Введение

Настоящие методические указания предназначены для ознакомления студентов методике теплового расчета радиоэлектронной аппаратуры.

Целью лабораторных работ является научить студента аналитически проводить расчет различных видов и форм радиаторов, предназначенных для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры или электрорадиоизделий.

Приложения содержат справочный материал, необходимый для проведения аналитических расчетов.

1. РАСЧЕТ РАДИАТОРА ДЛЯ ТЕПЛОНАГРУЖЕННОГО ЭЛЕМЕНТА
2. Общие сведения и определения

В радиоэлектронных средствах (РЭС) для интенсификации теплоотдачи от теплонагруженных элементов часто применяют теплоотводящие радиаторы. Подобные конструктивные решения могут быть заложены непосредственно в кожухе РЭС и некоторые радиоэлементы, либо радиаторы являются самостоятельной конструкцией, применяемой для отвода тепла в мощных полупроводниковых приборах, интегральных микросхемах, СВЧ-приборах, тепловых трубах и т. д.

Назначение радиатора состоит в значительном снижении теплового сопротивления между корпусом теплонагруженного элемента и окружающей средой, а, следовательно, в уменьшении перегрева элемента. Обеспечение допустимого теплового режима элементов увеличивает их надёжность и время безотказной работы.

Для современных РЭС характерна тенденция уменьшения габаритов при возрастании их мощности, что приводит к необходимости создания эффективных малогабаритных теплоотводов. За время развития радиоэлектроники было разработано большое количество различных типов радиаторов. Широкое применение получили радиаторы, различающиеся по виду площади поверхности теплообмена. Это: 1 – пластинчатые, 2 – ребристые, 3 – петельно-проволочные, 4 – жалюзийные, 5 – пластинчато-штыревые (игольчато-штыревые) радиаторы.

Конструкции названных радиаторов зависят от вида конвекции: естественным путём или вынужденным с помощью нагнетателей. Если для названных радиаторов пяти типов принять одинаковую площадь основания Sо = 0,01 м2, задать перегрев радиатора относительно температуры окружающей среды Тос = 30° К и скорость воздушного потока равной v = 2...5 м/с, то мощность рассеиваемого теплового потока Рр для радиаторов распределена в порядке ее увеличения, как на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Увеличение плотности теплового потока для радиаторов различных типов

При принудительной конвекции рассеиваемая мощность радиатора увеличивается и его можно сделать более компактным. По способу изготовления радиатора разделяются на конструкции, выполненные:

* штамповкой;
* литьем;
* фрезерованием;
* полученные путём набора отдельных пластин.

Чтобы рассчитать габариты радиатора, необходимо осуществить его тепловой расчёт, основанный на анализе тепловой модели источника, тепловой энергии и радиатора. Рассмотрим в качестве источника тепловой энергии полупроводниковый прибор (ППП). Тогда тепловая модель, полученная методом тепловой аналогии, будет представлена тепловой схемой на рис. 1.2. По данной схеме:



Рис. 1.2. Тепловая модель ППП на радиаторе

P - мощность, выделяемая ППП;

tc, tп, tк, tp - температуры окружающей среды, коллекторного перехода, корпуса прибора и радиатора соответственно;

Рпк, Ркс, Ркр, Ррс - тепловые сопротивления между переходом и корпусом, корпусом и средой, корпусом и радиатором, радиатором и средой соответственно.

Так как поверхность радиатора практически всегда значительно больше поверхности ППП, то можно считать, что Rкс>>Rкр +Rрс). Тогда общее тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой определяется следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
| Rпс = Rпк + Rкр + Rрс , К/Вт | (1.2) |

Тепловое сопротивление Rкp зависит от качества теплового контакта между транзистором и радиатором. При плотном прилегании прибора к радиатору Rкр = 0,5...1 К/Вт. При наличии теплопроводящей смазки и прокладок из металлической фольги Rкр уменьшается до значений 0,1...0,5 К/Вт. Если между прибором и радиатором находятся диэлектрические прокладки, то Rкр = 1,6...2,7 К/Вт для слюды толщиной от 0,06 до 0,41 мм и Rкр = 0,06... 1 К/Вт для лавсановых и фторопластовых прокладок. Тепловые сопротивления Rпк зависят от типа ППП и лежат в пределах 1,2...40 К/Вт [2].

