

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

Н. С. Образцов, А. М. Ткачук, Н. А. Смирнова

***КОНСТРУИРОВАНИЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ***

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

для студентов специальностей
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»
и «Техническое обеспечение безопасности»
дневной формы обучения

Минск 2007

УДК 621.396.6 (075.8)

ББК 32.844 я 73

О-23

Образцов, Н. С.

О-23 Конструирование радиоэлектронных устройств : лаб. практикум для студ. спец. «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Техническое обеспечение безопасности» днев. формы обуч. / Н. С. Образцов, А. М. Ткачук., Н. А. Смирнова. – Минск : БГУИР, 2007. – 34 с. : ил.

ISBN 978-985-488-235-2

В лабораторном практикуме рассмотрены вопросы влияния тепловых воздействий на работоспособность РЭУ, теплообмена в конструкциях РЭС, а также даны примеры расчетов теплопроводности и теплового сопротивления.

УДК 621.396.6 (075.8)

ББК 32.844 я 73

ISBN 978-985-488-235-2

© Образцов Н. С., Ткачук А. М.,
Смирнова Н. А., 2007

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2007

СОДЕРЖАНИЕ

1	Анализ и расчет тепловых режимов РЭС.....	4
1.1	Тепловой режим и его характеристика.....	4
1.2	Некоторые закономерности стационарных тепловых полей	5
1.3	Уравнение теплового баланса для стационарного теплового режима системы тел с источниками энергии.....	6
1.4	Тепловые модели РЭС	8
1.5	Тепловой режим блока РЭС в герметичном корпусе с крупными деталями на шасси.....	10
1.6	Среднеповерхностная температура корпуса герметичного блока РЭС	13
1.7	Тепловой режим РЭС в перфорированном корпусе при естественной вентиляции РЭА	14
1.8	Общая принудительная вентиляция	17
2	Инженерные методики расчета теплового режима блоков РЭС.....	18
2.1	Методика расчета теплового режима блоков РЭС в герметичном корпусе	18
2.2	Методика расчета теплового режима блоков РЭС в перфорированном корпусе	20
2.3	Методика расчета теплового режима блока с принудительной вентиляцией	21
	Лабораторная работа №1	
	Исследование тепловых характеристик герметичного блока РЭА	23
	Лабораторная работа №2	
	Исследование тепловых характеристик перфорированного блока РЭА	24
	Лабораторная работа №3	
	Исследование тепловых характеристик герметичного блока РЭА с принудительной вентиляцией.....	25
	Лабораторная работа №4	
	Исследование теплового поля герметичного блока РЭА.....	26
3	Радиаторы охлаждения полупроводниковых приборов.....	26
	Лабораторная работа №5	
	Исследования эффективности использования радиаторов для локального обеспечения теплового режима в полупроводниковых приборах при естественном охлаждении.....	32
	Литература	33

1 АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЭС

1.1 Тепловой режим и его характеристика

При конструировании РЭС надо уметь рассчитать защиту устройства как в целом, так и отдельных составных частей от тепловых воздействий, т.е. обеспечить тепловой режим конструкции.

В процессе эксплуатации РЭС подвергается воздействиям температур различных источников, которыми являются не только окружающая среда, но и сама эксплуатируемая техника. Любой реальный блок РЭУ с точки зрения теплофизики представляет собой систему многих тел с источниками тепловой энергии, сложным образом распределенными в пространстве конкретного блока. Выделение тепловой энергии производят активные элементы схемы в результате потребляемой электроэнергии. Величина выделяемой в виде тепла энергии зависит от номинальной мощности всех активных и частично пассивных элементов блока и его КПД. В целом баланс потребляемой энергии можно представить в виде уравнения:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{полез}} + P_{\text{нагрев}} + P_{\text{рассеив}}.$$

В результате рассеивания тепловой энергии в блоке устанавливается неоднородное, неравномерно распределенное температурное или тепловое поле. Это пространственно-временное распределение температурного поля является тепловым режимом блока. Основной характеристикой теплового режима блока является температура:

$$T = T(x, y, z, t) = T(P),$$

а также перегрев $J = t_i - t_c = J(P)$. (1)

Расчеты ведут для того, чтобы сопоставить рассчитанные температурные характеристики теплового режима с предельно допустимыми температурами, на которые рассчитаны комплектующие элементы РЭС. При выполнении условия

$$T(x, y, z) \leq T_{\text{max доп}} \quad (2)$$

тепловой режим считается нормальным.

Для различных элементов РЭУ $T_{\text{max доп}}$ различны, следовательно, расчет ведут по минимально теплостойким элементам, т.е. по минимальному значению $T_{\text{max доп}}$.

Современные изделия РЭС имеют тенденцию к увеличению плотности компоновки, т.е. к выбору минимальных элементов, следовательно, уменьшаются внешние габаритные размеры, а значит, увеличивается выделение объемной плотности неиспользованной энергии, что приводит к напряженности теплового поля. Таким образом, при разработке надо предусматривать отводы тепла, охлаждение, термокомпенсацию и т.д., иначе у РЭС будет уменьшаться надежность.

1.2 Некоторые закономерности стационарных тепловых полей

Анализ теплового поля РЭС основывается на понятиях: принципа суперпозиции, температурного фона и локального перегрева и принципа местного влияния. Поочередно рассмотрим каждый из них.

1 *Принцип суперпозиции тепловых полей.* Если блок рассматривать как систему с большим количеством источников, то результирующее температурное поле этих систем подчиняется принципу суперпозиции полей.

Если мощность источников теплоты, теплопроводность отдельных частей системы и ее коэффициенты теплоотдачи не зависят от температуры, то в любой точке стационарная температура зависит от мощности всех источников теплоты системы.

Математическим выражением принципа суперпозиции является аналог закона Ома:

$$\Delta t_{ji} = t_j - t_C = P_i \cdot F_{ji},$$

откуда
$$t_j = t_C + \sum_{i=1}^{n-1} P_i F_{ji} \quad (3)$$

без учета источника в данной точке j , т.е. учитывается $n - 1$ источников.

2 *Температурный фон и локальная температура в аппаратуре.* t_j рассматривается относительно точки j как температурный фон, т.е. $t_{j \text{ фон}}$, а

$$J_j = \Delta t_j = (t_j - t_C) - \text{фоновый перегрев},$$

т.е.
$$J_{j \text{ фон}} = \sum_{i=1}^{n-1} P_i F_{ji}. \quad (4)$$

Фоновый перегрев определяется суммой мощностей всех источников системы, кроме источников в данной точке.

Кроме фонового перегрева существует и собственный перегрев от источника энергии в данной точке: $J_{j \text{ собст}} = t_{j \text{ собст}} - t_C$. Тогда суммарная температура в j -й точке представляет локальную температуру j -й точки:

$$t_K = t_{j \text{ фон}} + t_{j \text{ собст}} \quad (5)$$

или
$$J_{jK} = t_C + J_{j \text{ фон}} + J_{j \text{ собст}}.$$

3 *Принцип местного влияния, или локальный перегрев.* При анализе тепловых полей от группы источников важно учесть особенности теплообмена на границе тепловых полей. Эту особенность влияния граничных условий на суммарное температурное поле учитывает принцип местного влияния.

Любое местное возмущение теплового поля является локальным, т.е. не распространяется на удаленные участки поля (рисунок 1).

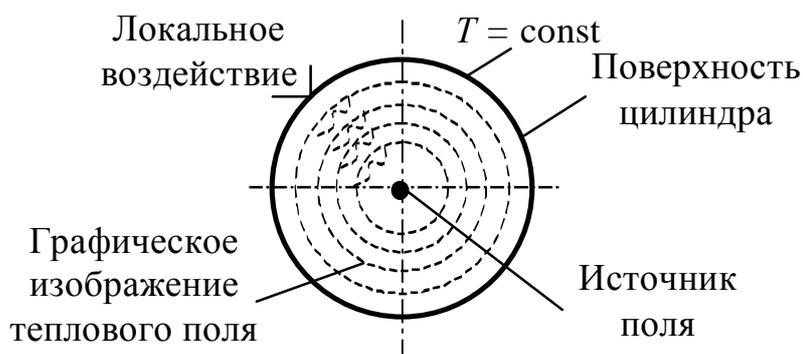


Рисунок 1

Локальное воздействие вызовет только местное возмущение, при удалении от места воздействия это возмущение уменьшается.

Этот принцип позволяет значительно упростить расчеты.

Пример 1

Пусть в объеме конструкции источники распределены неравномерно, но выделяемая ими энергия одинакова.

Согласно принципу местного влияния можно утверждать, что на равном удалении от каждого источника будет равный перегрев, наводимый ими.

Пример 2

Известно, что вблизи любого элемента температурное поле зависит от его формы, размера, характера распределения тепловой энергии.

Согласно принципу местного влияния можно считать, что наведенный перегрев в точке конструкции не зависит от размеров и конфигурации источников, если они удалены от этой точки на соответствующее расстояние.

1.3 Уравнение теплового баланса для стационарного теплового режима системы тел с источниками энергии

Рассмотрим простейшую систему, состоящую из трех тел, находящихся в однородной среде, в которой происходит теплообмен как между телами, так и

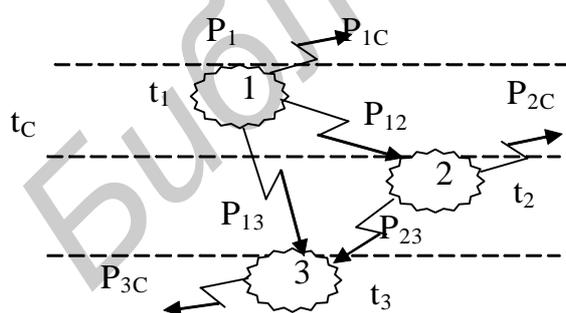


Рисунок 2

и телами и средой: $t_1 > t_2 > t_3 > t_{\text{среды}}$ (рисунок 2). В теле 1 действует источник тепла P_1 .

