

Л.Л. РОТКОП, Ю.Е. СПОКОЙНЫЙ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ТЕПЛОВЫХ
РЕЖИМОВ
ПРИ
КОНСТРУИРОВАНИИ
РЭА



Л. Л. РОТКОП, Ю. Е. СПОКОЙНЫЙ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ
ПРИ
КОНСТРУИРОВАНИИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ



МОСКВА «СОВЕТСКОЕ РАДИО» 1976

6Ф2.1

Р79

УДК 621.396.6.017.7

Ротмис Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М., «Сов. радио», 1976, 232 с.

Подробно изложены методы охлаждения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и особенности ее конструирования при использовании этих методов. Приведены методы расчета тепловых режимов элементов, блоков и стоек РЭА.

Материал, изложенный в книге, позволяет на всех стадиях конструирования определить влияние конструкции РЭА на ее тепловой режим. Книга снабжена примерами расчета и конструкций радиоэлектронной аппаратуры.

Книга предназначена для инженеров и научных работников, занимающихся разработкой и конструированием РЭА, а также может служить пособием для студентов вузов.

Рис. 124, табл. 37, библ. назв. 68.

Редакция литературы по вопросам космической радиоэлектроники.

P 30406-077
046(01)-76 34-76

© Издательство «Советское радио» 1976 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные технические устройства все более насыщаются радиоэлектронной аппаратурой (РЭА) различного назначения. Это приводит к усложнению РЭА, увеличению числа входящих в нее элементов, совершенствованию элементной базы при постоянном стремлении максимально снизить габариты и массу аппаратуры.

Энергетический коэффициент полезного действия радиоэлементов, как правило, невелик, и значительная доля энергии питания превращается в тепловую энергию с соответствующим перегревом элементов и аппаратуры. В широких пределах могут меняться условия эксплуатации РЭА, в том числе температура окружающей аппаратуру среды. Оговоренный в технических условиях на большинство радиоэлементов диапазон рабочих температур сравнительно мал, а работа элементов вне этого диапазона обычно приводит к значительному снижению их надежности и соответственно к снижению надежности аппаратуры в целом. Переход на полупроводниковые приборы, отличающиеся сравнительно небольшой потребляемой энергией и малыми размерами (при использовании традиционных подходов), не снижает перегревов, что объясняется увеличением удельных мощностей рассеивания.

Необходимого (нормального) температурного (теплового) режима работы элементов и РЭА можно добиться осуществлением ряда мероприятий. К их числу относятся: разработка термостабильных элементов и схем, соответствующая компоновка узлов и РЭА в целом, применение терморегулирования и т. д. В настоящее время практически все крупные радиоэлектронные комплексы оборудуются специальными системами терморегулирования. Масса, габариты, надежность терморегулирующих систем сравнимы с соответствующими показателями РЭА. Таким образом, проблема обеспечения нормального теплового режима РЭА тесно связана с проблемами конструирования РЭА и радиоэлектронных комплексов, создания надежной аппаратуры.

В книге изложены вопросы, связанные с рациональным обеспечением нормальных тепловых режимов при конструировании РЭА. В основном рассматривается РЭА с воздушным охлаждением, получившая наибольшее распространение. В отличие от существующего, предпринята попытка системного подхода к обеспечению теплового режима при конструировании РЭА, начиная с конструирования и выбора режима работы элементов и кончая рассмотрением аппаратуры в целом. Показано, что такой подход позволяет улучшить габаритно-массовые характеристики радиоэлектронных комплексов и в том случае, когда в силу больших мощностей, рассеиваемых элементами, мер, принятых в процессе рационального по тепловым режимам конструирования РЭА, оказывается недостаточно и применение в радиоэлектронном комплексе си-

стем терморегулирования становится неизбежным. Ранее при расчете тепловых режимов РЭА применялись главным образом детерминированные методы, которые не позволяли достаточно просто связать тепловые свойства элементов и РЭА с их надежностью. Здесь широко используются вероятностные методы, что, по мнению авторов, существенно упрощает задачу.

Последовательность изложения принятая следующей. Сначала рассматриваются общие понятия и определения, условия эксплуатации и режимы работы РЭА, основные этапы конструирования РЭА и влияние тепловых режимов на ее надежность. Затем дается классификация способов охлаждения и большое количество примеров конструкций РЭА с воздушным охлаждением, а также методика выбора способа охлаждения РЭА на ранней стадии конструирования. Далее приводятся методы расчета тепловых режимов мощных дискретных и микроминиатюрных элементов, выбора оптимальных коэффициентов нагрузки элементов и проектирования микроминиатюрных элементов с учетом обеспечения заданного теплового режима. В конце рассматриваются методы расчета теплового режима РЭА различного конструктивного исполнения и вопросы оптимального теплофизического конструирования.

Авторы полагают, что имеющееся в книге большое количество примеров расчета и конструирования будет способствовать усвоению материала и использованию на практике приведенных рекомендаций.

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую благодарность научному редактору книги, доценту, канд. техн. наук В. И. Киселеву за советы и пожелания, высказанные при написании рукописи, плодотворный труд при ее редактировании.

Широкий круг рассматриваемых вопросов и предоставленный объем не позволили со всей полнотой изложить затрагиваемые вопросы, в связи с чем авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания по содержанию книги, которые следует направлять по адресу: Москва, Главпочтамт, а/я 693, издательство «Советское радио».

Глава 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Современные радиотехнические устройства представляют собой инженерные сооружения, состоящие из собственно радиоэлектронной аппаратуры, систем терморегулирования, вспомогательного оборудования (источники электропитания, санитарная вентиляция и т. д.) и подвижного либо стационарного помещения, в котором установлено оборудование. Подобное инженерное сооружение будем называть радиоэлектронным комплексом. В качестве примеров радиоэлектронных комплексов можно назвать приемопередающую радиостанцию, спутник связи, радиолокационную станцию и т. д.

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) является основной частью радиоэлектронного комплекса. РЭА может быть конструктивно оформлена в виде составляющих комплекс блоков, стоек, шкафов, пультов или их комбинаций, а также может быть выполнена в виде отдельных устройств, не входящих в состав комплекса, например: телевизор, переносная радиостанция, радиоприбор. В состав РЭА входит множество отдельных элементов. Элементы представляют собой микросхемы, полупроводниковые или электронно-вакуумные диоды и триоды, резисторы, конденсаторы и прочие радиодетали либо электромеханические узлы (электродвигатель, реле) [1—3].

Температурное поле РЭА состоит из значений температур ее элементов, а также температур в различных точках шасси, кожуха, воздуха внутри аппарата и т. п. Совокупность значений этих температур характеризует тепловой режим РЭА. В конкретных исследованиях можно ограничить количество точек, значение температур в которых достаточно полно отражает тепловой режим аппарата в целом.

В процессе эксплуатации РЭА подвергается воздействию различных факторов, отрицательно влияющих на ее надежность. К ним относятся: нагрев и охлаждение, изменение давления, влажности, химического и биологического состава окружающей среды; попадание пыли и песка, находящихся в земной атмосфере; солнечная и искусственная радиации; вибрация и удары. Для повышения надежности РЭА необходимо в той или иной мере защитить ее от действия этих факторов. В данной книге рассматриваются методы защиты РЭА от тепловых воздействий.

Различают внутренние и внешние тепловые воздействия на РЭА. Внутренние тепловые воздействия в основном зависят от мощности, рассеиваемой элементами РЭА, внешние — от условий эксплуатации.

Насыщение современных технических устройств РЭА различного назначения заставляет конструкторов уменьшать ее габариты и увеличивать удельные мощности рассеивания, т. е. мощности, приходящиеся на единицу поверхности или объема РЭА. Одним из основных направлений в конструировании РЭА стала комплексная микроминиатюризация, что приводит к еще большему **увеличению удельной мощности рассеивания**. Освоение космического пространства, значительное увеличение скорости и высоты полета современных самолетов, создание наземных передвижных объектов, освоение ракетной техники и совершенствование подводного и надводного флота в значительной степени усложнили условия эксплуатации РЭА. Поэтому защита РЭА от тепловых воздействий становится одним из главных вопросов в обеспечении ее надежности [1].

Защита РЭА от тепловых воздействий осуществляется при помощи ряда мероприятий. Одним из основных является использование систем обеспечения теплового режима РЭА (СОТР). СОТР обычно предназначена для поддержания заданного в технических условиях (ТУ) диапазона температур на элементах РЭА, чтобы обеспечить ее надежность при определенных тепловых воздействиях и других специальных требованиях. Кроме основного назначения СОТР может выполнять и другие функции: защищать РЭА от влаги и пыли, химического, биологического и радиационного воздействия внешней среды; создавать санитарные условия для обслуживающего персонала; увеличивать диэлектрическую прочность межэлементных промежутков и пр.

В зависимости от баланса внутренних и внешних тепловых воздействий СОТР может либо отводить тепло от РЭА (охлаждение), либо подводить тепло к РЭА (нагревание). Подогрев РЭА осуществляется обычно достаточно простыми методами (например, омическими электронагревателями). Наибольшие трудности встречаются при охлаждении, и, как правило, основной арсенал средств и методов, используемых в СОТР, направлен на регулирование процесса отвода тепла от элементов РЭА. Поэтому при анализе температурного поля РЭА мы часто будем пользоваться термином «охлаждение» РЭА.

В радиоэлектронных комплексах СОТР, как правило, являются сложными системами, состоящими из многих элементов, коммуникаций и несущих конструкций. В некоторых случаях регулирование температуры в РЭА может быть достигнуто за счет простейших конструктивных решений, осуществляющих теплопередачу между элементами РЭА, элементами несущей конструкции и окружающей средой. Тогда нет смысла рассматривать СОТР как отдельное изделие и мы будем пользоваться терминами «методы (или способы) охлаждения РЭА». Этими же терминами будем пользоваться и при исследовании температурного поля элементов РЭА в результате действия некоторых гипотетических СОТР, когда конкретная конструкция СОТР не рассматривается.

Наиболее распространенными элементами СОТР являются вентиляторы, насосы, теплообменники, холодильники, нагреватели. Особое место занимают теплоносители. Под теплоносителем понимаем вещество в жидком, газообразном или двухфазном состоянии, используемое для переноса тепла от РЭА к элементам СОТР и обратно.

Все оборудование радиоэлектронных комплексов располагается в зданиях (стационарных помещениях) либо на подвижных объектах: автомашинах, прицепах, самолетах и вертолетах; спутниках, космических кораблях и ракетах; морских и речных судах. Подвижные объекты

обычно называют носителями. Здания и носители могут предназначаться либо для размещения радиоэлектронного комплекса, либо выполнять другие задачи. В последнем случае радиоэлектронные комплексы располагаются в специальных помещениях и отсеках. Конструкции зданий и носителей, а также дополнительное оборудование, установленное в них, часто зависят от условий эксплуатации, технических и прочих задач, решаемых радиоэлектронным комплексом.

1.2. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЭА

Тепловой режим РЭА характеризуется, прежде всего, двумя факторами: электрическим режимом работы и условиями эксплуатации.