Тепловое сопротивление «радиатор - окружающая среда» определяется по формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

где α - коэффициент теплоотдачи,

*Sp* - поверхность радиатора, м2.

Величина α зависит от способа охлаждения поверхности радиатора и от сре­ды, его окружающей. Для свободной конвекции в воздухе и газах величина α = 10...100 Вт/(м2**.**К). При охлаждении радиаторов маслом или водой коэффици­ент α на 2-3 порядка выше.

Обеспечение теплового режима работы ППП предполагает, что величина температуры перехода tп должна быть не выше tmax – предельно допустимой тем­пературы перехода, которая находится из справочника по ППП. Исходя из ска­занного, допустимая температура радиатора в месте контакта с ППП:

|  |  |
| --- | --- |
| tр = tmax – P·(Rпк + Rрс), К. | (1.3) |

Перегрев радиатора над окружающей средой

|  |  |
| --- | --- |
| Δt = tp – tc, К | (1.4) |

В соответствии с тепловой схемой на рис.1.2 тепловое сопротивление, кото­рым должен обладать радиатор, чтобы обеспечить заданный тепловой режим прибора,

|  |  |
| --- | --- |
| Rрс = Δt/P, К/Вт | (1.5) |

Из выражений (1.2) и (1.5) можно оценить величину поверхности радиатора, которую необходимо обеспечить:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.6) |

Основная трудность при вычислении Sp по формуле (1.6) заключается в вы­числении значений коэффициента α, так как остальные параметры обычно из­вестны.

1. Проектирование и расчёт радиаторов

При проектировании радиаторов встречаются две задачи:

1. при заданной мощности элемента за счет поверхности радиатора необхо­димо снизить температуру элемента до некоторого допустимого значения;
2. при неизменной температуре поверхности радиатора за счет ее оребрения необходимо увеличить рассеиваемую мощность.

На практике наибольшее применение нашла первая задача. Рассмотрим эту задачу применительно к проектированию различных конструкций радиаторов.

1. Расчет пластинчатых радиаторов

При заданной мощности Р, рассеиваемой элементом, площадь радиатора со­ставит 0,5 поверхности теплообмена радиатора Sp, вычисленной по выражению (1.6). Следует заметить, что при расчетах часто вместо температуры радиатора t6

(1.3) используют в формуле (1.6) среднеповерхностную температуру:

|  |  |
| --- | --- |
| ts = k1·[tmax – P·(Rпк + Rкр)], К. | (1.7) |

где k1 – коэффициент, учитывающий неравномерность температурного поля ра­диатора.

Для естественной конвекции воздуха применяют k1 = 0,96, а при принуди­тельном охлаждении k1 = 0,93.

С учетом сказанного площадь радиаторной пластины

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1.8) |

где Δts = ts – tc,.

Общий коэффициент теплоотдачи α в формуле (1.8) включает в себя конвек­тивный αк и лучистый αл коэффициенты:

|  |  |
| --- | --- |
| α = αк+αл | (1.9) |

Коэффициент αк можно рассчитать по упрощенным формулам:

* для вертикально ориентированной пластины высотой *l*:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.10) |

* для горизонтально ориентированной поверхности, имеющей наименьшую сто­рону длиной α:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.11) |

где коэффициент ψ = 1,3 для поверхности, обращенной нагретой стороной вверх,
и ψ = 0,7 для поверхности, обращенной нагретой стороной вниз.

Коэффициент k2 зависит от среднеарифметической температуры

|  |  |
| --- | --- |
| tm =0.5·(ts+tc), °C. | (1.12) |

Зависимость k2 = f(tm) приведена на рис. 1.3.



Рис. 1.3. График зависимости k2 = f(tm)

Для случая, когда tm=10...70 °С зависимость k2= f(tm) можно аппроксимиро­вать с погрешностью менее 1 % линейным законом, и тогда

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.13) |

где p0 = –1.8·10-3, 1/°C.

Лучистый коэффициент теплоотдачи αл определяется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.14) |

где ɛ - степень черноты излучаемой поверхности.

С использованием выражений (1.9) – (1.13), при заданных значениях tmax, tc, P, Rпк, Rкр и положении в пространстве радиаторной пластины, по формуле (1.8) можно найти общую площадь радиатора в виде пластины и размер вто­рой пластины.