Составим уравнение теплового баланса при теплообмене, учитывая, что первое тело отдает тепло в среду P_{1c} второму и третьему телам P_{12} и P_{13} ; второе тело, принимая тепло P_{12} , отдает в окружающую среду P_{2c} и третьему телу P_{23} ; третье принимает P_{23} и P_{13} ,

отдает P_{3c} .

$$\left. \begin{aligned} 1\text{-е тело: } P_1 &= P_{1c} + P_{12} + P_{13}; \\ 2\text{-е тело: } P_{12} &= P_{2c} + P_{23}; \\ 3\text{-е тело: } P_{3c} &= P_{13} + P_{23}; - \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

а) рассмотрим следующий подход: тепловые потоки выразим через тепловые сопротивления и разности температур:

$$\begin{aligned} P_{12} &= s_{12} (t_1 - t_2); & P_{1c} &= s_{1c} (t_1 - t_c); \\ P_{13} &= s_{13} (t_1 - t_3); & P_{2c} &= s_{2c} (t_2 - t_c); \\ P_{23} &= s_{23} (t_2 - t_3); & P_{3c} &= s_{3c} (t_3 - t_c); \end{aligned} \quad (7)$$

подставим (7) в (6):

$$\begin{cases} P_1 = s_{1c} (t_1 - t_c) + s_{12} (t_1 - t_2) + s_{13} (t_1 - t_3), \\ 0 = s_{12} (t_2 - t_1) + s_{2c} (t_2 - t_c) + s_{23} (t_2 - t_3), \\ 0 = s_{13} (t_3 - t_1) + s_{23} (t_3 - t_2) + s_{3c} (t_3 - t_c). \end{cases} \quad (8)$$

Обобщим (8) в виде

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^{n+1} s_{ji} (t_j - t_i), \quad (9)$$

где n – число тел в системе +1 (среда).

Такую систему уравнений решают методом последовательных приближений;

б) выразим уравнения (6), но через перегрев:

$$\begin{aligned} P_{12} &= s_{12} [(t_c + J_1) - (t_c + J_2)] = s_{12} (J_1 - J_2); & P_{1c} &= s_{1c} J_1; \\ P_{13} &= s_{13} (J_1 - J_3); & P_{2c} &= s_{2c} J_2; \\ P_{23} &= s_{23} (J_2 - J_3); & P_{3c} &= s_{3c} J_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставим (10) в (6):

$$\begin{cases} P_1 = (s_{12} + s_{13} + s_{1c}) J_1 - s_{12} J_2 - s_{13} J_3, \\ 0 = -s_{12} J_1 + (s_{12} + s_{23} + s_{2c}) J_2 - s_{23} J_3, \\ 0 = -s_{13} J_1 - s_{23} J_2 + (s_{13} + s_{23} + s_{3c}) J_3. \end{cases} \quad (11)$$

Обобщим (11) в виде

$$\sum_{i=1}^n s_i (J_j - J_i) = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (12)$$

Решается система методом тепловых характеристик. Если надо найти температуру, то по произвольно заданным перегревам рассчитываются соответствующие им $P: P_1 \rightarrow J_1, P_2 \rightarrow J_2, P_3 \rightarrow J_3$, значения которых откладывают на координатных осях (рисунок 3), получая график тепловых характеристик. По

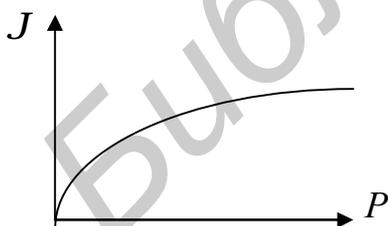


Рисунок 3

графику определяют перегрев области для заданной мощности источника тепла.

1.4 Тепловые модели РЭС

Анализ тепловых полей РЭС путем математического описания – задача очень сложная. Практикой выработаны другие методы, когда анализ и решения задачи выполняются приближенными методами с большим количеством ограничений, условностей, допущений по отношению к реальному объекту. На определенном этапе проектирования это достигается путем замены реального блока его тепловой моделью (рисунок 4), которая реализуется математически и адекватна изучаемому объекту.

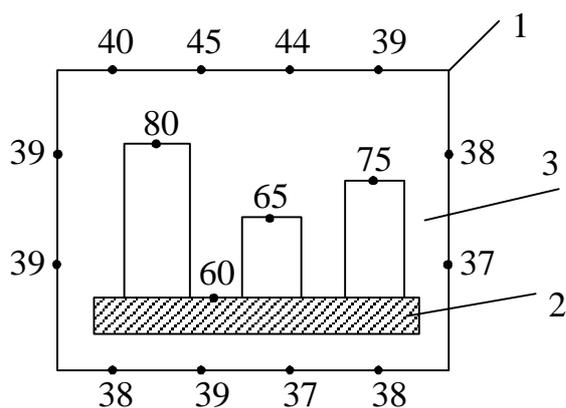


Рисунок 4

На рисунке 4 схематично представлена конструкция блока РЭС: корпус 1, шасси 2 с крупными радиоэлементами и среда 3, а также указана температура различных участков блока, что и является тепловой моделью блока. Плату или шасси с элементами в тепловой модели называют нагретой зоной. Недостаток такого схематичного изображения нагретой зоны состоит в том, что сложно рассчитать площадь поверхности, охватывающей зону нагрева. Для упрощения расчета площади поверхности нагретой зоны в тепловой модели ее представляют простейшей геометрической фигурой – прямоугольным параллелепипедом с определенными геометрическими параметрами ($l_1 \times l_2 \times h_3$) (рисунок 5).

Получаем более грубую, но удобную для расчета тепловую модель в виде системы двух тел:

- 1 – оболочка кожуха корпуса;
- 2 – нагретая зона в форме прямоугольного параллелепипеда.

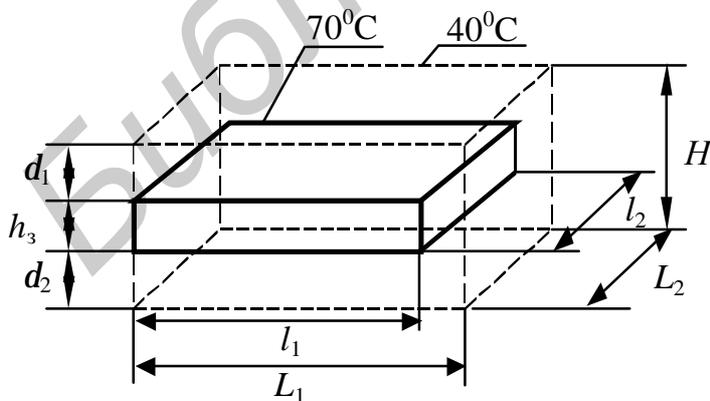


Рисунок 5

параллелепипеда (нагретой зоны). Для определения h_3 вводят понятие коэффициента заполнения:

Параметры нагретой зоны можно условно разделить на геометрические и температурно-энергетические. Геометрические параметры тепловой модели принято соотносить с габаритами блока. Так, горизонтальные параметры соответствуют горизонтальным размерам кожуха корпуса, т.е. $l_1 = L_1$; $l_2 = L_2$, а h_3 – высота

$$k_{зан} = \frac{V_3}{V_{блока}} = \frac{\sum V_{дет} + V_{шасси}}{V_{блока}} = \frac{l_1 l_2 h_3}{L_1 L_2 H}, \text{ тогда } k_{зан} = \frac{h_3}{H},$$

откуда получаем

$$h_3 = k_{зан} H. \quad (13)$$

Следовательно, площадь поверхности нагретой зоны

$$S_3 = 2 \cdot (l_1 l_2) + 2 h_3 (l_1 + l_2) = [(l_1 l_2) + h_3 (l_1 + l_2)]. \quad (14)$$

Теплоэнергетическими характеристиками блока являются:

1) мощность тепловыделения $P = \sum_{i=1}^n P_i,$ (15)

где P_i – мощность элементной базы;

2) среднеповерхностная температура – \bar{t}_3 , т.к. поверхность нагретой зоны считают изотермической, а также \bar{t}_k и $\bar{t}_в$.

Цель расчета теплового режима на первом этапе – определение интегральных тепловых характеристик: средних поверхностных температур корпуса блока (\bar{t}_k), нагретой зоны (\bar{t}_3) и среднеобъемной температуры среды между ними (воздуха) – $\bar{t}_в$.

Таким образом, тепловой режим блока характеризуют $T = f(t_k, t_3, t_в)$.

При разработке тепловых моделей следует руководствоваться принципом иерархии: начинать тепловое моделирование надо с последнего, более крупного уровня, на котором учитываются мощности всех источников, внешнее и полное внутреннее тепловое воздействие. Следует учесть характеристики общей системы охлаждения приборного корпуса, взаимное влияние модулей и элементов. Только после этого можно рассматривать теплообмен на других, более мелких уровнях блока. Это модели первой группы.