Электрический режим работы РЭА в данном случае интересует нас только в связи с изменением внутренних тепловых воздействий во времени и пространстве и задается обычно в виде графиков зависимости рассеиваемой мощности от времени для различных узлов РЭА. Деление РЭА на узлы зависит от класса решаемой задачи. Так, при исследовании теплового режима блока узлами могут быть платы либо отдельные мощные элементы, для стойки — отдельные блоки, для группы стоек — отдельные стойки и т. д. Задание рассеиваемой мощности по отдельным узлам характеризует распределение внутренних тепловых воздействий

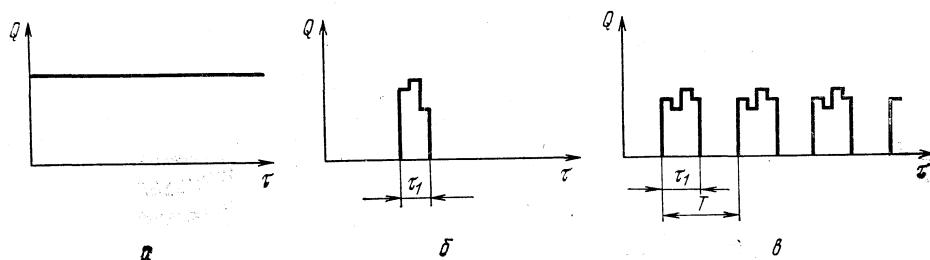


Рис. 1.1. Возможные изменения рассеиваемой РЭА мощности во времени:
 Q — рассеиваемая мощность; τ — время.

в пространстве и необходимо для учета взаимного влияния узлов при определении температурного поля РЭА.

Изменение рассеиваемой мощности во времени может носить различный характер. На практике типичны три режима работы: длительный, кратковременный, периодический. Примеры подобных режимов приведены на рис. 1.1. В первом случае (рис. 1.1,а) РЭА в течение достаточно большого промежутка времени рассеивает постоянную по величине мощность. Понятие «достаточно большой промежуток» соответствует тому времени, в течение которого тепловой режим РЭА полностью устанавливается. Во втором случае (рис. 1.1,б) РЭА включается на небольшой промежуток времени τ_1 , в течение которого тепловой режим РЭА не устанавливается. Здесь температура на элементах РЭА будет зависеть не только от величины рассеиваемой мощности и условий теплообмена, но и от длительности ее включения. В третьем случае (рис. 1.1,в) график имеет вид периодической функции с периодом T . Различают время включения (или импульса) τ_1 и время паузы $T - \tau_1$.

основным параметром периодического режима является скважность импульса $\gamma = \tau_1/T$.

При определенных значениях скважности, несмотря на периодичность процесса в целом, можно считать режим либо кратковременным, либо длительным.

Проиллюстрируем это на примере анализа режима работы, приведенного на рис. 1.1,в. Если время включения τ_1 невелико и за это время тепловой режим РЭА не устанавливается, а время паузы велико и тепловой режим в течение паузы устанавливается, то такой режим может быть отнесен к кратковременному, несмотря на то, что по виду графика

режим напоминает периодический. Если время паузы настолько мало, что тепловой режим РЭА за время паузы мало меняется, то такой режим может быть отнесен к длительному. Если за время включения тепловой режим РЭА устанавливается, то независимо от длительности паузы этот режим может рассматриваться как длительный. С точки зрения обеспечения заданного по ТУ теплового режима РЭА длительный режим работы обычно является наиболее тяжелым.

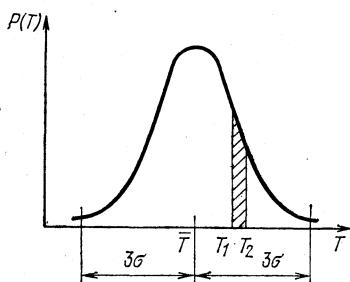
Основное влияние на тепловой режим РЭА и конструкцию СОТР с точки зрения условий эксплуатации оказывают внешние тепловые

Рис. 1.2. Вероятностный закон распределения температуры окружающей РЭА среды.

воздействия. Внешние тепловые воздействия делятся на длительные, медленно и быстро изменяющиеся. Длительные внешние тепловые воздействия характерны для РЭА, размещаемой в зданиях и отсеках, оборудованных собственными централизованными системами кондиционирования и терморегулирования. Например, температура воздуха в отсеке РЭА, размещаемой в крупных самолетах, регулируется общей СОТР самолета; РЭА, размещаемая в залах крупных вычислительных центров, подсоединяется к центральной системе кондиционирования воздуха в помещениях и т. д. Длительные тепловые воздействия учитываются величиной максимально допустимой температуры воздуха по ТУ для этих помещений.

Медленно изменяющиеся тепловые воздействия характерны для радиоэлектронных комплексов, тепловой режим которых в значительной степени зависит от температуры окружающей среды. Медленные изменения внешних тепловых воздействий в этом случае связаны с суточными и сезонными изменениями температуры окружающей среды в определенных климатических зонах нижних слоев атмосферы, с физико-метеорологическими свойствами верхних слоев атмосферы. Медленно изменяющиеся тепловые воздействия задаются в виде верхнего и нижнего предельных значений или вероятностного закона распределения температуры окружающей среды. На рис. 1.2 приведен пример закона распределения температуры окружающей среды для РЭА, где по оси абсцисс отложены значения температур T , а по оси ординат — вероятности $P(T)$ длительного воздействия этих температур на РЭА.

В соответствии с общими правилами теории вероятности, пользуясь законом распределения, можно найти:



математическое ожидание температуры

$$\bar{T} = M(T) = \int_{-\infty}^{\infty} TP(T) dT,$$

дисперсию

$$\sigma^2 = D(T) = \int_{-\infty}^{\infty} (T - \bar{T})^2 P(T) dT;$$

вероятность того, что на РЭА длительно воздействует окружающая среда с температурой $T_1 < T < T_2$ (соответствующая площадь под кривой распределения заштрихована, см. рис. 1.2):

$$P(T_1 < T < T_2) = \int_{T_1}^{T_2} P(T) dT;$$

вероятность того, что температура окружающей среды будет ниже (выше) некоторой заданной температуры T_3 :

$$P(T < T_3) = \int_{-\infty}^{T_3} P(T) dT; \quad P(T > T_3) = \int_{T_3}^{\infty} P(T) dT.$$

В реальных расчетах бесконечные пределы интегрирования заменяются предельными значениями температуры.

Предельные значения температуры окружающей среды могут быть получены из закона распределения в результате отбрасывания маловероятных значений. Например, для нормального закона распределения температуры можно принять

$$T_{\max} = \bar{T} + 3\sigma; \quad T_{\min} = \bar{T} - 3\sigma.$$

Некоторые законы распределения температуры окружающей среды для различных условий эксплуатации РЭА приведены на рис. 1.3. Наименьший диапазон изменения температуры окружающей среды имеет РЭА, расположенная в стационарных отапливаемых помещениях, в наземных передвижных объектах и на кораблях диапазон изменения температуры значительно шире, особенно большие изменения температуры имеют место в отсеках самолетов и ракетно-космических объектов.

Быстро изменяющиеся тепловые воздействия характерны для РЭА, расположенной в негерметичных отсеках самолетов, ракет и космических кораблей, и вызваны изменением температуры окружающей среды при изменениях скорости и высоты полета. Эти тепловые воздействия задаются в виде графика изменения температуры окружающей среды в отсеке во времени либо в виде профиля полета. В последнем случае по графику профиля полета рассчитывается график изменения температуры в отсеке.

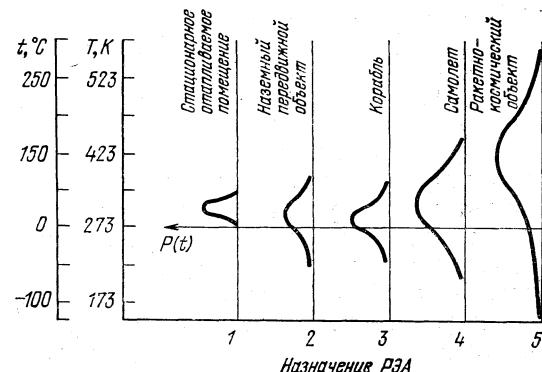


Рис. 1.3. Законы распределения температуры окружающей среды для различных условий эксплуатации РЭА.

Изменение температуры окружающей среды является основным (первичным) фактором при оценке влияния условий эксплуатации на тепловой режим РЭА и конструкцию СОТР. Однако имеют место вторичные и третичные факторы, которые в той или иной мере необходимо принимать во внимание при оценке влияния условий эксплуатации РЭА и СОТР.

Вторичными факторами являются: давление окружающей среды и среды внутри кожуха аппарата, наличие невесомости. Они могут значительно изменить условия теплообмена. Вторичные факторы существенно сказываются на работе РЭА, размещенной в отсеках самолетов, ракет и космических аппаратов. При невесомости теплопередача конвекцией в естественных условиях отсутствует, а при пониженном давлении значительно ухудшается. Это необходимо учитывать при конструировании РЭА и СОТР.

Третичными факторами являются: влажность, химический и биологический состав газа в окружающей среде, запыленность газа, воздействие солнечной и искусственной радиации, механические воздействия, изменение физико-химического состава охлаждающих жидкостей.

При повышенной влажности окружающего воздуха, используемого для охлаждения РЭА, часто необходимо принимать специальные меры либо применять специальные устройства для уменьшения влажности. Специальные меры обычно состоят в том, чтобы воспрепятствовать выпадению влаги на отдельных поверхностях РЭА либо ее заносу в РЭА с окружающих поверхностей.

Специальные устройства для уменьшения влажности воздуха часто входят в состав СОТР; как правило, это различные влагоуловители либо осушители воздуха. Применение специальных мер или устройств для уменьшения влажности воздуха усложняет конструкции СОТР и ограничивает их возможные режимы работы.

Если химический и биологический состав окружающего газа и (или) наличие в нем искусственной радиации не позволяют использовать его для охлаждения РЭА, то возникает необходимость в применении специальных фильтрующих установок. Современная РЭА обычно использует большое количество воздуха. Применение специальных фильтрующих установок на большие производительности может привести к столь значительному увеличению габаритов и массы СОТР, что практически исключает возможность использования газа из окружающей среды для охлаждения РЭА. В этом случае для защиты РЭА от вредного воздействия газа из окружающей среды применяют СОТР с замкнутым контуром, а газ из окружающей среды, предварительно очищенный в специальных фильтрах, используется только для подпитки. В СОТР с замкнутым контуром возникает необходимость в охлаждении теплоносителя, что в значительной степени усложняет ее конструкцию. Для охлаждения теплоносителя обычно применяются теплообменники или холодильные машины.

При защите РЭА и (или) элементов СОТР от пыли используются пылевые фильтры различной конструкции. Габариты фильтров и периодичность их очистки во многом зависят от степени запыленности воздуха. Этим и определяется влияние запыленности окружающего воздуха на конструкцию СОТР.

Механические воздействия на РЭА могут быть разнообразны. Применение различных мер для защиты элементов РЭА и СОТР от ударов и вибраций оказывает значительное влияние как на конструкцию РЭА,

так и СОТР [1]. Некоторые элементы СОТР (вентиляторы, насосы, компрессоры и т. п.) могут быть источниками нежелательных вибраций, что также влияет на конструкцию СОТР.