Изготовление пластинчатых радиаторов не представляет особой трудности. В качестве материала радиатора наилучшими являются листовые медь толщиной 2...5 мм и алюминий толщиной 2,5...6 мм. Для уменьшения занимаемой площади пластинчатым радиаторам придаётся различная конфигурация.

**1.2.2. Расчет ребристых радиаторов**

Ребристые радиаторы могут быть с горизонтальным и вертикальным распо­ложением ребер, иметь круглую или прямоугольную форму. Прямоугольные ра­диаторы могут быть с односторонним и двухсторонним оребрением.

Пусть требуется спроектировать прямоугольный радиатор (рис.1.4), который имеет размеры основания Н и D, количество ребер n, их высоту h, толщину ребер δ, расстояние между ребрами b, толщину основания Δ. Температура среды tc, тип ППП и мощность Р, рассеиваемая им, известны.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. По заданной мощности Р определяется температура радиатора tp под основанием ППП по формуле (1.3). Максимально допустимая температура перехода tmax и тепловое сопротивление Rпк берутся из справочной литературы для данного типа ППП, а величина теплового сопротивления Rкp оговорена выше.
2. Находится допустимый среднеповерхностный перегрев радиатора:

|  |  |
| --- | --- |
| Δtc = k3·Δt, K, | (1.15) |

где коэффициент k3 в первом приближении принимается равным 0,8...0,9, a Δt вычисляется по формуле (1.4).

1. Определяется тепловое сопротивление Rpc для Δtc в соответствии с выражением (1.5).

1.2.2.4. Площадь поверхности радиатора вычисляется из выражения (1.2)

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1.16) |

где α – коэффициент теплопередачи радиатора, в первом приближении принимается равным α = 6...8 Вт/(м2·К).



1.2.2.5. Принимая коэффициент оребрения радиатора Ks = Sp/Sн, где Sp – вы­численная площадь оребренной, a Sн – неоребренной поверхности, в пределах Ks = 6.. .7, находим площадь основания радиатора из выражения

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1.17) |

При расчете радиатора с двухсторонним оребрением

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1.18) |

* + - 1. Находятся размеры основания

|  |  |
| --- | --- |
| и Н=K4·D, м |  |

где К4 – коэффициент формы основания радиатора, который задается из конст­руктивных соображений. Для достижения максимальной эффективности охлаждения он должен быть близок к 1.

1.2.2.7. Рассчитываются количество ребер п и межреберное расстояние b

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.19) |
| , | (1.20) |

1. Высота ребер h задается из конструктивных соображений и не долж­на быть больше 40 мм. Обычно принимается h = 15...30 мм. Толщина ребер δ вы­бирается в пределах δ = 1.. .2 мм, а толщина основания радиатора Δ = 3...5 мм.

Таким образом, выявлены все геометрические параметры ребристого радиа­тора (рис. 1.4). Однако следует заметить, что величины К3 и α выбирались, поэто­му необходимо провести уточнения их значений.

1. Для среднеповерхностной температуры радиатора, рассчитанной по пункту 1.2.2.2, находятся коэффициенты теплоотдачи i-x поверхностей α, и сум­марный эффективный коэффициент теплоотдачи радиатора в первом приближе­нии равен (1.21)

|  |  |
| --- | --- |
| image6 | (1.21) |

где площади i-x поверхностей радиатора (рис.2.2) находятся из выражений:

S1 = b ·H·(n -1); S2 =2-h-H·(n-l); S3 =n-δ·(2h + H)+2D·Δ;

S4= 2M· H; S5=D·H.

В выражении (1.21) i-й коэффициент теплоотдачи

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.22) |

где коэффициент L; учитывает уменьшение конвективного коэффициента тепло­отдачи внутренних поверхностей ребер за счет повышения температуры воздуха между ребрами. Для поверхностей S3, S4, S5, коэффициент Li=1, а для поверхно­стей S1 и S2 с достаточной для практических расчетов точностью Li; можно вычис­лить по следующему выражению:

|  |  |
| --- | --- |
| image7 | (1.23) |

где tm - среднеарифметическая температура (см. выражение 1.12); b - расстояние между ребрами радиатора, мм;

D - ширина радиатора, мм.