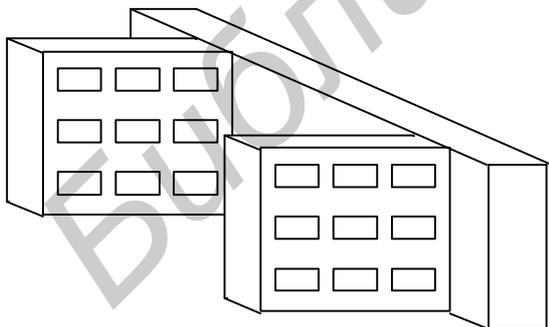


Рисунок 6

В тепловых моделях второй группы нагретая зона представляется в виде однородного анизотропного тела. Такой подход обоснован тем, что некоторые РЭУ (например ТЭЗы) содержат большое количество одинаковых элементов (микросхем, модулей). Так как ИМС стандартны по размерам, способу сборки, монтажа, то их можно рассматривать как элементарную конструктивную ячейку, которая повторяется на плате в трех

измерениях, и тогда типовой элемент замены можно рассматривать как квазиоднородное тело. Эта система обладает дальним порядком. В такой модели прослеживается аналогия с твердым кристаллическим телом, свойства которого характеризуются теплопроводностью и теплоемкостью. Основными

характеристиками модели являются эффективная теплопроводность и эффективная теплоемкость, которые удобно искать для элементарной ячейки (т.е. микромодулей). См. расчеты в [1], приложение Б.6.

1.5 Тепловой режим блока РЭС в герметичном корпусе с крупными деталями на шасси

Рассмотрим тепловой режим блока в герметичном корпусе. Тепловая модель представлена на рисунке 7. Заданы суммарная мощность, поэлементно равная $P = \sum P_i$; температура корпуса – t_k ; степени черноты всех поверхностей – e_i и габаритные размеры $L_1 \times L_2 \times H$. Надо найти среднеповерхностную температуру нагретой зоны – \bar{t}_3 .

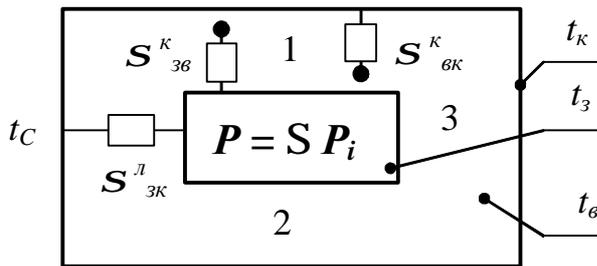


Рисунок 7

Рассмотрим теплообмен блока с окружающей неограниченной средой. Данный теплообмен можно разбить на два этапа:

- 1) внутренний теплообмен (до стенок корпуса);
- 2) внешний теплообмен.

Проанализируем эти два этапа для реального блока.

Первый этап:

а) конвективный обмен. Если шасси блока – горизонталь, то конвективное движение воздуха развивается только в верхней части аппаратуры – над шасси, т.е. в объеме воздушной прослойки, ограниченной крышкой корпуса блока и поверхностью верхних ЭРЭ, расположенных на шасси. Обозначим эту область в тепловой модели 1. Под шасси конвекция практически отсутствует, так как более нагретые поверхности расположены выше более холодной поверхности дна корпуса, обозначим эту область 2;

б) лучистый теплообмен. Представляет передачу тепла к внутренним стенкам корпуса через воздух, который практически прозрачен для лучистой энергии. В этом теплообмене участвуют только периферийные поверхности элементов, так как излучение центральных деталей и шасси не достигает стенок корпуса блока из-за их расположения в глубине зоны и экранирования соседними телами;

в) кондуктивный теплообмен. На основании опытов и практики установлено, что кондуктивные связи шасси с корпусом блока слабо влияют на тепловой режим нагретой зоны аппарата.

Второй этап: внешний теплообмен блока – передача тепловой энергии от корпуса блока в окружающую среду конвекцией и излучением.

$$\text{Таким образом, } P = \sum_{i=1}^n P_i = P_{зк}^{внут} = P_{кс}^{внеш} = P_{к}^{внеш} + P_{л}^{внеш} . \quad (16)$$

Теплообмен блока можно представить в виде тепловой схемы (рисунок 8), где

$s_{KC} = \sum_{i=1}^2 s_i = s_{KC}^K + s_{KC}^L$, и описать системой уравнений теплового баланса:

$$\begin{cases} P_{3K} = s_{3B}^K (J_3 - J_B) + s_{3K}^L (J_3 - J_K), \\ s_{3B}^K (J_3 - J_B) = s_{BK}^K (J_B - J_K), \\ P_{KC} = s_{KC} (V_K - V_C). \end{cases} \quad (17)$$

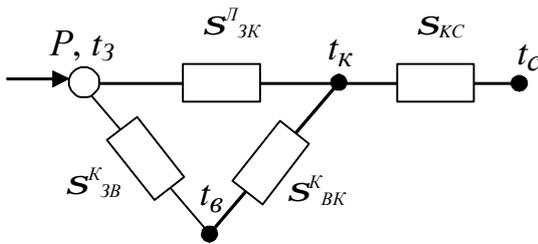


Рисунок 8

Для определения t_3 тепловую энергию, передаваемую от нагретой зоны к корпусу, выразим как

$$P_{3K} = s_{3K} (t_3 - t_K),$$

откуда $t_3 = t_K + \frac{P_{3K}}{s_{3K}}$. (18)

Учтем, что t_K и $P_{3K} = P = \sum_{i=1}^n P_i$ заданы,

требуется определить $s_{3K} = \sum_{i=1}^2 s_i = s_{3K}^L + s_{3K}^K$.

(19)

Рассмотрим в уравнении (19) каждое слагаемое в отдельности.

Первое слагаемое s_{3K}^L :

$$s_{3K}^L = a_L S_3 = c_0 e_{3K,np} j_{3K} f(t_3, t_K), \quad (20)$$

где $e_{3K,np}$ – приведенная степень черноты, учитывает степень черноты тепло-обменивающихся поверхностей. При $e_3, e_K \geq 0,8$ $e_{3K,np} = e_3 e_K$;

j_{3K} – степень облученности той поверхности, на которую падает излучение. В данном случае $j_{3K} = 1$, так как все излучение зоны поглощается внутренними стенками корпуса блока;

$c_0 f(t_3, t_K)$ – табличная величина, определяемая для конкретных условий;

S_3 – площадь поверхности нагретой зоны, $S_3 = 2[l_1 l_2 + h_3(l_1 + l_2)]$.

Рассмотрим второе слагаемое s_{3K}^K . При расчете конвективного переноса тепла от зоны к корпусу следует учесть условия конвективного теплообмена. Нагретая зона – параллелепипед, где отдельные элементы – плоские поверхности, ориентированные неодинаково (вертикально и горизонтально). Параллелепипед образует со стенками корпуса каналы (или зазоры) разной ширины. На этом основании для РЭС с горизонтально ориентированным шасси

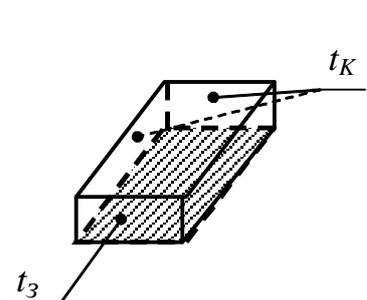
можно выделить три канала – 1, 2, 3 (рисунок 7), в которых рассмотрим конвективный теплообмен. Учтем, что если теплообмен идет в ограниченном пространстве

в каналах, то конвективная передача тепла заменяется конвективно-кондуктивной теплопередачей и коэффициент конвективного теплообмена заменяется на конвективно-кондуктивный коэффициент теплообмена: $a \approx k$, следовательно,

$$S_{зк}^k = \sum_{i=1}^3 k_i S_i = k_1 S_1 + k_2 S_2 + k_3 S_3, \quad (21)$$

где 1, 2 и 3 – соответствующие зоны на рисунке 7.

Для первой зоны (рисунок 9):



$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = N_{\Gamma} \left[6,25 - 5,25 \left(1 + \frac{d}{\sqrt{l_1 \cdot l_2}} \right)^{-1,67} \right] A_5 \sqrt[4]{\frac{t_3 - t_K}{S}}, \\ \text{где } N_{\Gamma} = 1,35, \\ S_1 = l_1 l_2. \end{array} \right.$$

Рисунок 9

Для второй зоны имеем зазор, прилегающий ко дну корпуса, в котором конвективный теплообмен отсутствует, а существует только кондукция через

слой воздуха, т.е.

$$k_2 = \frac{l_{возд}}{d_2}, \quad S_2 = l_1 l_2.$$

Для третьей зоны:

$$k_3 = 0,5 (k_1 + k_2);$$

$$S_3 = 2 h_3 l_1 + 2 h_3 l_2 = 2 h_3 (l_1 + l_2).$$

Подставляя уравнения для трех зон в (21) и учитывая (19), получим

$$S_{зк} = k_1 l_1 l_2 + k_2 l_1 l_2 + 2 h_3 k_3 (l_1 + l_2) + e_{зкпр} f(t_3, t_K) [(l_1 l_2) + h_3 (l_1 + l_2)]. \quad (22)$$

Далее путем преобразований уравнения (22) получено:

для горизонтально ориентированного шасси:

$$S_{зк} = 24 l_1 l_2 \left[1 + k_{заполн} \frac{H}{l_2} \left(1 + \frac{l_2}{l_1} \right) \right] \cdot \frac{B_{\Gamma}}{K}$$

для вертикально ориентированного шасси:

$$S_{зк} = 30 l_1 l_2 \left[1 + k_{заполн} \frac{H}{l_2} \left(1 + \frac{l_2}{l_1} \right) \right] \cdot \frac{B_{\Gamma}}{K}$$

(23)

В частности, если использовать типовые условия эксплуатации и конструкций РЭА: $(t_K \sim t_3) = (20 \dots 60)^\circ\text{C}$; $e_0 \geq 0,8$; $e_{3Knp} = e_1 e_2$, получают

$$a = k = (4,6 \dots 8,4), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}},$$

откуда $\bar{a} \approx 6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}},$

тогда $S_{3K} = 6 S_3$ и $t_3 = t_K + \frac{P}{6 S_3}.$ (24)

1.6 Среднеповерхностная температура корпуса герметичного блока РЭС

В общем случае тепловая энергия, выделяемая поверхностью корпуса РЭС, передается среде и соседним телам, совокупность которых может рассматриваться как условная среда

$$\Delta t = t_K - t_C = \frac{P}{S_{KC} + S_{Ki}},$$

где S_{Ki} – тепловая проводимость для условной среды.