Изменение физико-химических свойств жидкостей, используемых в качестве теплоносителей в СОТР, выражается главным образом в следующем: образовании механических примесей, изменении электрической прочности, вязкости. Для исключения возможности попадания механических примесей в систему применяют жидкостные фильтры. Изменение электрической прочности может быть связано как с попаданием в жидкость механических примесей, так и различных солей, воздуха и т. д. При высоких требованиях к электрической прочности жидкости и сложных условиях эксплуатации для химической и механической очистки жидкости во время ее приготовления и последующей эксплуатации, а также удаления из нее воздуха (деаэрации) применяют сложные и громоздкие установки, которые по габаритам сравнимы с остальной частью СОТР. Изменение вязкости жидкости чаще всего связано с изменением температуры окружающей среды, оно влияет на производительность насоса и условия охлаждения РЭА. Диапазон изменения температуры окружающей среды может быть настолько большим, что жидкости начнут переходить в другие агрегатные состояния (замерзание, кипение). СОТР обычно необходимо обеспечить тепловой режим РЭА во всем диапазоне изменения вязкости теплоносителя и препятствовать переходу жидкости в другое (нежелательное) агрегатное состояние.

Учитывая влияние первичных, вторичных и третичных факторов на тепловой режим, конструкцию РЭА и СОТР, электрические режимы работы РЭА, а также ряд других факторов, радиоэлектронные комплексы по условиям их использования можно разбить на пять основных классов: стационарные, наземные передвижные, корабельные, самолетные, ракетно-космические. Внутри каждого класса условия эксплуатации РЭА могут отличаться, поэтому часто рассматривают еще подклассы.

Приведем краткую характеристику условий использования РЭА для каждого класса. Стационарные радиоэлектронные комплексы размещаются в зданиях и других стационарных помещениях. В тех же помещениях, как правило, размещается обслуживающий персонал. Режим работы РЭА длительный. Внешние тепловые воздействия также длительные, так как помещения для стационарной РЭА снабжены общей централизованной системой кондиционирования воздуха или системами отопления и вентиляции помещений. Диапазон изменения температуры в помещениях, где установлены РЭА, невелик (рис. 1.3) и колебается в пределах от 278 до 323 К ($+5 \div +50^{\circ}\text{C}$). Давление воздуха в помещениях обычно нормальное, атмосферное, с колебаниями, соответствующими изменению давления на поверхности земли и в высокогорных районах. Воздух, используемый для охлаждения РЭА, имеет невысокую запыленность. Исключением может быть случай, когда строительство зданий осуществляется в несколько очередей и отдельные радиоэлектронные комплексы вынуждены работать в период строительства зданий второй и других очередей. Влажность воздуха зависит от района расположения радиоэлектронного комплекса. Защита РЭА от вредного воздействия (химического, биологического или радиационного) окружающей среды выполняется либо с помощью централизованной системы кондиционирования помещений, либо применением специальной СОТР. Механические воздействия на РЭА малы. Перечисленные условия эксплуатации РЭА стационарных комплексов наиболее легкие. Обычно при

размещении радиоэлектронных комплексов в зданиях не предъявляются жесткие требования к габаритам, массе, энергопотреблению РЭА и вспомогательных систем. Необходимо отметить, что стационарная РЭА является наиболее мощной.

Наземные передвижные радиоэлектронные комплексы размещаются в кузовах автомобилей, автоприцепах, на железнодорожных платформах и других подобных носителях. Однаково распространены конструкции с обслуживающим персоналом и без него. В наземных передвижных объектах РЭА работает либо только во время стоянки, либо во время движения и стоянки. Режим работы, как правило, длительный. Давление воздуха атмосферное, с небольшими колебаниями. Влажность не высокая, запыленность воздуха может быть очень большой, особенно при работе РЭА во время движения носителя по грунтовым дорогам. Защита РЭА и обслуживающего персонала от вредного воздействия окружающей среды является одной из основных проблем при конструировании СОТР наземных передвижных объектов. Механические воздействия на РЭА достаточно велики. Внешние тепловые воздействия, как правило, медленно меняющиеся и связаны с суточными и сезонными изменениями температуры окружающей среды, интенсивностью солнечных лучей. Диапазон изменения температуры окружающей среды достаточно велик (рис. 1.3) и составляет примерно 213—333 К ($-60 \div +60^{\circ}\text{C}$). Требования к габаритам, массе радиоэлектронного комплекса и потребляемой им мощности жесткие из-за ограниченности объемов кабины, грузоподъемности носителя и мощности его двигателя.

Корабельные радиоэлектронные комплексы могут располагаться в закрытых отсеках или палубных надстройках. В первом случае внешние тепловые воздействия примерно такие же, как у стационарной РЭА, во втором — ближе к наземной, передвижной РЭА. Режим работы РЭА, как правило, длительный. Давление воздуха атмосферное. Запыленность практически отсутствует, влажность высокая. В некоторых случаях необходимо принимать меры по защите РЭА от попадания морской воды и вредного влияния морского воздуха, содержащего большое количество солей.

Самолетные радиоэлектронные комплексы располагаются в герметичных либо негерметичных отсеках или в подвесных контейнерах вертолетов и самолетов. Обслуживающий персонал обычно в этих отсеках не находится, хотя могут быть и исключения. Однаково часто встречаются все три режима работы РЭА: длительный, кратковременный и периодический. Внешние тепловые воздействия на РЭА, размещенную в герметичных отсеках, как правило, длительные в ограниченном диапазоне температур, так как герметичные отсеки самолета подключаются к централизованной системе кондиционирования воздуха самолета. Давление воздуха и внешние тепловые воздействия на РЭА, размещенную в негерметичных отсеках, быстро изменяются при переменном профиле полета. Медленно изменяющиеся внешние тепловые воздействия имеют место на стоянках самолета и при предполетной подготовке РЭА на аэродроме, когда температура воздуха в герметичных и негерметичных отсеках следит за температурой окружающей среды. Воздух имеет незначительную запыленность в полете и значительную на аэродромах. Влажность воздуха зависит от профиля полета. Механические воздействия на РЭА значительны. Требования к габаритам, массе и потребляемой мощности радиоэлектронного комплекса очень жесткие.

Ракетно-космические радиоэлектронные комплексы размещаются в герметичных и негерметичных отсеках ракет, искусственных спутников земли и космических кораблей. Различные условия при входе в плотные слои атмосферы, при полете по околоземным орбитам и при исследовании дальнего космоса предъявляют к СОТР высокие требования, которые должны быть обеспечены при минимальных габаритах, массе и потребляемой мощности. Особенность космического пространства как физической среды с малой плотностью частиц, наличием глубокого вакуума и невесомости еще более усложняет обеспечение теплового режима РЭА и создание СОТР.

1.3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

При конструировании радиоэлектронных комплексов различают несколько стадий разработки. На каждой стадии разработки привлекаются специалисты различных технических профилей.

Существует пять стадий разработки конструкторской документации: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект и выпуск рабочей документации. В некоторых случаях отдельные стадии разработки могут быть опущены или совмещены. Разработке конструкторской документации могут предшествовать научно-исследовательские работы. Рассмотрим, какое место занимают работы по обеспечению тепловых режимов на различных стадиях конструирования радиоэлектронного комплекса.

Разработка технического задания осуществляется совместно заказчиком и исполнителями для всего радиоэлектронного комплекса и отдельных его частей, в том числе и для СОТР.

Основными исходными данными, которые в обязательном порядке содержатся в техническом задании и определяют тепловой режим РЭА и конструкцию СОТР, являются: электрические режимы работы РЭА и ее элементов, условия эксплуатации, основные технические характеристики СОТР (потребляемая мощность, масса, объем, надежность), допустимые температуры элементов РЭА.

В техническом предложении рассматриваются различные схемы СОТР, удовлетворяющие основным техническим характеристикам и обеспечивающие допустимый тепловой режим при условиях использования РЭА, оговоренных в техническом задании. Технические характеристики СОТР и тепловой режим РЭА определяются по укрупненным показателям, так как на этой стадии не имеется достаточной информации о конструкции радиоэлектронного комплекса.

При эскизном проектировании для СОТР необходимо выбрать основные элементы и рассмотреть варианты их компоновки совместно с РЭА. На этой стадии могут быть изготовлены и испытаны макеты РЭА и СОТР для проверки принципиальных решений в части тепловых и гидравлических режимов.

На стадии технического проекта выполняются уточненные расчеты надежности радиоэлектронного комплекса и отдельных его узлов, тепловых и гидравлических режимов, электрических режимов; производится эстетическая проработка конструкции опытного образца; решаются вопросы взаимодействия обслуживающего персонала в процессе управления изделием; изготавливаются и испытываются экспериментальные образцы изделий.

На стадии выпуска рабочей документации разрабатывается вся номенклатура конструкторской документации, необходимая для изготавления и испытания опытного образца, установочной и головной серий.

На различных стадиях разработки конструкторской документации должны быть заняты различные специалисты — от схемотехников, механиков, теплотехников до психологов. Процесс конструирования радиоэлектронного комплекса нельзя представлять как последовательную разработку отдельных его элементов различными специалистами. Конструирование РЭА — это комплексное и параллельное решение всех вопросов группой специалистов, поэтому каждый специалист, участвующий в конструировании кроме глубокого знания своей узкой специальности должен владеть основами смежных специальностей.

Однако в научно-технической литературе часто отдельные вопросы конструирования РЭА излагаются самостоятельно, что облегчает усвоение материала и способствует более глубокому изучению вопроса. Этот методический прием использован и авторами. Подчеркнем еще раз, что на практике нет отдельных этапов теплофизического конструирования, так же, как нет отдельных этапов схемотехнического, механического и другого конструирования. Изложение же принципов теплофизического конструирования в отдельной книге следует рассматривать как чисто методический прием, способствующий лучшему усвоению материала.

Задачи и методы теплофизического конструирования зависят от класса разрабатываемых изделий с указанной точкой зрения. В радиоэлектронном комплексе можно выделить три класса изделий, существенно отличающихся задачами и методами теплофизического конструирования. К таким изделиям следует отнести элементы РЭА, РЭА в целом и СОТР.

Теплофизическое конструирование элементов РЭА объединяет методы обеспечения заданного теплового режима отдельных элементов. Тепловой режим задается температурным полем внутри элемента. Способ задания температурного поля зависит от вида и типа элемента, а также от конкретной задачи исследования. С позиций теплофизического конструирования различают три вида элементов РЭА: дискретные; модульные, микромодульные и микроминиатюрные схемы; «большие» элементы.

Дискретными элементами будем называть электро- и радиоэлементы определенного функционального назначения: резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы, электронные лампы, реле, дроссели, трансформаторы и т. д., которые монтируются внутри узлов, блоков, аппаратов.

Модульными, микромодульными и микроминиатюрными элементами (схемами) будем называть изделия, внутри которых смонтировано несколько различных радиокомпонентов, соединенных по определенной схеме. Модули и микросхемы, в свою очередь, монтируются внутри узлов, блоков, аппаратов.

«Большими» элементами назовем крупногабаритные лампы, магниты, дроссели и другие подобные изделия, монтирующиеся отдельно.

Достаточно полно тепловой режим элемента характеризует температурное поле критических зон элемента, т. е. тех зон, температура которых определяет надежность элемента. Элемент может иметь одну или несколько критических зон. Дискретные элементы, как правило, имеют одну критическую зону. У полупроводниковых приборов это зона

p—*n*-перехода, у резисторов — наиболее нагретая часть активного слоя, у дросселей и трансформаторов — наиболее нагретая часть внутри обмотки и т. д. Микромодульные и микроминиатюрные элементы имеют несколько критических зон по числу радиокомпонентов, входящих в их состав. «Большие» элементы в зависимости от конструкции могут иметь одну или несколько критических зон, расположенных на различных электродах, в соединениях и других местах. Возможны два подхода при теплофизическом конструировании элементов:

— конструирование отдельных элементов и унифицированных рядов для применения в различной РЭА;

— конструктивное оформление элементов для конкретной РЭА.