Конвективный коэффициент теплоотдачи αiK для вертикально ориентирован­ных плоских поверхностей может быть найден по формуле (1.10), где в качестве 1 используется размер Н для ребристых радиаторов. В случае горизонтально ориен­тированных плоскостей пользуются формулой (1.11).

Коэффициент теплоотдачи излучением i-й части поверхности радиатора Li определяется по формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.24) |

В данной формуле приведенная степень черноты ɛni для поверхности S3, S4, S5 равна степени черноты радиатора ɛ, а для поверхностей S1 и S2, ɛni= ɛ2. Коэф­фициент облученности между i-й поверхностью и средой φic для S3, S4, S5 равен 1, а для поверхностей S1 и S2

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.25) |

1. Для уточнения значения К3 необходимо определить коэффициенты χ и р:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.26) |
|  | (1.27) |

В формулах (1.26) и (1.27) г0 – радиус основания ППП, χ – коэффициент теп­лопроводности материала радиатора.

Располагая вычисленными значениями χ и ρ, можно найти K3 с точностью не хуже 5 % по следующим формулам:

1)при χ ≥ 

2) при χ < 1



1.2.2.11. Далее в соответствии с пунктом 2.2.2 и 2.2.10 уточняется значение Δts по формуле (1.15), а затем геометрические параметры радиатора в соответствии с пунктами 1.2.2.3 – 1.2.2.9. Расчеты можно закончить при достижении точности вычисления Δts порядка 1 %.

* + 1. Расчёт игольчато-штыревых радиаторов

Игольчато-штыревые радиаторы (рис. 1.9) являются наиболее распростра­ненными при использовании принудительного обдува. Конструктивно выполня­ются с односторонним и двухсторонним расположением штырей. По своей форме штыри радиатора могут быть выполнены либо в виде усеченного конуса (рис.1.10, а), либо в виде усеченной пирамиды (рис. 1.10, б). Для определения геомет­рических размеров штыревого радиатора необходимо знать теплоотдачу единич­ного штыря, имеющего заданные геометрические размеры.

Чаще всего находят применение радиаторы со штырём в виде усеченного ко­нуса как более технологичные, поэтому рассмотрим расчёт такого типа радиаторов

Известными данными при расчёте являются: мощность Р, рассеиваемая ППП, температура перехода tmax, тепловые сопротивления переход-корпус Rпк и корпус-радиатор Rкр.

Порядок расчёта радиатора следующий.

1. Находится средняя поверхностная температура радиатора в соответ­ствии с (1.7).



Рис. 1.9. Внешний вид игольчато-штыревых радиаторов

1. Вычисляется температурный напор между основанием штыря и ок­ружающей средой

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.70) |

где t1=tc, a t2=ts-3 для естественного охлаждения и t2=ts-10 для принудитель­ного охлаждения



Рис. 1.10. Виды штырей радиаторов: а - конусный; б – пирамидальный

1.2.6.3. Выбираются высота штыря h в пределах (15…30)· 10-3 м, диаметр верхнего основания d2 = (1... 1,5)·10-3 м, диаметр нижнего основания d1 = (2,5 ...3)·10-3 м, шаг штырей S = (5...7)·10-3 м, толщина основания радиатора δ = (4...5)·10-3 м.

1. Определяется коэффициент теплоотдачи

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.71) |

где dэкв = (d1 + d2)/2;

𝜆в - коэффициент теплопроводности воздуха, определяется из таблицы П1 при известной температуре окружающей среды tc.

Число Нуссельта Nu можно вычислить по выражению

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.72) |

где g - ускорение свободного падения;

νв - кинематическая вязкость воздуха, находится по таблице П1 в зависимо­сти от tc;

Если охлаждение принудительное, то коэффициент теплоотдачи α находится по формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.73) |

где К2 — коэффициент, учитывающий свойства окружающей среды, может быть определен по формуле (1.13);

V - скорость набегающего потока воздуха, м/с.

1. Периметр U и площадь f поперечного сечения штыря соответственно равны

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.74) |

1. Находится теплоотдача единичного штыря

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.75) |

где λв*-* коэффициент теплопроводности материала радиатора;

th(z) = (ez –e–z)/(ez +e–z) - гиперболический тангенс;

X – поправочный коэффициент

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.76) |

1. Вычисляется общее количество штырей радиатора

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.77) |

где коэффициент C1 принимается равным 0,6.