Если исследуемый объект находится в неограниченной среде и влиянием других тел можно пренебречь, то $S_{Ki} = 0$:

тогда $t_K - t_C = \frac{P}{S_{KC}}$ или $t_K = t_C + \frac{P}{S_{KC}}.$ (25)

Пусть задан герметичный корпус аппарата размерами $L_1 \times L_2 \times L_3$, внутри которого действует источник мощностью P . Также задана температура среды t_C и давление вне аппарата H . Надо найти t_K , используя (25).

Для нахождения S_{KC} учтем теплообмен корпуса с окружающей средой (это конвекция и лучеиспускание) (рисунок 10):

$$S_{KC} = S_{KC}^K + S_{KC}^L. \quad (26)$$

Рассмотрим каждое из слагаемых.

Для излучения $S_{KC}^L = a_L S_K = e j f(t_K, t_C) S_K,$ (27)

$$S_K = 2 [L_1 L_2 + L_3 (L_1 + L_2)].$$

Для конвекции: при определении S_{KC}^K требуется учесть форму и ориентацию поверхности корпуса. Он состоит из трех пар плоских элементов,

ориентированных как горизонтально, так и вертикально: верх (крышка), дно и боковая поверхность, т.е.

$$S_{KC}^K = S_{KC}^{верх} + S_{KC}^{бок} + S_{KC}^{дно} = a_K^в S_в + a_K^б S_б + a_K^д S_д. \quad (28)$$

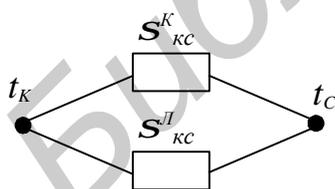


Рисунок 10

Для нахождения коэффициента теплоотдачи конвекцией в неограниченной среде воспользуемся

$$(T - T_c) \leq \left(\frac{0,84}{L} \right)^3,$$

в зависимости от выполнения или невыполнения которого есть два варианта решения – закон 1/4 или закон 1/3, откуда для горизонтально ориентированной поверхности с нагретой верхней стороной может быть

$$a_k^{\delta} = 1,30 \cdot A_3 \left(\frac{t_k - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{либо} \quad a_k = 1,34 \cdot A_3 (t_k - t_c)^{\frac{1}{3}},$$

где L – определяющий параметр – наименьшая сторона, для горизонтально ориентированной поверхности с нагретым дном

$$a_k^{\partial} = 0,70 \cdot A_2 \left(\frac{t_k - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{либо} \quad a_k = 0,70 \cdot A_2 (t_k - t_c)^{\frac{1}{3}},$$

для вертикально ориентированных плоских сторон нагретой боковой поверхности можно записать

$$a_k^{\bar{\delta}} = A_2 \left(\frac{t_k - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{либо} \quad a_k = A_3 (t_k - t_c)^{\frac{1}{3}},$$

$$S_{\delta} = L_1 L_2; \quad S_{\partial} = L_1 L_2; \quad S_{\bar{\delta}} = 2 L_3 (L_2 + L_1).$$

Вследствие того, что a_k зависит от искомой температуры t_k , задача нелинейна и ее решение можно получить либо методом тепловых характеристик, либо методом последовательных приближений.

Для типичных типоразмеров и температурных условий:

частный случай, если $T = 20 \dots 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $(t_k - t_c) = J \leq 10^{\circ}$; $L_3 = (0,1 \dots 0,5) \text{ м}$; то

$$\bar{a}_k = 5,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}, \quad a_{\bar{\delta}k} = (2,4 \dots 4,4) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}, \quad \text{следовательно, } \bar{a} = 9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}} \text{ и тогда}$$

$$S_{kc} = 9 S_k, \quad t_k = t_c + \frac{P}{9 S_k}. \quad (29)$$

1.7 Тепловой режим РЭС в перфорированном корпусе при естественной вентиляции РЭА

Для снижения теплового режима РЭС широко применяется метод перфорирования корпуса и шасси. Тепловая модель блока в перфорированном корпусе имеет вид, представленный на рисунке 11.

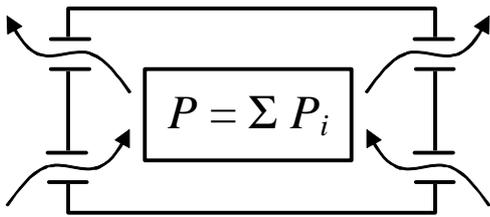


Рисунок 11

Внутри блока поступает воздух, движение которого вызвано разностью температур и давлений внутри и снаружи корпуса. Возникает его самотяга.

Теплообмен в таком блоке подразделяется на внутренний и внешний.

Теплообмен внутри блока. Тепловая энергия P , выделяемая нагретой зоной, передается излучением и конвекцией: излучением – внутренним стенкам корпуса, а также через отверстия в корпусе внешней среде, чем в дальнейшем будем пренебрегать; конвекцией – воздуху, протекающему внутри корпуса, от нагретой зоны и внутренних поверхностей корпуса. Тепловая энергия Q (или ее эквивалент W), полученная конвективно воздухом, через перфорированные отверстия выносится в окружающую среду.

Внешний теплообмен. От корпуса тепловая энергия, величина которой $P_K = P - Q$, излучением и конвекцией передается в окружающую среду.

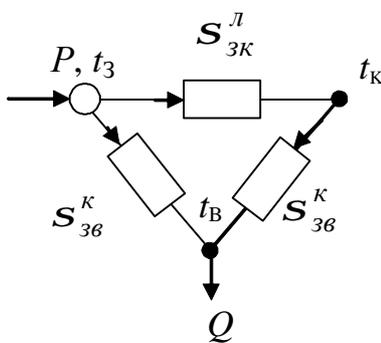


Рисунок 12

Процессы теплообмена можно представить в виде тепловой схемы (рисунок 12) и описать системой уравнений теплового баланса:

$$\begin{cases} P_K = P - Q ; \\ P = s_{3в}^к (J_3 - J_в) + s_{3к}^л (J_3 - J_к); \\ s_{3к}^л (J_3 - J_к) = s_{кв}^к (J_к - J_в) + s_{кс} (J_к - J_с). \end{cases} \quad (30)$$

Эта система полностью описывает процесс теплообмена в блоке, иногда ее дополняют аэродинамическими уравнениями. Преобразовав (30), получим:

$$\begin{cases} P = (s_{3к}^л + s_{кв}^к) J_3 - s_{3к} J_в - s_{3к} J_к; \\ 0 = -s_{3к} J_3 - (s_{3к} - s_{кв}^к - s_{кс}) J_к - s_{кв} J_в; \\ 0 = s_{3в}^к J_3 + (s_{3в}^к + s_{кв}^к) J_в - (s_{кв}^к + s_{кс}) J_к. \end{cases} \quad (31)$$

Из решения системы (31) получают уравнения для основных характеристик теплового режима перфорированного блока:

$$\begin{cases} J_3 = A_{3с} J_{вх} + F_{3с} P ; \\ J_к = A_{кс} J_{вх} + F_{кс} P ; \\ J_в = J_{вх} + \frac{P - s_{кс} J_к}{2Q}, \end{cases} \quad (32)$$

где $A_{3с}, F_{3с}, A_{кс}, F_{кс}$ – тепловые коэффициенты:

$$A_{3с} = D [s_{3к}^л + s_{кс} + s_{кв}^к \left(1 + \frac{s_{3к}^л}{s_{3в}^к} \right)];$$

$$F_{3C} = \frac{D}{S_{3B}} \left\{ S_{3K} + S_{KB} + S_{KC} + \frac{S_{3B}}{2Q} \left[S_{3K} + S_{KC} \left(1 + \frac{S_{KB}}{S_{3B}} \right) + S_{KB} \left(1 + \frac{S_{3K}}{S_{3B}} \right) \right] \right\};$$

$$A_{KC} = D \left[S_{3K} + S_{KB} \left(1 + \frac{S_{3K}}{S_{3B}} \right) \right];$$

$$F_{KC} = D \left\{ \frac{S_{3K}}{S_{3B}} \left(1 + \frac{S_{3B}}{2Q} \right) + \frac{S_{KB}}{2Q} \left(1 + \frac{S_{3K}}{S_{3B}} \right) \right\};$$

$$D^{-1} = S_{KB} \left(1 + \frac{S_{KB}}{2Q} \right) + \left(1 + \frac{S_{3K}}{S_{3B}} \right) \left[S_{KC} + S_{KB} \left(1 + \frac{S_{KC}}{2Q} \right) \right].$$

Следовательно, для расчета теплового режима перфорированного блока надо определить тепловые проводимости S_{3K}^L , S_{3B}^K , S_{KB}^K , S_{KC} .

Рассмотрим их описание:

1) $S_{3K}^L = a_L S_3$ (пренебрегаем уходом тепла через перфорированные отверстия) и описано формулой (20);

$$2) S_{3B}^K = a_K' S_3;$$

$$3) S_{KB}^K = a_K'' S_K'; \quad S_K' = S_K - S_i,$$

где S_i – суммарная площадь перфорационных отверстий.