Первый подход связан с созданием конструкций новых элементов. Второй подход состоит в выборе элементов из существующих конструкций для конкретной РЭА, а также в использовании специальных конструктивных решений для улучшения теплового режима выбранных элементов (радиаторов, экранов и т. п.).

Теплофизическое конструирование РЭА объединяет методы обеспечения заданного теплового режима РЭА в целом. Тепловой режим задается температурным полем РЭА. Объем работ и точность результатов исследования при теплофизическому конструированию РЭА зависят от стадии конструирования и состава аппаратуры. На ранних стадиях конструирования обычно располагают небольшим объемом информации о конструкции РЭА, поэтому точность результатов исследования невелика. По мере приближения к конечной стадии конструирования точность результатов исследования повышается.

Теплофизическое конструирование СОТР по смыслу аналогично конструированию РЭА, но имеет свою специфику. Тепловой режим РЭА в этом случае обычно задается количеством (расходом) и температурным полем теплоносителя в СОТР.

При теплофизическому конструированию радиоэлектронных комплексов используют анализ и синтез конструкций. Анализ состоит в определении температурного поля и других параметров (расхода теплоносителя, гидравлических и тепловых сопротивлений и пр.) заданной конструкции элементов, РЭА, СОТР. Анализ может быть осуществлен различными способами: аналитически, моделированием, экспериментально. Аналитический способ объединяет тепловые и аэродинамические (гидравлические) расчеты элементов, РЭА, СОТР. В этих расчетах обычно используются различные модели реальных изделий. Точность расчетов зависит от точности и полноты исходных данных, степени приближения модели к реальному изделию. В аналитических способах широко используются средства, ускоряющие вычислительные работы: номограммы, графики, вычислительные машины. При моделировании используют электрические, гидравлические и другие модели. Экспериментальный способ представляет собой тепловые и аэродинамические (гидравлические) испытания опытного образца или партии.

Синтез состоит в выработке (предсказании) необходимой конструкции, реализующей заданное (оптимальное в определенном смысле) температурное поле. При синтезе конструкций обычно используется весь арсенал современных математических методов. Синтез гораздо сложней анализа, но решения, получаемые при синтезе, могут значительно сократить время разработки и поэтому имеют большую практическую ценность.

1.4. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РЭА И ЕЕ НАДЕЖНОСТЬ

Свойство радиоэлектронного комплекса выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации называется его надежностью.

Надежность РЭА зависит от большого числа факторов [1,4—7]. Одним из основных является температура элементов РЭА. Как отмечалось в § 1.1, поле температур характеризует тепловой режим РЭА, следовательно, тепловой режим РЭА количественно должен быть связан с ее надежностью.

В данной книге мы не будем касаться основ теории надежности РЭА, считая, что читатель с ними знаком. В случае необходимости можно обратиться к работам [1, 6, 7]. При выводе уравнений связи теплового режима РЭА с ее надежностью будем рассматривать длительный режим работы и пользоваться простейшей моделью, которая составлена на основе следующих допущений: отказы элементов являются событиями случайными и независимыми, отказ одного элемента приводит к отказу РЭА, интенсивность отказов элементов не зависит от времени, параметрические отказы отдельно не учитываются. В качестве показателя надежности используется интенсивность отказов λ (плотность распределения наработки до первого отказа). Более сложные модели (системы с зависимыми элементами, с резервированием, восстанавливаемые системы и т. д.) и другие показатели надежности рассматривать не будем, так как переход к ним является чисто технической задачей и при необходимости может быть выполнен в каждом конкретном случае.

Расчет надежности РЭА для принятой модели осуществляется по формулам

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (1.1)$$

$$\lambda_i = \lambda_{i_0} \prod_{j=1}^m K_{ij}, \quad (1.2)$$

где λ — интенсивность отказов РЭА; λ_i — интенсивность отказов i -го элемента; n — число элементов; λ_{i_0} — интенсивность отказов i -го элемента при некоторых стандартных условиях его использования; K_{ij} — коэффициенты, учитывающие влияние j -го фактора на i -й элемент, при воздействии только температуры $K = d\lambda/dT$; m — число факторов, характеризующих условия использования РЭА; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$.

Интенсивность отказов для элементов РЭА определяется опытным путем и приводится в виде таблиц и графиков в соответствующих каталогах. Для большинства элементов РЭА зависимость (1.2) с учетом влияния только температуры можно аппроксимировать формулой

$$\lambda_i = A \lambda_{i_0} \exp [b(T_r - T_{r_0})], \quad (1.3)$$

где T_r — температура критической зоны элемента в реальных условиях работы; T_{r_0} — температура зоны в стандартных условиях; A, b — экспериментальные коэффициенты.

Однако критическая зона элемента почти всегда недоступна для непосредственного измерения температуры. Измерение температуры элемента обычно выполняется на его корпусе (температура корпуса

Таблица 1.1

Экспериментальные значения коэффициентов для расчета интенсивности отказов наиболее распространенных элементов РЭА по формуле (1.6)

Тип элемента	$b \cdot 10^2, 1/K$	c	d
Резисторы			
Металлопленочные, металлоокисные и пленочные углеродистые, переменные непроволочные и постоянные проволочные	2,2	2,95	2,35
Композиционные, объемные, микромодульные	1,3	0,9	0,76
Проволочные переменные	0,8	3,0	2,8
Конденсаторы			
Бумажные и металлобумажные, пленочные, металлопленочные, комбинированные, нанопленочные, tantalовые электролитические*)	2,0	3,0	2,62
Электролитические (кроме tantalовых*)	4,2	2,92	2,1
Слюдянные и керамические	2,0	4,4	4,0
Полупроводниковые диоды			
Германиевые	5,0	4,0	2,52
Кремниевые	2,5	3,6	3,28
Транзисторы			
Германиевые	2,0	2,38	2,1
Кремниевые	1,2	3,38	3,22
Трансформаторы и дроссели	2,4	1,93	0,0

*) Для электролитических конденсаторов при $K_H \geq 0,5$.

элемента $T_{\text{эк}}$) или у его корпуса (температура окружающей элемент среды $T_{\text{эс}}$). Учитывая известные соотношения $T_r = T_{\text{эк}} + R_{rk}P_{\text{э}}$; $T_r = T_{\text{эс}} + R_{rc}P_{\text{э}}$, где R_{rk} (R_{rc}) — тепловое сопротивление между критической зоной и корпусом элемента (окружающей средой); $P_{\text{э}}$ — мощность, рассеиваемая элементом, вместо (1.3) получаем

$$\lambda_i = A\lambda_{i0} \exp b [(T_{\text{эс}} - T_{\text{эс0}}) + R_{rc}(P_{\text{э}} - P_{\text{э0}})], \quad (1.4)$$

$$\lambda_i = A\lambda_{i0} \exp b [(T_{\text{эк}} - T_{\text{эк0}}) + R_{rk}(P_{\text{э}} - P_{\text{э0}})], \quad (1.5)$$

где индексом «0» обозначены параметры при стандартных условиях.

Если (1.4) преобразовать, приняв $A=1$, то

$$\lambda_i / \lambda_{i0} = \exp (bT_{\text{эс}} - c + dK_H), \quad (1.6)$$

где λ_{i0} — интенсивность отказов при $T_{\text{эс}} = T_{\text{эс0}}$ и $K_H = K_{H0}$; $c = b(T_{\text{эс0}} + R_{rc}P_{\text{э0}})$; $d = bR_{rc}P_{\text{э0}}$; $K_H = P_{\text{э}}/P_{\text{э0}}$ — коэффициент нагрузки (для конденсаторов $K_H = u_{\text{э}}/u_{\text{э0}}$). Экспериментально полученные коэффициенты b , c , d в (1.6) для наиболее распространенных элементов в РЭА представлены в табл. 1.1.

Чтобы оценить, как меняется интенсивность отказов элементов РЭА при изменении температуры окружающей среды, введем показатель

$$\Delta\lambda(10) = \frac{\lambda_i(T+10) - \lambda_i(T)}{\lambda_i(T)} \cdot 100\%.$$

Он характеризует изменение интенсивности отказов элементов РЭА при изменении температуры окружающей среды на 10 К. Значения $\Delta\lambda$ (10) приведены в табл. 1.2.

В состав РЭА входят элементы многих типов, их надежность по-разному зависит от температуры, поэтому изменение интенсивности отказов РЭА от температуры определяется еще количеством элементов

Таблица 1.2

Изменение интенсивности отказов элементов при изменении их температуры на 10 К

Наименование элемента	$\Delta\lambda$ (10), %
Резисторы	8—25
Полупроводниковые диоды германиевые	65
Полупроводниковые диоды кремниевые	23
Транзисторы германиевые	22
Транзисторы кремниевые	13
Конденсаторы	22—52
Трансформаторы и дроссели	27

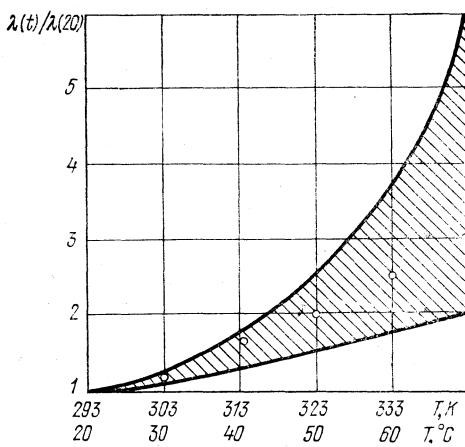


Рис. 1.4. Изменение интенсивности отказов с температурой для РЭА с воздушным охлаждением.

различного типа и не может быть показана так же наглядно, как это сделано было ранее для отдельных элементов. На рис. 1.4 представлена заштрихованная область, полученная при обработке данных по интенсивности отказов для большого числа блоков РЭА с воздушным охлаждением. Как следует из рис. 1.4, при изменении температуры на 10 К интенсивность отказов блоков в температурном диапазоне 293—333 К (20—60°C) изменяется примерно на 15—50%. Тогда интенсивность отказов РЭА в приближенных расчетах может быть оценена по формуле

$$\lambda(T) = \lambda(20) \exp[b(T_{\text{ср}} - 293)], \quad (1.7)$$

где $\lambda(20)$ — интенсивность отказов РЭА при $T_{\text{ср}} = 293$ К (20°C); $T_{\text{ср}}$ — средняя температура воздуха в РЭА; b — экспериментальный коэффициент. Значение экспериментального коэффициента b в (1.7) колеблется в широких пределах. Обычно $b = 0,014$ — $0,033$.

Для грубых оценочных расчетов можно воспользоваться формулой (1.7), приняв среднее значение коэффициента $b = 0,022$:

$$\lambda(T) = \lambda(20) \exp[0,022(T_{\text{ср}} - 293)]. \quad (1.8)$$

Как следует из (1.8), при изменении температуры воздуха внутри блока на 10 К интенсивность отказов в среднем увеличивается на 25%.