1. Площадь основания радиатора равна

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.78) |

где Sпп – площадь, занимаемая ППП на радиаторе;

s – поперечный или продольный шаг штырей.

Если ППП расположен на свободной от штырей стороне, то S`p = s2 n, а в слу­чае двухстороннего оребрения *=* Sp/2.

Таким образом, располагая количеством штырей n и общей площадью тепло­отвода Sp, можно выбрать необходимые габаритные размеры L и В радиатора (рис. 1.9).



Рис. 1.11. Значение гиперболического тангенса

**Задание на лабораторную работу**

Исходные данные для расчета приведены в таблице.

Таблица

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №варианта | Мощность | Тип полупроводникового прибора | Температура окружающей среды |
| 1 | 3 | 2Д202 | + 15 |
| 2 | 7 | ГТ905 | +20 |
| 3 | 15 | П210 | +27 |
| 4 | 4 | ГТ323 | +25 |
| 5 | 25 | Д238 | +24 |
| 6 | 12 | КУ204 | +13 |
| 7 | 8 | П701 | + 17 |
| 8 | 6 | КД202 | +21 |
| 9 | 13 | КУ208 | +10 |
| 11 | 10 | Д215 | +5 |
| 12 | 5 | П304 | + 16 |
| 13 | 14 | КТ805 | +30 |
| 14 | 20 | КТ903 | +35 |
| 15 | 9 | 2Д202 | + 19 |

Необходимо рассчитать параметры радиаторов в трех вариантах: пластинчатый, ребристый и игольчато-штыревой.

Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Т итульный лист.
2. Цель расчета.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Реализация решения задачи.
5. Выводы о том, какой радиатор и почему наиболее эффективен для полупроводникового прибора
6. Список литературы.

Контрольные вопросы

1. Какие основные виды теплоотводов для естественного и охлаждения вы знаете?
2. Опишите основные этапы расчета пластинчатого радиатора.
3. Опишите основные этапы расчета штыревого радиатора.
4. В чем заключается принцип действия штыревого радиатора?
5. Перечислить достоинства и недостатки пластинчатого радиатора.
6. Перечислить достоинства и недостатки штыревого радиатора.
7. Какие основные материалы применяются для создания радиаторов.
8. Дульнёв, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев. - М.: Высшая школа, 1984. - 247 с.
9. Гель, П. П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры / П. П. Гель, Н. К. Иванов-Есипович. - Л.: Энергоатомиздат, 1984.
* 536 с.
1. Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств: учебник для вузов по спец. «Конструирование и технология РЭС» / А. П. Ненашев. - М.: Высшая школа, 1990. - 431 с.: ил.
2. Скрипников, Ю. Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов / Ю. Ф. Скрипников. - М.: Энергия, 1973. - 50 с.
3. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: учебное пособие для вузов / Е. М. Парфенов, Э. Н. Камышная, В. П. Усачев. - М.: Радио и связь, 1989. - 272 с.: ил
4. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А. Л. Чернышев и др. - М.: Энергия, 1980. - 216 с.
5. Роткоп, Л. Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании ра­диоэлектронной аппаратуры / Л. Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойный. - М.: Советское радио, 1976. - 232 с.
6. Печенегов, Ю. Я. Методика расчёта радиаторов с петельно-проволочными оребрением при естественной конвекции / Ю. Я. Печенегов // Изв. вузов. Энергетика. - 1982. - №2. - С. 46-52.
7. Методика расчёта радиаторов для микросхем в прямоугольных корпусах / Ю. Е. Спокойный, Л. П. Грабой, Б.П. Базелев, Н. К. Ленская // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО. - 1975. - №2. - С. 48-55.
8. Лёгкий, В.М. О методе поверочного теплового расчёта радиаторов полу­проводниковых приборов с гнутыми призматическими рёбрами / В. М. Лёгкий // Изв. вузов. Энергетика. - 1980. - № 4. - С. 103-108.
9. ОСТ 4ГО.012.032. Аппаратура радиоэлектронная. Блоки на микросборках, микросхемах и дискретных электрорадиоэлементах. Методы расчета тепловых режимов.
* М.: Издательство стандартов. - 1980.

График П5



График зависимости коэффициента f от температуры излучающей поверхности теплоотвода при заданной температуре окружающей среды