Вместо S_K' берут S_K , излишек S будет компенсировать неучтенную потерю лучистой энергии через перфорационные отверстия.

a_K' и a_K'' – конвективные коэффициенты теплообмена соответственно с поверхностей нагретой зоны и внутренней поверхности корпуса.

Так как конвективная теплоотдача идет в одних и тех же каналах, то можно считать, что $a_K'' = a_K' = a_K$, где a_K определяется через критериальные уравнения, соответствующие принудительной конвекции, так как теплоотдача происходит в условиях движущейся среды.

Для выбора критериального уравнения надо использовать критерий Рейнольдса:

$$Re = u \frac{d_{эКВ}}{n_m}, \quad \text{где } d_{эКВ} = \frac{4 S_{\text{попереч}}}{l_{\text{перим}}},$$

где $S_{\text{попереч}}$ – площадь сечения верхнего отсека;

$l_{\text{перим}}$ – периметр верхнего отсека.

Рассмотрим варианты решения этого уравнения:

а) $Re < 2,3 \cdot 10^3$ – ламинарный закон; б) $Re > 4,0 \cdot 10^4$ – турбулентный закон.

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu_{\text{л}} = 0,13 \operatorname{Re}_f^{\frac{1}{3}} Gr_f^{0,1} e_L; \\ Nu = a_K \frac{l_m}{d_{\text{экв}}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Nu_T = 0,018 \operatorname{Re}_f^{0,8}; \\ Nu = a_K \frac{l_m}{d_{\text{экв}}} \end{array} \right.$$

$$4) s_{\text{кс}} = s_{\text{кс}}^{\text{к}} + s_{\text{кс}}^{\text{л}} = (a_{\text{к}} + a_{\text{л}}) S_{\text{к}} \quad (\text{см. подраздел 1.6}).$$

1.8 Общая принудительная вентиляция

Тепловая модель РЭА с принудительной вентиляцией сходна с моделью перфорированного блока (рисунок 13).

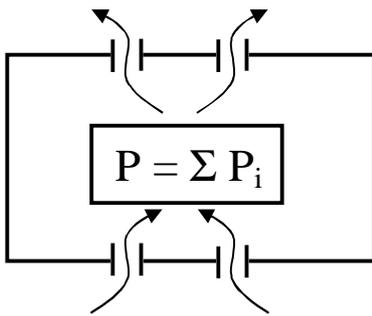


Рисунок 13

РЭА такого типа может быть с вертикально и горизонтально расположенным шасси. Особенностью теплообмена при принудительной вентиляции является то, что интенсивность теплообмена излучением между нагретой зоной и корпусом блока, окружающей средой в данных условиях продува ничтожно мала. Расчет основных характеристик теплового режима J_3 , $J_{\text{к}}$, $J_{\text{в}}$ проводится по тем же формулам, что и в подразделе 1.7 (32), но с учетом специфики процесса теплообмена и уточнением

тепловых коэффициентов:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_3 = A_{3\text{с}} J_{\text{вх}} + F_{3\text{с}} P; \\ J_{\text{к}} = A_{\text{кс}} J_{\text{вх}} + F_{\text{кз}} P; \\ J_{\text{в}} = J_{\text{вх}} + \frac{P - s_{\text{кс}} J_{\text{к}}}{2Q} \end{array} \right.$$

Исходными данными являются: суммарная мощность нагретой зоны, температура среды, подводимой для охлаждения, геометрические и физические параметры аппаратуры, а также расход среды, поступающей для охлаждения (G_m – массовый расход; G_V – объемный расход).

$$G_V = V S, \frac{\text{л}}{\text{с}}; \quad G_m = V r S, \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad \frac{G_V}{G_m} = \frac{1}{r}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

$$t_{\text{в}} = 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}).$$

Для упрощения расчета сделаем следующие допущения:

1 Если расход воздуха через аппарат достаточно велик, то можно заключить, что $s_{3\text{к}}^{\text{л}} \ll s_{3\text{в}}^{\text{к}}; s_{\text{кв}}^{\text{к}}; s_{\text{кс}}^{\text{к}}; s_{\text{кс}}^{\text{л}} \ll s_{\text{кс}}^{\text{к}}$.

2 Поскольку лучистый теплообмен между нагретой зоной и корпусом, а также между корпусом и средой слабо влияет на тепловой режим аппарата, то соответствующие $s_{зк}^л$ и $s_{кс}^л$ можно определить приближенно:

$$s_{зк}^л = 6 S_з; \quad s_{кс}^л = 9 S_к.$$

$$3 s_{зв}^к = a'_к S_з; \quad s_{кв}^к = a''_к S_к;$$

$a''_к$ и $a'_к$, будучи одинаковыми для конвективного теплообмена, в одном отсеке определяются из критериального уравнения для принудительной вентиляции.

$$Nu = 0,8 \sqrt{Re};$$

$$Re = u \frac{l'}{n_m}; \quad u = \frac{G_v}{S_{cp}}; \quad S_{cp} = S_{аппарата} (1 - K_{запол});$$

где l' – длина обдува, равная высоте деталей плюс шасси;

$S_{аппарат}$ – площадь поперечного сечения блока в направлении, перпендикулярном потоку.

4 В диапазоне температур 20 ... 60 °С теплоемкость (C_p), через которую определяется Q , слабо зависит от температуры и, следовательно, является величиной как бы постоянной: $C_p = 10^3, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, тогда $Q = C_p G_m \approx 10^3 \cdot G_m \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$.

5 Конвективный коэффициент теплоотдачи $a_{зв}^к$ является величиной больше или равной $10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ и позволяет найти коэффициент

$$F_{зс} = \frac{1}{a_{зв}^к S_з} + \frac{5 \cdot 10^{-4}}{G_m}.$$

Для общей принудительной вентиляции с учетом перечисленных допущений оценки тепловых параметров, входящих в (32), упрощаются:

$$A_{зс} = 1; \quad F_{зс} = \frac{1}{a_{зв}^к S_з} + \frac{5 \cdot 10^{-4}}{G_m}; \quad A_{кс} = 0,75; \quad F_{кс} = \frac{3,8 \cdot 10^{-4}}{G_m};$$

$$J_6 = J_{ex} + \frac{P - 9 \cdot S_к J_к}{2 \cdot 10^3 G_m}.$$

2 ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА БЛОКОВ РЭС

2.1 Методика расчета теплового режима блоков РЭС в герметичном корпусе

Тепловой режим РЭС в герметичном корпусе рассчитывается в следующем порядке:

1) поверхность корпуса блока:

$$S_k = 2 [L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_3];$$

2) условная поверхность нагретой зоны:

$$S_3 = 2 [L_1 L_2 + (L_1 + L_2) K_{3АП} L_3];$$

3) удельная мощность корпуса блока (где P – мощность, рассеиваемая в блоке):

$$q_k = \frac{P}{S_k};$$

4) удельная мощность нагретой зоны блока (где P – мощность, рассеиваемая в блоке):

$$q_{\text{зоны}} = \frac{P}{S_3};$$

5) коэффициент q_1 в зависимости от удельной мощности корпуса:

$$q_1 = 0,1472 q_k - 2,9692 \cdot 10^{-3} q_k^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} q_k^3;$$

6) коэффициент q_2 в зависимости от удельной мощности зоны:

$$q_2 = 0,1390 q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} q_3^3;$$

7) коэффициент k_1 в зависимости от давления вне корпуса (H_1 , Па):

$$k_{H1} = \frac{1}{0,92 + 0,46 \cdot 10^{-5} \cdot H_1} + 0,8;$$

8) коэффициент k_2 в зависимости от давления в корпусе (H_2 , Па):

$$k_{H2} = \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot H_2} + 0,8;$$

9) перегрев корпуса блока:

$$q_k = q_1 k_{H1};$$

10) перегрев нагретой зоны:

$$q_3 = q_k + (q_2 - q_1) k_{H2};$$

11) средний перегрев воздуха в блоке:

$$q_B = 0,5(q_K - q_3);$$

12) удельная мощность элемента:

$$q_{ЭЛ} = \frac{P_{ЭЛ}}{S_{ЭЛ}};$$

13) перегрев поверхности элемента:

$$q_{ЭЛ} = q_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{ЭЛ}}{q_3} \right);$$

14) перегрев среды около элемента:

$$q_{ЭС} = q_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{ЭЛ}}{q_3} \right);$$

15) температура корпуса:

$$T_K = q_B + T_C;$$

16) температура нагретой зоны:

$$T_3 = q_3 + T_C;$$

17) температура воздуха в корпусе:

$$T_B = q_B + T_C;$$

18) температура поверхности элемента:

$$T_{ЭЛ} = q_{ЭЛ} + T_C;$$

19) температура среды, окружающей элемент:

$$T_{ЭС} = q_{ЭС} + T_C.$$

2.2 Методика расчета теплового режима блоков РЭС в перфорированном корпусе

Рассчитываются:

1) площадь поверхности корпуса блока, площадь условной поверхности нагретой зоны, удельная мощность нагретой зоны, коэффициенты q_1 , q_2 , K_{H1} , K_{H2} определяются по пп. 1–8 подраздела 2.1;