Более точный расчет интенсивности отказов РЭА можно выполнить по формулам (1.1), (1.2) и (1.6).

1.5. СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РЭА

В § 1.3 мы ввели понятие «теплофизическое конструирование РЭА» как совокупность методов обеспечения заданного теплового режима РЭА. Однако способы задания теплового режима РЭА могут быть различными. Остановимся более подробно на этом вопросе.

Поскольку надежность элементов РЭА определяется температурой их критических зон, наиболее полным и точным способом задания теплового режима РЭА будет задание температур критических зон всех ее элементов. На практике критические зоны элементов почти всегда недоступны для измерения температуры и указанный способ оказывается малопригодным. Поэтому тепловой режим РЭА задается температурным полем в зонах, которые выбираются из следующих соображений:

- зоны должны быть доступны для измерения;
- по результатам измерения могут быть рассчитаны температуры в критических зонах элементов с необходимой точностью;
- число зон, в которых измеряется температура, должно быть минимальным.

Первое требование не нуждается в дополнительных пояснениях, второе связано с тем, что результаты измерения с большой достоверностью должны позволить сделать заключение о соответствии теплового режима РЭА заданному по ТУ. Причем по результатам измерений не всегда ведется расчет температур в критических зонах. В этом случае второе требование следует читать так: по результатам измерений с необходимой достоверностью может быть сделан вывод о соответствии температур всех элементов заданным в ТУ. Третье требование связано с практическими трудностями организации измерений температур в РЭА. Чем меньше число зон, в которых необходимо измерять температуру в РЭА, тем проще выполнить экспериментальное исследование. Нетрудно заметить, что второе и третье требования противоречивы. Поэтому при выборе зон, в которых задается температура РЭА, необходимо искать компромиссное решение.

Зоны РЭА, в которых обычно задаются температуры, показаны на рис. 1.5. Обязательным является задание температуры исходной зоны, от которой отсчитываются все перегревы остальных зон. Исходная зона в РЭА обычно задается в виде температуры холодного воздуха (или жидкости) на входе в РЭА $T_{вх}$ при принудительном охлаждении и (или) температуры окружающей среды T_c . При естественном охлаждении температура корпуса аппарата T_k (зона 1 на рис. 1.5) характеризует тепловой режим. Температура корпуса аппарата в различных точках имеет различные значения, что показано кривой распределения в зоне 1; обычно задается средняя температура корпуса. При принудительном охлаждении тепловой режим РЭА может задаваться температурами теплоносителя на выходе аппарата или средней (для воздуха $T_{вг}$ или $T_{вср}$ на рис. 1.5). Средняя температура теплоносителя в этом случае приближенно определяется как полусумма значений температур теплоносителя на входе и выходе аппарата.

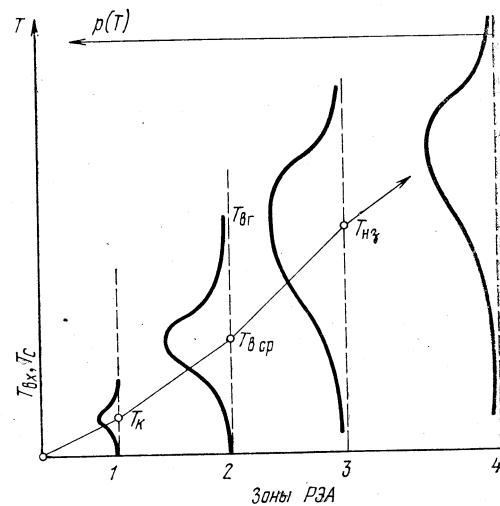


Рис. 1.5. Вероятностное распределение в различных температурных зонах РЭА.

Более полной характеристикой теплового режима аппарата является задание температур окружающей среды для всех элементов РЭА. Кривая распределения этих температур показана в зоне 2 на рис. 1.5. Обычно считают, что средняя температура теплоносителя есть средняя температура окружающей элементы среды:

$$T_{\text{в.ср}} = \frac{T_{\text{вр}} + T_{\text{вх}}}{2} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{в.}i}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где n — количество элементов в РЭА.

Весьма плодотворным является задание температуры нагретой зоны $T_{\text{из}}$ [8], под которой понимается среднеповерхностная температура шасси (платы) и всех смонтированных на ней деталей. Мы еще вернемся к понятию нагретой зоны, а пока определим ее температуру по формуле:

$$T_{\text{из}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{в.}i}.$$

Распределение температур корпусов элементов показано кривой 3 на рис. 1.5, температурное поле критических зон элементов показано кривой 4.

На практике могут встретиться случаи, когда задается температурное поле в особых зонах, характерных для конкретной конструкции РЭА. Наиболее полное и точное задание теплового режима РЭА при использовании зон, доступных для измерения температуры, имеет место при задании температур на корпусе всех элементов РЭА. Попробуем оценить, как при этом выполняется второе требование, т. е. с какой точностью по результатам измерения температуры на корпусе элемента может быть рассчитана температура в его критической зоне.

Расчетное значение температуры критической зоны элемента может быть определено по формуле

$$T_r^{(p)} = T_{\text{в.}}^{(u)} + R_{rk}^{(3)} P_s^{(3)}. \quad (1.9)$$

Здесь и в дальнейшем индексами в скобках обозначается следующее: (р) — расчетные значения, (и) — измеренные значения, (з) — заданные значения, (д) — действительные значения.

В (1.9) вместо $P_s^{(3)}$ желательно подставлять $P_s^{(u)}$, однако в схемах с большим количеством элементов измерение $P_s^{(u)}$ каждого элемента затруднительно, поэтому используют значения $P_s^{(3)}$, указанные в картах электрических режимов.

Действительное значение температуры в критической зоне элемента определяется из

$$T_r^{(d)} = T_{\text{в.}}^{(d)} + R_{rk}^{(d)} P_s^{(d)}. \quad (1.10)$$

Точность расчетного значения температуры в критической зоне элемента по (1.9) зависит от точности измерения температуры на корпусе элемента и точности задания исходных данных. Абсолютная ошиб-

ка расчетного значения температуры в критической зоне элемента определяется выражением

$$\varepsilon = T_r^{(p)} - T_r^{(d)} \quad (1.11)$$

или после подстановки (1.9) и (1.10) в (1.11)

$$\varepsilon = T_{ek}^{(u)} - T_{ek}^{(d)} + R_{rk}^{(3)} P_{\varepsilon}^{(3)} - R_{rk}^{(d)} P_{\varepsilon}^{(d)}. \quad (1.12)$$

В (1.12) значения с индексами (д) и (и) можно считать случайными величинами, следовательно, абсолютная ошибка — тоже случайная величина. Среднее значение абсолютной ошибки определим как математическое ожидание, а отклонение от нее оценим дисперсией. Тогда среднее значение абсолютной ошибки составит [9]

$$M(\varepsilon) = M(T_{ek}^{(u)} - T_{ek}^{(d)}) + M(R_{rk}^{(3)} P_{\varepsilon}^{(3)}) - M(R_{rk}^{(d)} P_{\varepsilon}^{(d)}), \quad (1.13)$$

где M — знак математического ожидания. При качественных измерениях разность $(T_{ek}^{(u)} - T_{ek}^{(d)})$ можно считать пренебрежимо малой, т. е. $M(T_{ek}^{(u)} - T_{ek}^{(d)}) = 0$.

Учитывая постоянство заданных величин, известные правила действия с математическими ожиданиями [9, 10] и принимая случайные величины независимыми, получаем

$$M(\varepsilon) = R_{rk}^{(3)} P_{\varepsilon}^{(3)} - M(R_{rk}^{(d)}) M(P_{\varepsilon}^{(d)}). \quad (1.14)$$

Дисперсию ε определим следующим образом [10]:

$$D(\varepsilon) = M[\varepsilon - M(\varepsilon)]^2$$

или после подстановки значений из (1.12) и (1.13)

$$D(\varepsilon) = D_u + M[(R_{rk}^{(d)})^2] M[(P_{\varepsilon}^{(d)})^2] - [M(R_{rk}^{(d)}) M(P_{\varepsilon}^{(d)})]^2, \quad (1.15)$$

где $D_u = M[(T_{ek}^{(u)} - T_{ek}^{(d)})^2]$ — дисперсия ошибки измерения.

Абсолютные значения случайной и систематической ошибки еще недостаточны для оценки точности расчетного значения температуры критической зоны элемента. Большое значение имеет знак ошибки.

Если $\varepsilon < 0$, т. е. действительное значение температуры критической зоны элемента больше заданной в ТУ, то надежность элемента значительно снижается, а его электрические параметры могут не соответствовать расчетным. Будем называть эту ошибку ошибкой первого вида. Если $\varepsilon > 0$, то, по-видимому, мы напрасно усложняли конструкцию и принимали конструктивные меры для уменьшения температуры элемента, когда этого не требовалось. В этом случае будем говорить об ошибках второго вида. Ошибки первого вида снижают надежность РЭА, ошибки второго вида вызывают ненужное усложнение его конструкции и (или) ухудшение основных технических характеристик (увеличение массы, объема, потребляемой мощности СОТР). По-видимому, ошибки первого вида более нежелательны, поэтому необходимо, чтобы $p(\varepsilon < 0) \ll p(\varepsilon > 0)$, где p — вероятность.

Таким образом, вероятность отрицательной ошибки должна быть гораздо меньше вероятности положительной ошибки. Указанные выше зависимости могут служить для оценки точности задания теплового режима РЭА, если в ТЗ заданы температуры корпусов элементов.

Представляет интерес выяснить, какие численные значения имеют эти оценки для одного из наиболее часто встречающегося элемента РЭА — транзистора средней и большой мощности. Анализ опытных данных показывает, что величины мощности рассеивания для элементов РЭА задаются конструктором несколько завышенными. Обработка опытных данных показывает, что действительные значения мощности рассеивания элементов можно считать случайными с нормальным законом распределения и следующими статистическими характеристиками:

$$M(P_{\text{с}}^{(\text{д})}) \approx 0,8P_{\text{с}}^{(\text{3})}, \quad \sigma(P_{\text{с}}^{(\text{д})}) \approx 0,15P_{\text{с}}^{(\text{3})}.$$

Современные технологические процессы массового производства элементов РЭА дают существенный разброс значений тепловых сопротивлений между критической зоной ($p-n$ -переходом) и корпусом элемента ($R_{\text{рк}}$). Анализ опытных данных по измерениям тепловых сопротивлений показывает, что разброс значений $R_{\text{рк}}$ для одного и того же типа полупроводникового прибора достигает 1:2, 1:5, а у некоторых типов и 1:10 [11].

Отсюда же следует, что в первом приближении можно принять закон распределения этой случайной величины нормальным с математическим ожиданием $M(R_{\text{рк}}^{(\text{д})}) = 0,75R_{\text{рк}}^{(\text{3})}$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma_{\text{рк}}(R_{\text{рк}}^{(\text{д})}) = 0,083R_{\text{рк}}^{(\text{3})}$, где $R_{\text{рк}}^{(\text{3})}$ — заданные в ТУ завода-изготовителя значения. Таким образом, конструкторы РЭА и ее элементов значительно завышают параметры элементов, чтобы уменьшить вероятность ошибки первого вида.

