренков, В. И.* Исследование температурных полей и разработка теплофизических методов конструирования многоблочной

электронно-релейной аппаратуры автоматических систем управления газовой промышленности. Конструкционная надежность [Текст] : отчет по НИР Гр № 75041325 // *В. И. Азаренков, И. М. Майко, О. В. Хомицкий [и др.]*. – Х. : ХИРЭ. – 137 с. **13.** *Азаренков, В. И.* К вопросу разработки общего подхода к расчету нестационарных температурных полей электронных аппаратов различной геометрической формы [Текст] / *В. И. Азаренков* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – Вып. 5/2 (17). – С. 64–68. **14.** *Азаренков, В. И.* Алгоритм инженерного расчета теплового режима радиоэлектронной аппаратуры систем управления [Текст] / *В. И. Азаренков, И. М. Майко, А. А. Чернышенко* // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики : Республ. межвед. науч.-техн. сб. – 1980. – Вып. 54. – С. 130–133. **15.** *Азаренков, В. И.* Исследование и разработка тепловой модели и методов анализа температурных полей конструкций радиоэлектронной аппаратуры [Текст] : тез. докл. междунар. науч. конф. «Научная периодика славянских стран в условиях глобализации». – Ч.1. Том «Фундаментальные исследования» (окт. 2012) / *В. И. Азаренков* // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Вып. 3/1 (5). – С. 39–40. **16.** *Азаренков, В. И.* Анализ тепловых моделей РЭА [Текст] / *В. И. Азаренков* // Вестник национального технического университета «ХПИ» : сб. науч. тр. – Х., 2006. – Вып. 10. – С. 39–46. **17.** *Азаренков, В. И.* Экспериментальное исследование эффективной теплопроводности в электронных аппаратах с малой плотностью монтажа [Текст] / *В. И. Азаренков, А. М. Синотин* // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2005. – Вып. 140. – С. 111–117. **18.** *Азаренков, В. И.* СТП 8830–2–79. Комплексная система управления качеством продукции. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета тепловых режимов [Текст] / *В. И. Азаренков, О. М. Дерфель, И. М. Майко, О. В. Хомицкий, А. А. Чернышенко* // Стандарт предприятия ВНИПИАСУГазПром. – Х., 1979. – 30 с. **19.** *Азаренков, В. И.* Анализ теплового режима стойки «КВАРЦ» [Текст] / *В. И. Азаренков, И. М. Майко, А. Л. Оксман [и др.]* // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности : Реферативный сборник ВНИПИАСУГазПром. – 1979. – Вып. 5. – С. 5–7.

Надійшла до редколегії 12.12.2012