2) суммарная площадь перфорированных отверстий:

$$S_{II} = \sum_{i=1}^n S_i ;$$

3) коэффициент перфорации:

$$\Pi = \frac{S_{\Pi}}{2 \cdot L_1 L_2};$$

4) функция коэффициента перфорации:

$$K_{\Pi} = 0,29 + \frac{1}{1,41 + 4,95 \Pi};$$

5) перегрев корпуса:

$$q_K = 0,93 q_1 K_{H1} K_{\Pi};$$

6) перегрев нагретой зоны:

$$q_3 = 0,93 K_{\Pi} [q_1 K_{H1} + K_{H2} (\frac{q_2}{0,93} - q_1)];$$

7) средний перегрев воздуха в корпусе:

$$q_B = 0,6 q_3;$$

8) удельная мощность элемента:

$$q_{ЭЛ} = \frac{P_{ЭЛ}}{S_{ЭЛ}};$$

9) перегрев поверхности элемента:

$$q_{ЭЛ} = q_3 (0,75 + 0,25 \frac{q_{ЭЛ}}{q_3});$$

10) перегрев среды, окружающей элемент:

$$q_{ЭС} = q_B (0,75 + 0,25 \frac{q_{ЭЛ}}{q_3});$$

11) температура корпуса:

$$T_K = q_B + T_C;$$

12) температура нагретой зоны:

$$T_3 = q_3 + T_C;$$

13) температура воздуха в блоке:

$$T_B = q_B + T_C;$$

14) температура поверхности элемента:

$$T_{ЭЛ} = q_{ЭЛ} + T_C;$$

15) температура среды, окружающей элемент:

$$T_{ЭС} = q_{ЭС} + T_C.$$

2.3 Методика расчета теплового режима блока с принудительной вентиляцией

Исходные данные: мощность, рассеиваемая в блоке (P), габаритные размеры корпуса L_1 , L_2 , L_3 , мощность нагруженных теплоэлементов (P_i), площади поверхностей (S_i), $K_{ЗАП}$, массовый расход G_m , расстояние в направлении движения воздуха от входного сечения l , T_B – температура воздуха на входе.

Порядок расчета:

1) средний перегрев воздуха в блоке:

$$q_B = 5 \cdot 10^{-4} \frac{P}{G_m};$$

2) площадь поперечного сечения корпуса:

$$S = L_1 L_2;$$

3) коэффициент в зависимости от массового расхода среды:

$$m_1 = 0,001 \cdot S^{-0,5};$$

4) $m_2 = (L_1 L_2)^{-0,406}$ – от поперечного сечения к направлению продувания;

5) $m_3 = (L_3)^{-1,059}$ – от высоты блока в направлении продува;

6) $m_4 = K_{зан}^{-0,42} (1 - K_{зан}^{2/3})^{0,5}$ – от коэффициента заполнения;

7) перегрев нагретой зоны с принудительным охлаждением:

$$q_3 = q_B + P m_1 m_2 m_3 m_4;$$

8) условная поверхность нагретой зоны:

$$S_3 = 2 [L_1 L_2 + K_{ЗАП} L_3 (L_1 + L_2)];$$

9) удельная мощность нагретой зоны:

$$q_3 = \frac{P}{S_3};$$

10) удельная мощность элемента:

$$q_{ЭЛi} = \frac{P_{ЭЛi}}{S_{ЭЛi}};$$

11) перегрев поверхности i -го элемента:

$$q_{ЭЛi} = q_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{ЭЛi}}{q_3} \right) \left(\frac{L_i}{L_3} + 0,5 \right);$$

где L_i – высота элемента;

12) перегрев среды, окружающей i -й элемент:

$$q_{ЭCi} = q_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{ЭЛi}}{q_3} \right) \left(\frac{L_i}{L_3} + 0,5 \right);$$

13) перегрев корпуса:

$$q_K = 0,93 q_1 K_{H1} K_{П};$$

14) перегрев нагретой зоны:

$$q_3 = 0,93 K_{П} \left[q_1 K_{H1} + K_{H2} \left(\frac{q_2}{0,93} - q_1 \right) \right];$$

15) средний перегрев воздуха в корпусе:

$$q_B = 0,6 q_3;$$

16) температура корпуса:

$$T_K = q_K + T_C;$$

17) температура нагретой зоны:

$$T_3 = q_3 + T_C;$$

18) температура воздуха в блоке:

$$T_B = q_B + T_C, \quad \text{где } T_C = T_{вх}.$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Исследование тепловых характеристик герметичного блока РЭА

Цель работы:

- изучить конструкцию герметичного блока радиоэлектронной аппаратуры и его тепловых характеристик при естественной конвекции;
- изучить способы общей герметизации РЭА;
- приобрести навыки в разработке сборочных чертежей печатных плат;
- изучить СТБ 1022-96, СТБ 1014-95, ГОСТ 29137-91.

Выполнение работы:

- 1 Уточните у преподавателя тип исследуемого корпуса РЭС.
- 2 Изучите технические данные радиоэлектронного прибора и его электрическую принципиальную схему.
- 3 По электрической схеме определите элементы, наиболее подверженные влиянию температуры.
- 4 Рассчитайте коэффициент заполнения объема прибора по формуле

$$K_3 = \frac{\sum V_{эл}}{V_{ан}},$$

где $\sum V_{эл}$ – суммарный объем элементов,

$V_{ан}$ – объем аппарата.

Объем прибора определяется по его габаритным размерам, а объем элементов V – по справочной литературе.

5 Включите исследуемый прибор и проведите измерения температуры во всех заданных точках корпуса. Измерения проводите через каждые 5 мин в течение 50 мин с использованием термодатчика и вольтметра В7-27.

6 По полученным экспериментальным данным для всех точек постройте графики нагрева прибора по времени.

7 Проведите расчет теплового режима прибора с помощью ЭВМ в диалоговом режиме и сравните полученные результаты с экспериментальными.

Исходные данные для расчета:

- давление окружающей среды $(100 \pm 4) \cdot 10^3$ Па;
 - давление внутри исследуемого прибора $(150 \pm 4) \cdot 10^3$ Па;
 - коэффициент заполнения объема прибора 0,4...0,7;
 - температура окружающей среды 20 ± 5 °С;
 - мощность, рассеиваемая в блоке, задается преподавателем.
- 8 Выполните сборочный чертеж печатной платы исследуемого прибора (задается преподавателем) с соблюдением требований ГОСТ 29137-91.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Исследование тепловых характеристик перфорированного блока РЭА

Цель работы:

- изучить конструкцию перфорированного блока радиоэлектронной аппаратуры и его тепловых характеристик при естественной конвекции;
- изучить способы общего экранирования РЭА;
- приобрести навыки в разработке сборочных чертежей печатных плат;
- изучить СТБ 1022-96, СТБ 1014-95, ГОСТ 29137-91.

Выполнение работы:

- 1 Уточните у преподавателя тип исследуемого корпуса РЭС.
- 2 Изучите технические данные радиоэлектронного прибора и его электрическую принципиальную схему.

3 По электрической схеме определите элементы, наиболее подверженные влиянию температуры.

4 Рассчитайте коэффициент заполнения объема прибора по формуле

$$K_3 = \frac{\sum V_{эл}}{V_{ан}},$$

где $\sum V_{эл}$ – суммарный объем элементов,

$V_{ан}$ – объем аппарата.

Объем прибора определяется по его габаритным размерам, а объем элементов по справочной литературе.

5 Включите исследуемый прибор и проведите измерения температуры во всех заданных точках корпуса. Измерения проводите через каждые 5 мин в течение 50 мин с использованием термодатчика и вольтметра В7-27.

6 По полученным экспериментальным данным для всех точек постройте графики нагрева прибора по времени.

7 Проведите расчет теплового режима прибора с помощью ЭВМ в диалоговом режиме и сравните полученные результаты с экспериментальными.

Исходные данные для расчета:

- давление окружающей среды $(100 \pm 4) \cdot 10^3$ Па;
- давление внутри исследуемого прибора $(150 \pm 4) \cdot 10^3$ Па;
- коэффициент заполнения объема прибора 0,4...0,7;
- температура окружающей среды 20 ± 5 °С;
- мощность, рассеиваемая в блоке, задается преподавателем;
- размеры суммарной площади перфорации отверстий: S , мм.

8 Выполните сборочный чертеж печатной платы исследуемого прибора (задается преподавателем) с соблюдением требований ГОСТ 29137-91.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Исследование тепловых характеристик герметичного блока РЭА с принудительной вентиляцией

Цель работы:

- научиться изучать конструкцию герметичного блока радиоэлектронной аппаратуры и его тепловых характеристик при принудительной вентиляции;
- научиться изучать способы общей герметизации РЭА;
- приобрести навыки в разработке сборочных чертежей печатных плат;
- изучить СТБ 1022-96, СТБ 1014-95, ГОСТ 29137-91.

Выполнение работы:

1 Уточните у преподавателя тип исследуемого корпуса РЭС.

2 Изучите технические данные радиоэлектронного прибора и его электрическую принципиальную схему.

3 По электрической схеме определите элементы, наиболее подверженные влиянию температуры.

4 Рассчитайте коэффициент заполнения объема прибора по формуле

$$K_3 = \frac{\sum V_{эл}}{V_{ан}},$$

где $\sum V_{эл}$ – суммарный объем элементов,

$V_{ан}$ – объем аппарата.

Объем прибора определяется по его габаритным размерам, а объем элементов по справочной литературе.

5 Включите исследуемый прибор и проведите измерения температуры во всех заданных точках корпуса. Измерения проводите через каждые 5 мин в течение 50 мин с использованием термодатчика и вольтметра В7-27.

6 По полученным экспериментальным данным для всех точек постройте графики нагрева прибора по времени.

7 Проведите расчет теплового режима прибора с помощью ЭВМ в диалоговом режиме и сравните полученные результаты с экспериментальными.