Подставляя статистические параметры в (1.14), (1.15) и пренебрегая ошибкой измерения по сравнению с другими ошибками, для транзисторов получаем

$$M(\varepsilon) = 0,4R_{\text{рк}}^{(\text{3})}P_{\text{с}}^{(\text{3})}, \quad \sigma_{\varepsilon} = \sqrt{D(\varepsilon)} = 0,128R_{\text{рк}}^{(\text{3})}P_{\text{с}}^{(\text{3})}.$$

Считая в первом приближении распределение ошибки нормальным и пользуясь таблицами для интегрального закона его распределения [12], получаем значения вероятностей ошибок первого и второго вида

$$p(\varepsilon < 0) = \Phi(-M_{\varepsilon}/\sigma_{\varepsilon}) = \Phi(-3,1) = 0,0004;$$

$$p(\varepsilon > 0) = 1 - p(\varepsilon < 0) = 0,9996.$$

Вероятность ошибки первого вида мала, т. е. с большой достоверностью можно утверждать следующее: если измеренные температуры корпусов элементов РЭА меньше либо равны заданным по ТЗ, то температуры критических зон элементов меньше либо равны расчетным.

Менее точное задание теплового режима РЭА имеет место при задании температур окружающей среды для всех элементов. Оценим точность, с которой может быть рассчитана температура критической зоны транзистора по результатам измерения температуры окружающей его среды.

Расчетные и действительные значения температуры критической зоны элемента могут быть заданы следующими формулами:

$$T_r^{(\text{p})} = T_{\text{сc}}^{(\text{н})} + R_{\text{сk}}^{(\text{s})}P_{\text{с}}^{(\text{3})} + R_{\text{рk}}^{(\text{s})}P_{\text{с}}^{(\text{3})},$$

$$T_r^{(\text{д})} = T_{\text{сc}}^{(\text{д})} + R_{\text{сk}}^{(\text{д})}P_{\text{с}}^{(\text{д})} + R_{\text{рk}}^{(\text{д})}P_{\text{с}}^{(\text{д})},$$

где $R_{\text{ск}}$ — тепловое сопротивление между корпусом и окружающей элемент средой.

Определяя ошибку так же, как это было сделано выше, и повторяя рассуждения, которым мы следовали при выводе формул (1.14) и (1.15), получаем следующие выражения для математического ожидания и дисперсии ошибки:

$$M(\varepsilon) = P_{\text{s}}^{(3)} (R_{\text{ск}}^{(3)} + R_{r\text{k}}^{(3)}) - M(P_{\text{s}}^{(\Delta)}) [M(R_{\text{ск}}^{(\Delta)}) + M(R_{r\text{k}}^{(\Delta)})];$$

$$D(\varepsilon) = M[(P_{\text{s}}^{(\Delta)})^2] M[(R_{\text{ск}}^{(\Delta)} + R_{r\text{k}}^{(\Delta)})^2] - [M(P_{\text{s}}^{(\Delta)})]^2 [M(R_{\text{ск}}^{(\Delta)}) + M(R_{r\text{k}}^{(\Delta)})]^2 + D_u.$$
(1.16)

Формулы (1.16) используются для оценки точности задания теплового режима в том случае, если в ТЗ заданы температуры окружающей элементы среды.

Найдем численные значения этих оценок для транзистора. Примем следующие значения числовых характеристик случайной величины теплового сопротивления между корпусом и окружающей средой транзистора, которые хорошо согласуются с опытными данными в реальных конструкциях РЭА:

$$M(R_{\text{ск}}^{(\Delta)}) = 1,2R_{\text{сн}}^{(3)}; \quad \sigma_{\text{ск}} = 0,25R_{\text{ск}}^{(3)},$$

а также, что часто встречается на практике,

$$R_{\text{ск}}^{(3)} = R_{r\text{k}}^{(3)}.$$

После подстановки в (1.16) и преобразований получим

$$M(\varepsilon) = 0,44R_{r\text{k}}^{(3)} P_{\text{s}}^{(3)}; \quad \sigma_{\varepsilon} = 0,225R_{r\text{k}}^{(3)} P_{\text{s}}^{(3)}.$$

Тогда для ошибок первого и второго вида имеем следующие значения: $p(\varepsilon \leq 0) = \Phi(-1,96) = 0,025$, $p(\varepsilon > 0) = 0,975$, т. е. вероятность ошибки первого вида значительно увеличилась. Следовательно, если измеренные температуры окружающей среды элементов меньше либо равны заданным в ТУ, то температуры критических зон элементов не превышают расчетных значений с гораздо меньшей вероятностью, чем при задании температур корпусов элементов РЭА.

Для того чтобы вероятность ошибки первого вида при задании температур на корпусе и окружающей элементы среды были одинаковы, необходимо увеличить систематическую ошибку. Величину, на которую следует увеличить систематическую ошибку, легко определить из соотношения между $M(\varepsilon)$ и σ_{ε} для корпуса и окружающей элемент среды $0,4/0,128 = (0,44 + \varepsilon_1)/0,225$ и

$$\varepsilon_1 = 0,26R_{r\text{k}}^{(3)} P_{\text{s}}^{(3)}.$$

Перепад температуры между $p-n$ -переходом и корпусом полупроводникового триода на практике колеблется в следующих пределах: $\theta_{r\text{k}} = R_{r\text{k}} P_{\text{s}} = 20-60$ К. Тогда $\varepsilon_1 = 5-15$ К, т. е. необходимо увеличить систематическую ошибку на 5-15 К (в различных конструкциях РЭА по-разному). Увеличение систематической ошибки можно получить

только снижением действительных температур окружающей элементы среды на ту же величину.

Следовательно, при задании теплового режима РЭА в виде температур окружающей элементы среды необходимо уменьшить все температуры на 5—15 К по отношению к заданным в ТЗ, чтобы гарантировать с достаточно большой вероятностью соответствие теплового режима РЭА заданному в ТЗ (т. е. с той же вероятностью, что и при задании температур на корпусах элементов). Безобидная, на первый взгляд, процедура задания температурного режима РЭА в виде температур окружающей среды вместо температур корпуса элементов приводит к необходимости значительно уменьшить температуру РЭА, что в теплонагруженной аппаратуре может быть достигнуто только увеличением габаритов РЭА, СОТР, потребляемой СОТР мощности. В то же время задание температуры окружающей элементы среды не уменьшает числа зон РЭА, подлежащих измерениям.

При принудительном воздушном охлаждении РЭА часто тепловой режим задается значением температуры воздуха на выходе аппарата $T_{вг}$. Причем тепловой режим РЭА считается допустимым, если $T_{вг}$ не превышает заданные в ТЗ температуры окружающей элементы среды. Задание теплового режима в таком виде удобно, так как измерению температуры подлежит одна зона РЭА.

Оценим точность, с которой может быть рассчитана температура критической зоны транзистора по результатам измерения температуры воздуха на выходе аппарата.

В реальных аппаратах температура окружающей элементы среды есть случайная величина со следующими статистическими характеристиками:

$$M(T_{sc}^{(д)}) = (T_{вг} + T_{вх})/2, \sigma(T_{sc}^{(д)}) \approx 5 - 10 \text{ K}.$$

Повторяя рассуждения, которым мы следовали при выводе формул (1.14) и (1.15), получаем

$$T_r^{(p)} = T_{вг}^{(u)} + R_{ск}^{(3)} P_{\vartheta}^{(3)} + R_{rk}^{(3)} P_{\vartheta}^{(3)};$$

$$T_r^{(д)} = T_{sc}^{(д)} + R_{ск}^{(д)} P_{\vartheta}^{(д)} + R_{rk}^{(д)} P_{\vartheta}^{(д)};$$

$$M(\varepsilon) = (T_{вг} - T_{вх})/2 + R_{ск}^{(3)} P_{\vartheta}^{(3)} + R_{rk}^{(3)} P_{\vartheta}^{(3)} - M(P_{\vartheta}^{(д)}) [M(R_{ск}^{(д)}) - M(R_{rk}^{(д)})];$$

$$D(\varepsilon) = D_1(\varepsilon) + D_2(\varepsilon),$$

где $D_1(\varepsilon)$ определяется по (1.16), а $D_2(\varepsilon) = \sigma^2(T_{sc}^{(д)}) \approx 25 - 100$.

Пренебрегая ошибкой измерения, после преобразования и подстановки численных значений

$$R_{rk} P_{\vartheta} = 40 \text{ K}, \sigma(T_{sc}^{(д)}) = 10 \text{ K}, (T_{вг} - T_{вх})/2 = 5 - 15 \text{ K},$$

получаем

$$M(\varepsilon) \approx 25 \text{ K}; \sigma \approx 12 \text{ K}; p(\varepsilon < 0) = \Phi(-25/12) = 0,02.$$

Ошибка первого вида получилась того же порядка, как и при задании температуры окружающей элементы среды. Для того чтобы снизить ошибку первого вида до значения, соответствующего заданию тем-

пературы на корпусе, необходимо, чтобы температура воздуха на выходе аппарата была ниже заданных в ТЗ температур окружающей элементы среды примерно на 10 К.

Таким образом, если в ТЗ заданы температуры окружающей элементы среды, то тепловой режим РЭА с принудительным воздушным охлаждением может быть задан только в одной зоне — на выходе из аппарата. Оценка теплового режима РЭА по температуре воздуха на его выходе имеет ту же точность, что и оценка по температуре окружающей элементы среды, но гораздо меньшую точность, чем оценка по температурам корпусов элементов. Метод задания теплового режима РЭА по температуре воздуха на выходе аппарата удобен, так как проверка теплового режима сводится к измерению температуры в одной зоне. Однако он обладает всеми недостатками предыдущего метода, т. е. чтобы гарантировать с высокой вероятностью соответствие теплового режима РЭА заданному в ТЗ, необходимо уменьшить его температуру примерно на 10 К, что может привести к необоснованному увеличению массы, объема и потребляемой СОТР мощности. Поэтому такой метод задания теплового режима можно рекомендовать только для РЭА, работающей в облегченном тепловом режиме, когда необходимость дополнительного снижения температуры не приводит к существенному увеличению массы, габаритов и энергопотребления радиоэлектронного комплекса.

Мы провели численный анализ только для одного типа элементов — транзистора, однако практика показывает, что полученные выводы качественно пригодны и при рассмотрении других видов элементов РЭА массового применения.

Приведенные выше соображения позволяют рекомендовать конструктору руководствоваться следующими соображениями при выборе зон для задания теплового режима РЭА.

1. Наиболее точным методом, позволяющим с большой вероятностью гарантировать соответствие теплового режима РЭА техническому заданию, является метод задания температур корпуса элементов РЭА.

2. Метод задания теплового режима РЭА по температурам окружающей элементы среды имеет низкую точность и не уменьшает число температурных зон РЭА, подлежащих измерению. Поэтому для РЭА с естественным охлаждением он рекомендован быть не может.

3. При задании теплового режима РЭА с принудительным воздушным охлаждением по температурам окружающей элементы среды достаточно измерить температуру только в одной зоне — на выходе РЭА, что весьма удобно. Большую вероятность соответствия теплового режима РЭА заданному можно гарантировать, если температура воздуха на выходе из блока будет примерно на 10 К ниже температур окружающей элементы среды. Поэтому для теплонагруженной РЭА с принудительным воздушным охлаждением метод задания теплового режима по температуре окружающей элементы среды не может быть рекомендован, так как это приведет к необоснованному уменьшению температуры РЭА и соответственно к увеличению объема, массы и потребляемой СОТР мощности. Задание теплового режима РЭА с принудительным воздушным охлаждением по температуре окружающей элементы среды может быть рекомендовано только для РЭА, работающей в облегченном тепловом режиме, когда дополнительное снижение температуры РЭА не приводит к существенному ухудшению характеристик СОТР.