Исходные данные для расчета:

- давление окружающей среды $(100 \pm 4) \cdot 10^3$ Па;
- давление внутри исследуемого прибора $(150 \pm 4) \cdot 10^3$ Па;
- коэффициент заполнения объема прибора 0,4...0,7;
- температура окружающей среды 20 ± 5 °С;
- мощность, рассеиваемая в блоке, задается преподавателем.

8 Выполните сборочный чертеж печатной платы исследуемого прибора (задается преподавателем) с соблюдением требований ГОСТ 29137-91.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование теплового поля герметичного блока РЭА

Цель работы:

- научиться определять распределение энергии в радиоэлектронном аппарате;
- научиться определять температурные режимы отдельных элементов радиоэлектронного аппарата;
- научиться строить температурное поле аппарата;
- научиться определять тепловые параметры аппаратов с помощью стандартных программ ПЭВИ:

Выполнение работы:

1 Изучите схему радиоэлектронного аппарата и определите рассеиваемую мощность внутри аппарата. Можно считать, что коэффициент нагрузки резисторов равен 0,5, а коэффициент нагрузки ИМС и полупроводниковых элементов равен 0,4. Определить ориентировочный объем элементов.

2 Измерьте размеры корпуса аппарата, определите коэффициент заполнения по объему и, приняв тепловую модель аппарата в виде нагретой зоны, определите среднюю температуру нагретой зоны (с помощью компьютера).

3 Определите температуры элементов в аппарате и постройте температурные поля аппарата.

Содержание отчета

Элементы электрической схемы устройства

Наименование, тип, марка	Кол-во эл-тов в группе n	Рассеиваемая мощность P_i , Вт	Установочный объем V_i	Мощность, рассеиваемая эл-том группы $n P_i$	Установочный объем группы $n V_i$

3 РАДИАТОРЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В радиотехнических устройствах тепловая энергия выделяется в отдельных узлах и приборах, которые размещены неравномерно по объему аппарата, в отдельных его точках получается концентрация тепловой энергии, сопровождаемая резким повышением температуры. При конструировании РЭА конструктор обязан предусмотреть меры по отводу тепла от конкретных участков. Одним из способов отвода тепла от отдельных сильно нагреваемых устройств является использование радиаторов.

Теплоотводящие радиаторы различаются между собой формой ребер, способом осуществления теплового контакта и мощностью теплового рассеяния. Наибольшее распространение в РЭА получили радиаторы с ребрами пластинчатой, ребристой, штырьковой и игольчатой форм. Типовые конструкции радиаторов с установленными на них источниками тепла показаны на рисунке 14.

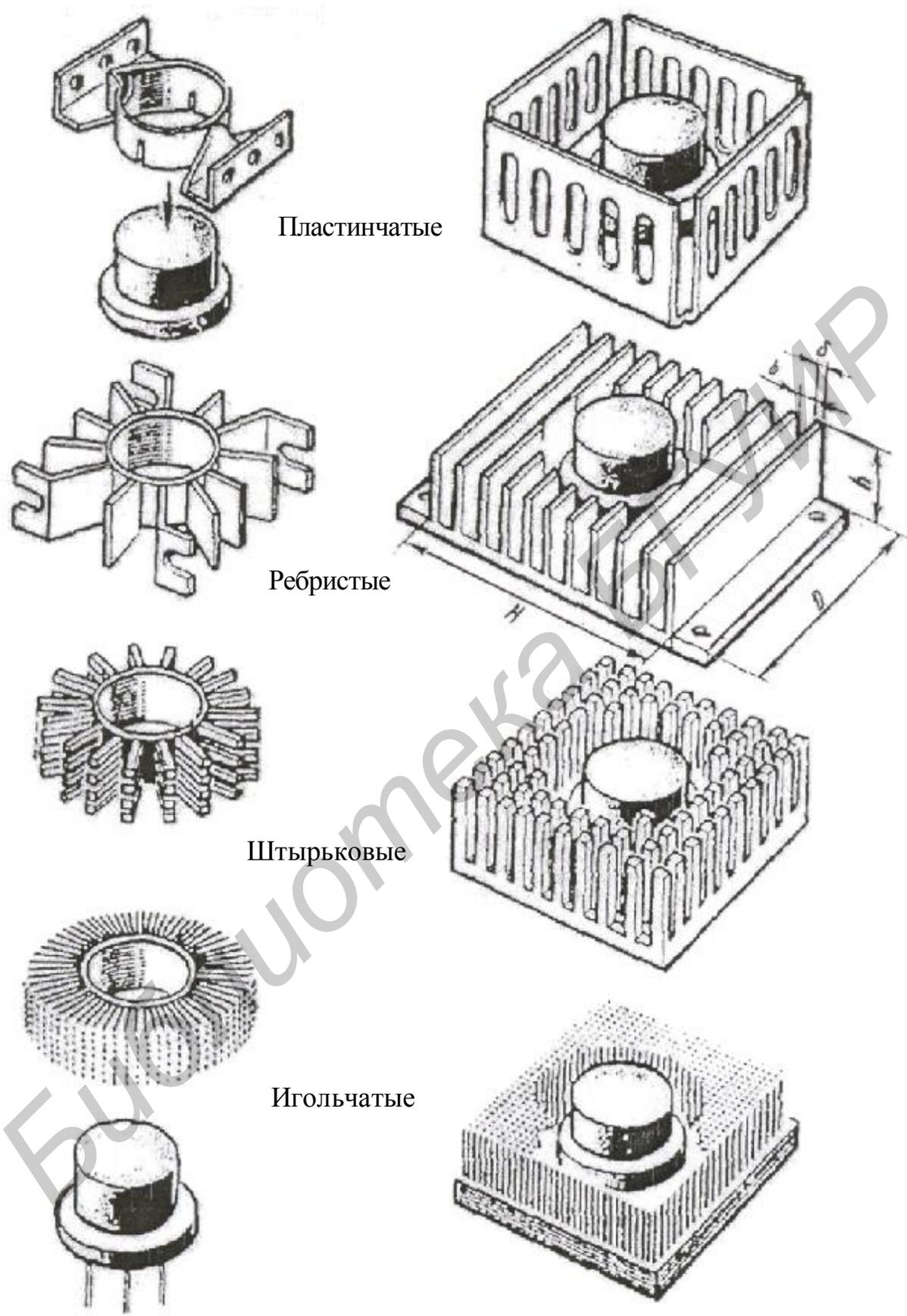


Рисунок 14

Пластинчатые радиаторы изготавливают из листовой стали или листового проката алюминиевых сплавов толщиной от 2 до 6 мм. Из-за сравнительно малой эффективности такие радиаторы используются для отвода тепла небольших мощностей.

Ребристые радиаторы при одинаковых размерах с пластинчатыми более эффективны. Их изготавливают из алюминиевых или магниевых сплавов способом литья с последующей обработкой контактных площадок до 6...7-го классов чистоты поверхности.

Штырьковые радиаторы имеют более высокий коэффициент теплообмена, чем ребристые, и изготавливаются преимущественно литьем под давлением.

Игольчатые радиаторы в несколько раз эффективнее штырьковых, однако сложность изготовления и сравнительно большая стоимость несколько сдерживают их применение.

Эффективность теплообмена радиаторов находится в прямой зависимости от количества и размеров ребер, а также их от взаимного расположения. Наименьшая толщина ребра определяется технологическими возможностями литья, а минимальный размер между соседними плоскостями ребер рекомендуется делать не менее 4...6 мм из-за необходимости образования на стенках ребер пограничного слоя охлаждающего воздуха наименьшей толщины.

Для обеспечения теплового контакта с наименьшим термическим сопротивлением между источником тепла и радиатором устанавливаются мягкие прокладки с высокой теплопроводностью (алюминий, свинец, олово). Если необходимо электроизолировать источник тепла от радиатора, то оксидируют контактную плоскость или используют прокладки из оксидированного алюминия.

В целях ликвидации между ребрами застоя пограничного слоя охлаждающего воздуха и обеспечения его турбулентности поверхность ребер оксидируют или на нее наносится глянцево-лакокрасочное покрытие.

Расчет радиаторов заключается в определении его геометрических размеров при заданной мощности теплового рассеяния, температуре окружающей среды и максимально допустимом нагреве корпуса охлаждаемого элемента. Однако может быть поставлена и другая задача: определить допустимый тепловой режим активного элемента, установленного на готовом радиаторе.

Суммарную поверхность охлаждения радиатора можно определить по формуле

$$S = \frac{0,86 Q}{a (T - T_c)}, \quad (33)$$

где T – температура поверхности радиатора, К;

T_c – температура окружающей среды, К;

Q – мощность рассеяния тепла источником, Вт;

α – коэффициент теплообмена, состоящий из суммы коэффициентов теплообмена боковых a_{K1} и торцевых a_{K2} плоскостей ребер и теплообмена излучением $a_{Л3}$, $a = a_{K1} + a_{K2} + a_{Л3}$.

Приведем порядок расчета теплообмена для нормального атмосферного давления.

Для боковых плоскостей ребер длиной D , установленных вертикально:

$$a_{K1} = 6,36 \left(\frac{T - T_c}{D} \right)^{0,25}.$$

Для ребер, расположенных горизонтально и вершиной вверх,

$$a'_{K1} = 8,61 \left(\frac{T - T_c}{H} \right)^{0,25}.$$

Для ребер, расположенных горизонтально и вершиной вниз,

$$a''_{K1} = 4,70 \left(\frac{T - T_c}{H} \right)^{0,25}.$$

Для торцевых плоскостей ребер радиатора

$$a_{K2} = 0,6 \left(\frac{T - T_c}{d^5} \right)^{0,125}.$$

Коэффициент теплообмена при излучении

$$a_{Л3} = 5,6 \cdot \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4}{T - T_c} \cdot \frac{b}{b + 2h},$$

где ε – степень черноты;

T – температура радиатора, К;

T_c – температура окружающей среды, К;

b – расстояние между стенками ребер, м;

h – высота ребер, м.

Коэффициент теплообмена при внешнем давлении, отличающемся от нормального, будет иметь вид

$$a_K^o = a_K \sqrt{\frac{P}{P_0}}.$$

Приведенные формулы позволяют определить параметры радиатора или тепловой режим установленного на нем активного элемента с практически допустимой погрешностью 10...15 %.

Для естественного охлаждения размеры основания радиатора более 0,150 x 0,150 и высота ребер более 0,04 м становятся малоэффективными, и

делать их большими нецелесообразно. Обребрение поверхности охлаждения становится необходимым лишь тогда, когда соблюдается условие

$$\frac{2l}{ad} > 5.$$

Пример 1

Требуется определить размеры радиатора ребристого типа, предназначенного для охлаждения транзистора мощностью 20 Вт. Максимально допустимая температура нагрева его корпуса $T_K = 333 \text{ K}$, максимальная температура окружающей среды $T_C = 313 \text{ K}$. Покрытие поверхности радиатора глянцевое, лакокрасочное. Транзистор устанавливается на основании радиатора со стороны необребренной поверхности. Термическое сопротивление контактной плоскости установки транзистора принимаем равным 0,25 К/Вт.

Решение

1 Зададим геометрические размеры ребра $\delta \leq 0,003 \text{ м}$, $b = 0,004 \text{ м}$, $h = 0,02 \text{ м}$, $D = 0,08 \text{ м}$.

2 Определим составляющие общего коэффициента теплообмена:

$$T = T_K - 0,25 \cdot 20 = 328 \text{ K},$$

$$a_{K1} = 6,36 \left(\frac{15}{0,08} \right)^{0,25} = 23,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}),$$

$$a_{K2} = 0,6 \left(\frac{15}{0,003^5} \right)^{0,125} = 0,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}),$$

$$a_{ЛЗ} = \frac{5,67 \cdot 0,9 \cdot \left[\left(\frac{328}{100} \right)^4 - \left(\frac{313}{100} \right)^4 \right]}{328 - 313} \cdot \frac{0,004}{0,004 + 2 \cdot 0,02} = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}).$$

Тогда общий коэффициент теплообмена

$$\alpha = 23,5 + 0,75 + 0,61 = 24,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}).$$

3 Площадь поверхности охлаждения радиатора определим из формулы (33):

$$S = \frac{0,86 \cdot 20}{24,9 \cdot 15} = 0,0461 \text{ м}^2.$$

4 Длина всех ребер радиатора:

$$H_S = \frac{S}{D} = \frac{0,0461}{0,08} = 0,576 \text{ м}.$$

Отсюда определим количество ребер:

$$n = \frac{H_s}{2h + d + b} = \frac{0,576}{2 \cdot 0,02 + 0,003 + 0,004} = 12.$$

5 Ширина основания радиатора:

$$H = [n(\delta + b)] - b = [12 - (0,003 + 0,004)] - 0,004 = 0,08 \text{ м.}$$

Пример 2

Расчет пластинчатого радиатора.

Исходные данные:

- мощность, рассеиваемая транзистором в рабочем режиме, P , Вт..... 1,42;
- температура окружающей среды T_{OC} , °C..... +35;
- максимальная температура перехода $T_{П}$, °C..... +125;
- тепловое сопротивление переход–корпус $R_{П-К}$, °C/Вт..... 3,3;
- контактное сопротивление корпус–теплопровод $R_{К-Т}$, °C/Вт..... 0,5;
- толщина пластины, м..... $5 \cdot 10^{-3}$;
- высоты пластины k , м..... $25 \cdot 10^{-3}$.

Решение

1 Рассчитаем среднюю поверхностную температуру тепловода:

$$T_{CP} = 0,96 [T_{П} - P(R_{П-К} + R_{К-Т})] = 0,96 [125 - 1,42(3,3 + 0,5)] = 114,84 \text{ °C.}$$

2 Определим перепад температур между средней поверхностной температурой тепловода и окружающей средой:

$$\Delta T = T_{CP} - T_{OC} = 114,84 - 35 = 79,84 \text{ °C.}$$

Рассчитаем вспомогательные коэффициенты:

$$t_M = 0,5 \cdot \Delta T = 0,5 \cdot 79,84 = 39,9 \text{ °C,}$$

$$A_1 = 1,423 - 2,51 \cdot 10^{-3} \cdot t_M + 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot t_M^2 - 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot t_M^3 = 1,423 - 2,51 \cdot 10^{-3} \cdot 39,9 + 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 39,9^2 - 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot 39,9^3 = 1,253.$$

3 Определим, коэффициент теплоотдачи конвекции для вертикально ориентированной пластины:

$$a_K = A_1 \left(\frac{\Delta T}{h} \right)^{0,25} = 1,263 \left(\frac{19,84}{25 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,25} = 0,493 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}.$$

4 Рассчитываем коэффициент теплоотдачи излучением:

$$a_L = e \cdot j \cdot f(T_{CP}, T_{OC}),$$

где $e = 0,05$ – степень черноты для алюминиевой пластины;

f – значение коэффициента облученности для гладкой пластины ($\varphi = 1$);

$f(T_{cp}, T_{oc})$ – численное значение функции, зависящей от среднеповерхностной температуры теплоотвода и температуры окружающей среды, определяемое по формуле:

$$f(T_{cp}, T_{oc}) = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(T_{cp} + 273)^4 - (T_{oc} + 273)^4}{\Delta T}.$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Исследования эффективности использования радиаторов для локального обеспечения теплового режима в полупроводниковых приборах при естественном охлаждении

Цель работы:

1 Ознакомиться с различными конструкциями радиаторов для локального обеспечения теплового режима элементов РЭС при естественном воздушном охлаждении и их эффективностью.

2 Изучить и освоить методику выбора и расчета радиаторов при естественном воздушном охлаждении.

3 Провести сравнительную экспериментальную проверку эффективности и пригодности заданных радиаторов для обеспечения допустимой температуры корпуса радиоэлемента при известных мощностях рассеивания и условиях теплообмена.

4 Изучить и использовать на практике методику расчета тепловых характеристик радиаторов при естественном воздушном охлаждении.

5 Приобрести навыки выполнения чертежей деталей (радиаторов) с использованием государственных и отраслевых стандартов.

6 Изучить СТБ 1022-96, СТБ 1014-95.

Выполнение работы:

1 Проведите сравнительное экспериментальное исследование эффективности используемых радиаторов для обеспечения заданной температуры корпуса (или допустимой для $p-n$ -перехода) радиоэлемента при известных мощностях рассеивания и условиях теплообмена по следующей схеме:

– включите измерительный прибор (В7-27) для прогревания (10–15 мин);
– с помощью термодатчика проведите измерение температуры окружающей среды (комнатную температуру), °С;

– включите устройство с набором радиаторов и через каждые 5 мин производите измерения (не менее 10) их температуры;

– составьте таблицу для измеряемых величин и внесите в нее температуру перегрева радиаторов для каждого типа радиатора ($\Delta t_p = V_p = t_p - t_c$) во времени;

– проведите расчет $R_p = V/P$ для каждого измерения всех исследуемых радиаторов и результаты внесите в таблицу измерений (P (КТ809А) = 40 Вт). Постройте график зависимости R_p от P ;

– по результатам экспериментальных исследований радиаторов постройте графики зависимости $R_p = f(V_p)$.

2 Произведите расчет тепловых характеристик радиаторов в соответствии с методиками и выполнение чертежей:

– сделать расчет тепловых характеристик радиатора с помощью ЭВМ в диалоговом режиме (или без ЭВМ) и сравнить полученные результаты с экспериментальными;

– по результатам эксперимента и расчетов определить, какой из радиаторов в данных условиях является наиболее эффективным для отвода тепла;

– по расчетным данным выполнить чертеж исследуемого радиатора, используя требования и рекомендации СТБ 1014-95;

– используя полученные результаты, требования и рекомендации СТБ 1022-95 и СТБ 1014-95, ГОСТ 2.108, выполнить сборочный чертеж установки транзистора на радиатор.

Содержание отчета

- 1 Краткие теоретические сведения (по согласованию с преподавателем).
- 2 Таблицы результатов измерений. Графики, построенные на основании экспериментальных исследований.
- 3 Анализ эффективности различных типов радиаторов при естественном воздушном охлаждении.
- 4 Результаты расчетов тепловых характеристик радиаторов (распечатка).
- 5 Чертеж исследуемого радиатора. Сборочный чертеж.
- 6 Выводы по работе.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Образцов, Н. С. Теплообмен в РЭА : конспект лекций по курсу «Конструирование радиоэлектронных устройств» / Н. С. Образцов, А. М. Ткачук, Э. П. Куракина. – Минск : БГУИР, 2003. – 54 с.
- 2 Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев. – М. : Высш. шк., 1984. – 248 с.
- 3 Роткоп, Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА / Л. Л. Роткоп, Ю. Э. Спокойный. – М. : Сов. радио, 1976. – 232 с.

Учебное издание

Образцов Николай Сергеевич
Ткачук Аркадий Мефодьевич
Смирнова Наталья Анатольевна

**КОНСТРУИРОВАНИЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

для студентов специальностей
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»
и «Техническое обеспечение безопасности»
дневной формы обучения

Редактор Е. Н. Батурчик
Корректор М. В. Тезина

Подписано в печать 3.11.2007.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 2,0.

Формат 60×84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 250 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 2,21.
Заказ 271.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ № 02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП № 02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6