Применение наиболее точного метода задания теплового режима РЭА по температурам корпусов ее элементов связано с трудностями: при испытаниях РЭА необходимо измерять температуру большого количества зон; в ТУ на элементы часто не приводятся допустимые значения температур корпусов.

Для успешного внедрения метода задания теплового режима РЭА по температурам корпуса ее элементов необходимо разработать процедуры испытаний, позволяющие уменьшить количество подлежащих измерению температуры зон, а также в ТУ на новые элементы указывать допустимые значения температуры корпуса.

Глава 2

СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ РЭА

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ

При обеспечении необходимого теплового режима РЭА основные трудности связаны с отводом тепла, т. е. охлаждением. В этой главе мы познакомим читателя с различными способами охлаждения РЭА.

Для охлаждения РЭА применяется множество способов, поэтому при их классификации учтем только основные, наиболее часто применяемые. Остальные способы кратко опишем в конце этого параграфа.

В процессе переноса тепловой энергии в РЭА существуют три способа передачи тепла: теплопроводность, конвекция и излучение. В зависимости от вида конвективного переноса тепловой энергии способы охлаждения РЭА часто разделяют на классы. При конвективном отводе тепла от РЭА используются теплоносители в различных фазовых состояниях, перемещение которых осуществляется естественным или принудительным образом. Учитывая тип и состояние теплоносителя, а также причину, вызвавшую его движение, способы охлаждения РЭА можно разделить на следующие основные классы: газовое (воздушное), жидкостное, испарительное, а также естественное и принудительное.

Естественное воздушное охлаждение РЭА является наиболее простым, надежным и дешевым способом охлаждения и осуществляется без затраты дополнительной энергии. Однако интенсивность такого охлаждения невелика, поэтому использование этого способа возможно при небольших удельных мощностях рассеивания (мощностях, рассеиваемых единицей поверхности или объема), т. е. в РЭА, работающей в облегченном тепловом режиме. При естественном воздушном охлаждении конвективный теплообмен осуществляется между элементами РЭА и воздухом, причем воздух перемещается за счет энергии, рассеиваемой элементами РЭА.

Различают две основные схемы естественного воздушного охлаждения блоков и стоек РЭА: с герметичным и перфорированным кожухом (рис. 2.1). В герметичном кожухе (рис. 2.1,а) конвективный теплообмен осуществляется от элементов РЭА к воздуху внутри аппарата, от воздуха к кожуху аппарата, от кожуха к окружающей среде (воздуху). При перфорированном кожухе (рис. 2.1,б) конвективный теплообмен в основном происходит между элементами РЭА и окружающей средой (воздухом), проникающей сквозь перфорации. Естественное воздушное охлаждение РЭА с перфорированным кожухом позволяет обеспечить

тепловой режим при более высоких удельных мощностях рассеивания, чем при герметичном кожухе.

Интенсификация теплообмена при естественном воздушном охлаждении возможна за счет рационального конструирования РЭА: оптимального расположения элементов РЭА и перфораций кожуха, применения экранов, оребрения отдельных поверхностей, использования теплопроводных шин, замазок, компаундов, соответствующей окраски излучающих поверхностей и т. п.

Для интенсификации конвективного теплообмена между РЭА и окружающей средой используют принудительное движение воздуха, создаваемое специальными устройствами, главным образом вентиляторами. Работа устройств приводит к дополнительному расходу энергии.

Принудительное воздушное охлаждение получило наибольшее распространение, так как позволяет при более высоких удельных мощностях рассеивания обеспечить нормальный тепловой режим РЭА при относительной простоте и небольшой стоимости СОТР.

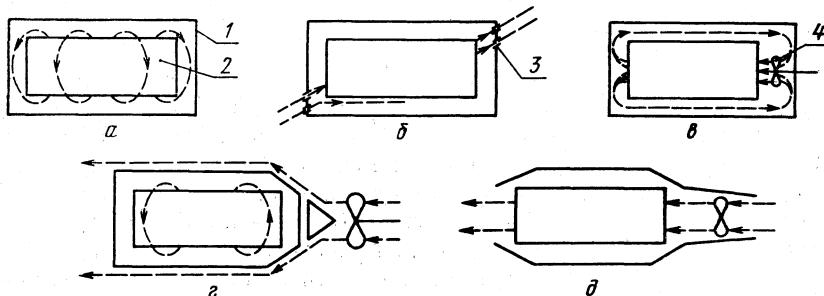


Рис. 2.1. Схемы воздушного охлаждения блоков:

а — естественное воздушное охлаждение РЭА в герметичном кожухе; б — то же в перфорированном кожухе; в — принудительное воздушное охлаждение РЭА с внутренним перемешиванием; г — то же с наружным обдувом; д — то же холдным воздухом; 1 — кожух аппарата; 2 — платы с элементами РЭА; 3 — перфорированные отверстия; 4 — вентилятор.

Различают три основные схемы принудительного воздушного охлаждения: внутреннее перемешивание, наружный обдув, продувку (см. рис. 2.1, в — д). Схема принудительного воздушного охлаждения РЭА с внутренним перемешиванием приведена на рис. 2.1, в. В этой схеме для интенсификации конвективного теплообмена между элементами РЭА и герметичным кожухом внутри аппарата установлен вентилятор. Теплообмен между кожухом аппарата и окружающей средой происходит так же, как при естественном воздушном охлаждении РЭА с герметичным кожухом. Схема принудительного воздушного охлаждения РЭА с наружным обдувом приведена на рис. 2.1, г. В этом случае теплообмен между элементами РЭА и воздухом внутри герметичного кожуха осуществляется так же, как при естественном воздушном охлаждении РЭА, а для интенсификации теплообмена между кожухом и воздухом окружающей среды установлен вентилятор. На рис. 2.1, д приведена схема с продувкой, здесь воздух из окружающей аппарат среды или предварительно охлажденный в специальных устройствах (теплообменниках, кондиционерах и т. д.) пропускается через специальные каналы и охлаждает элементы РЭА. Эта схема применяется наиболее широко в практике конструирования СОТР РЭА.

Первые две схемы (с внутренним перемешиванием и наружным обдувом) сочетают признаки принудительного и естественного охлаждения. Поэтому в дальнейшем в зависимости от удобства изложения мы будем их относить либо к принудительному, либо к естественному способу охлаждения.

Естественное жидкостное охлаждение платы с элементами или больших элементов РЭА заключается в погружении их в бак с жидкостью. Интенсификация конвективного теплообмена происходит за счет более высоких коэффициентов теплоотдачи между элементами РЭА и жидкостью, чем между элементами и воздухом. Однако этот метод охлаждения применяется редко, так как конструкция РЭА значительно усложняется и требуются специальные покрытия для элементов.

Принудительное жидкостное охлаждение применяется при высоких удельных мощностях рассеивания. Наибольшее распространение этот способ получил при охлаждении больших элементов, когда однофазная жидкость прокачивается насосом через специальные каналы в охлаждаемых узлах приборов (электроды мощных ламп, трансформаторы и т. д.). При отводе тепла от блоков жидкость прокачивается через каналы, выполненные в платах или кожухе аппарата.

В качестве жидких теплоносителей обычно применяются: вода, водоспиртовые смеси (антифризы), кремнийорганические и фтороорганические жидкости. Выбор типа теплоносителя является одной из главных проблем при разработке принудительного жидкостного охлаждения, так как к теплоносителям предъявляются разнообразные требования (теплофизические, электрические и др.). Этот способ, как правило, необходим там, где нужно избежать кипения жидкости даже в локальных областях, так как в режиме кипения возможно появление гидродинамической неустойчивости, вибраций (шумов) и ухудшение свойств жидкости. При жидкостном принудительном охлаждении возможны все три режима движения: ламинарный, переходный и турбулентный. Опыт проектирования таких систем показывает, что чаще всего мы встречаемся с переходным либо турбулентным режимом и гораздо реже с ламинарным. Конструкция РЭА при жидкостном охлаждении, как правило, значительно сложнее, чем при воздушном. Однако при высоких удельных мощностях рассеивания жидкостное охлаждение РЭА является единственным возможным, поэтому в современных радиоэлектронных приборах этот вид охлаждения находит широкое применение.

Естественное испарительное охлаждение обычно позволяет повысить удельную мощность рассеивания РЭА и применяется для теплонаруженных блоков и больших элементов. Охлаждаемая поверхность погружается в жидкость, над которой имеется паровой объем, отвод тепла осуществляется в процессе кипения жидкости на охлаждаемой поверхности. Движение теплоносителя происходит за счет разности плотностей. Разность температур между охлаждаемой поверхностью и кипящей жидкостью обычно мала, поэтому температура кипения выбранного теплоносителя при определенном давлении должна быть чуть ниже заданной в ТЗ допустимой температуры охлаждаемой поверхности.

Рассматриваемый способ охлаждения радиоэлектронной аппаратуры имеет ряд особенностей. При определенных значениях удельных мощностей рассеивания жидкость на охлаждаемой поверхности начинает кипеть, возникают пузырьки, которые отрываются от этой поверхности.

и движутся к границе раздела жидкость — пар. Движение пузырей вызывает перемешивание жидкости вблизи центров парообразования. По мере роста мощности, рассеиваемой охлаждаемой поверхностью, количество действующих центров парообразования и частота отрыва пузырей возрастает и коэффициент теплоотдачи увеличивается. Этот режим кипения называется пузырьковым и часто применяется при естественном испарительном охлаждении РЭА. При значительном увеличении рассеиваемой охлаждаемой поверхностью мощности возникающие на этой поверхности пузыри сливаются в сплошную пленку, которая оттесняет жидкость, от поверхности, и условия теплоотдачи резко ухудшаются. Этот режим кипения называется пленочным и сопровождается резким повышением температуры охлаждаемой поверхности. Значения удельной мощности рассеивания, коэффициента теплоотдачи и других параметров, соответствующих переходу пузырькового режима кипения в пленочной, называют критическими, а само явление — кризисом кипения. Возникновение кризиса кипения зависит от многих факторов, но главным образом от типа теплоносителя, удельной рассеиваемой мощности и характера охлаждаемой поверхности. Возможен и обратный переход: от пленочного кипения к пузырьковому. Поэтому различают два кризиса кипения, первый при переходе от пузырькового к пленочному, второй — от пленочного к пузырьковому.

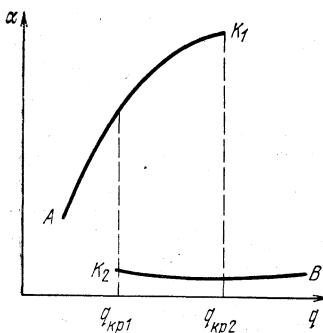


Рис. 2.2. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от плотности теплового потока q при естественном испарительном охлаждении.

На рис. 2.2 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи α от удельной рассеиваемой мощности при естественном испарительном охлаждении. Как следует из этого рисунка, при увеличении удельной рассеиваемой мощности коэффициент теплоотдачи увеличивается по кривой AK_1 . При некотором значении удельной рассеиваемой мощности q_{kp2} происходит скачкообразное уменьшение коэффициента теплоотдачи, что соответствует переходу от пузырькового к пленочному режиму кипения — первому кризису кипения. При дальнейшем увеличении рассеиваемой мощности коэффициент теплоотдачи меняется по кривой K_2B . При снижении нагрузки и некотором значении q_{kp1} ($q_{kp1} < q_{kp2}$) происходит переход от пленочного к пузырьковому кипению — второй кризис кипения.

На практике обычно $q_{kp1} \approx 0,25q_{kp2}$. При конструировании РЭА с естественным испарительным охлаждением необходимо обеспечить пузырьковый режим кипения при всех возможных на практике рабочих и аварийных нагрузках РЭА.

Естественное испарительное охлаждение считается одним из перспективных, поэтому в последнем десятилетии появилось много работ по исследованию этого способа охлаждения. Схемы могут быть весьма разнообразны, однако общим для всех является использование испарения и кипения жидкости для отвода тепла и отсутствие механических устройств для движения жидкости и пара. Широкое применение получают фитильные испарительные системы и так называемые «тепловые трубы». В этих системах для транспортировки жидкости используется капиллярный эффект. Охлаждаемая поверхность не погружается в жидкость, а смачивается жидкостью, которая находится в капиллярах фи-

тиля, обволакивающего поверхность. Отвод тепла от охлаждаемой поверхности осуществляется испарением жидкости из капилляров фитиля. Как и в описанном выше случае, при определенных значениях теплового потока режим испарения переходит в режим пузырькового кипения. При дальнейшем увеличении теплового потока и более интенсивном пузырьковом кипении происходит «запаривание» капиллярной структуры, паровые пузыри сливаются в крупные образования, резко падает коэффициент теплоотдачи. Таким образом, кризис кипения в этих системах может иметь место при тепловых потоках, соответствующих развитого пузырькового кипения теплоносителя.

Принудительное испарительное охлаждение выполняется примерно по такой же схеме, как и принудительное жидкостное охлаждение. Жидкость с помощью насоса прокачивается через специальные каналы в охлаждаемых узлах. Если допустимая температура охлаждаемой поверхности будет выше температуры насыщения теплоносителя при данном давлении, а температура теплоносителя в ядре потока поддерживается равной или меньшей температуры насыщения, то в небольшом поверхностном слое вблизи охлаждаемой поверхности начнется процесс пузырькового кипения. Возникающие в поверхностном слое пузыри будут под действием потока жидкости удаляться с поверхности и конденсироваться в ядре потока. Зарождение, движение и конденсация паровых пузырей вызывают интенсивный теплообмен между поверхностным слоем и ядром потока жидкости (особенно, если оно недогрето). При этом плотность теплового потока может достигать очень больших величин. Предельные мощности рассеивания ограничены переходом пузырькового режима кипения в пленочный. Однако благодаря интенсивному движению холодного ядра жидкости кризис кипения при принудительном испарительном охлаждении наступает при гораздо более высокой мощности рассеивания, чем при естественном испарительном охлаждении.

Таблица 2.1

Относительные параметры газовых теплоносителей

Газ	Весовой расход	Объемный расход	Коэффициент теплоотдачи	Потери давления	Мощность вентилятора	Дизэлектрическая постоянная
Воздух	1	1	1	1	1	1
Гелий	0,19	1,4	1,52	0,37	0,93	0,13
Азот	0,97	1	1	1,04	0,88	1
Водород	0,07	0,98	1,44	0,1	0,09	0,07
Двуокись углерода	1,14	0,68	1,05	0,65	0,59	—
Аргон	1,94	1,4	0,62	2,47	3,45	—

Принудительное испарительное охлаждение является самым эффективным из всех перечисленных способов охлаждения и позволяет обеспечить нормальный тепловой режим РЭА при максимальных удельных мощностях рассеивания.

Рассмотрим еще ряд способов охлаждения, не получивших широкого распространения, но представляющих определенный интерес. Ранее мы их назвали специальными.

В некоторых исследованиях предлагаётся использовать для охлаждения РЭА вместо воздуха другие газы. В табл. 2.1 приведены относительные значения основных параметров некоторых газов по сравнению с воздухом при атмосферном давлении и температуре газа 273 К (20°C). Сравнение проведено при условии, что все газы снимают одинаковые тепловые нагрузки при одинаковых температурах газов на входе и выходе канала и турбулентном течении. Отметим, что применение специальных газов для охлаждения РЭА связано с большими конструктивными трудностями и может быть оправдано при создании герметичных замкнутых контуров с постоянной подпиткой в условиях, когда любой газ необходимых параметров, в том числе и воздух, одинаково трудно приготовить. Такие условия могут наблюдаться в контейнерах высотных самолетов и космических аппаратов.

Для защиты элементов РЭА от внешних воздействий: вибрации, ускорений, понижения давления, влажности и запыленности атмосферы — применяются заливочные компаунды. Для облегчения теплового режима аппарата, залитого компаундом, используются компаунды с высоким коэффициентом теплопроводности (теплопроводные компаунды). Увеличение теплопроводности компаунда достигается применением специальных наполнителей, таких как медная и алюминиевая пудра, молотая двуокись кремния и пр. Применение наполнителя не должно ухудшать физико-химические параметры компаунда и технологические качества при заливке. Применение лучших теплопроводных компаундов позволяет увеличить коэффициент теплопроводности по сравнению с обычными до 10 раз и, следовательно, значительно снизить перегревы элементов РЭА, залитых компаундом.

При кратковременном режиме работы РЭА (см. § 1.2) применяются как основные, так и специальные способы охлаждения. При использовании основных способов охлаждения следует иметь в виду, что рекомендации по их применению для длительного режима работы не всегда приемлемы для кратковременного режима. Каждый раз необходимо учитывать конкретные условия.

Специальные способы охлаждения при кратковременном режиме работы РЭА заключаются в основном в использовании различного типа тепловых аккумуляторов. Простейшим тепловым аккумулятором является масса металлических конструкций блока РЭА: платы, радиаторы, крепежные детали, кожух и т. д. Конечно, эти конструкции могут быть использованы в качестве аккумулятора тепла, только при наличии хорошего теплового контакта с элементами РЭА. Если полная теплоемкость конструкции достаточна, то при кратковременном режиме работы РЭА можно обеспечить нормальный тепловой режим элементов до конца цикла. В противном случае необходимо увеличивать массу и объем конструкции, что не всегда возможно и часто нерационально, поэтому возможности указанного метода аккумуляции тепла ограничены. В качестве теплового аккумулятора могут быть использованы части конструкции, оборудования и материалы, предназначенные для других целей, например: корпус космического корабля, топливо в баках самолета. Сложность компоновки и обеспечения теплового контакта с элементами РЭА ограничивает применение этих устройств.

При использовании оборудования и конструкций носителей в качестве тепловых аккумуляторов иногда применяется их предварительное захолаживание. Так, перед запуском ракеты или взлетом самолета с малым временем полета с помощью мощных наземных охлаждающих

устройств может быть значительно снижена температура отсеков с электронным оборудованием, что в значительной степени увеличивает аккумулирующую способность. Напомним, что полная теплоемкость системы определяется не только массой и теплоемкостью составляющих ее частей, но и разностью между начальной и конечной температурами системы.

Иногда для аккумуляции тепловой энергии, выделяемой РЭА в кратковременном режиме, применяют специальные вещества, поглощающие тепловую энергию в процессе фазовых превращений или химических реакций [13]. Если температура плавления некоторого вещества лежит в диапазоне допустимых температур РЭА и теплота плавления его достаточно велика, то оно может быть использовано в качестве аккумулятора тепла. Такими веществами могут служить воск, парафин и другие химические соединения. Повысить поглощающую способность можно подбором веществ, температуры плавления и кипения которых лежат в диапазоне допустимых температур для РЭА. При этом будет использоваться не только теплота плавления, но и теплота испарения.

Эндотермические химические реакции между веществами и эндотермическое растворение, происходящие при допустимой для РЭА температуре, также используются для аккумуляции тепла. Исследование веществ, которые успешно могут применяться в качестве тепловых аккумуляторов, продолжается и в настоящее время.

Тепловые аккумуляторы используются в РЭА, работающей в периодическом режиме. В этом случае тепловой аккумулятор в период импульса должен поглощать тепловую энергию от РЭА, а в период паузы отдавать ее в окружающую среду. Применение тепловых аккумуляторов в этом случае позволяет значительно снизить затраты на охлаждение РЭА.

Для охлаждения отдельных элементов РЭА, требующих более низких температур, чем остальные элементы РЭА, применяются микрохолодильники. В качестве микрохолодильников в основном применяются вихревые трубы, термоэлектрические батареи и расширительные газовые машины [14].

Нормальные режимы работы для некоторых элементов РЭА могут быть обеспечены только при очень низких (криогенных) температурах. Устройства криогенной техники, применяемые для этой цели, являются самостоятельной областью исследования и здесь не рассматриваются.

В заключение заметим, что способы охлаждения РЭА существенно влияют на ее конструкцию, поэтому их нужно выбирать на ранней стадии конструирования. В последующих параграфах этой главы мы познакомим читателя с особенностями конструкций РЭА при различных способах воздушного охлаждения. Эти материалы, по нашему мнению, должны расширить кругозор конструктора, но ни в коем случае не ограничить его творчество в поисках лучших решений.

2.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЭА С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Воздушное охлаждение в настоящее время является основным способом обеспечения теплового режима РЭА. Это объясняется простотой конструкций, надежностью, удобством эксплуатации и ремонта РЭА

с воздушным охлаждением. Анализ теплонагруженной РЭА, выпускаемой и разрабатываемой промышленностью, показывает, что более 97% всей аппаратуры имеет воздушное охлаждение, причем около 95% выпускается с принудительным воздушным охлаждением.

Конструкция РЭА представляет собой совокупность большого числа элементов и других деталей с разными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной электрической, пространственной, механической, тепловой, магнитной и энергетической взаимосвязи. Эта совокупность обеспечивает выполнение заданных функций в определенных условиях использования, а также предусматривает возможность ее повторения в условиях производства.

Конструирование РЭА как наука развивалось параллельно совершенствованию основных функций радиоэлектронных комплексов. На раннем этапе создания РЭА использовались сравнительно простые конструктивные решения, которые усложнялись по мере развития и усложнения основных функций РЭА. В последнем двадцатилетии непрерывно совершенствуются элементы РЭА и соответственно конструкции аппаратов. Созданы принципиально новые элементы на базе полупроводников, освоены новые способы изготовления классических элементов на основе тонких пленок; широко применяются печатный монтаж, герметизация, обволакивание и пропитка. Создана большая номенклатура функциональных узлов и модулей, внедряются функционально-узловой метод конструирования и принципы модульного конструирования с унификацией размеров элементов, узлов, блоков и стоек. Основным направлением в конструировании на современном этапе является комплексная миниатюризация РЭА с применением микроэлектронных элементов различного исполнения.

Конструктивная схема РЭА и ее реализация зависят от многих факторов, главными из которых являются: функциональное назначение, типы элементов и способы их монтажа, условия использования и способ охлаждения.

Самостоятельную конструктивную единицу РЭА обычно называют блоком. Блок может состоять из самостоятельных узлов или субблоков и т. п. Несколько блоков объединяют в автономную конструктивную часть, которую называют стойкой, шкафом, контейнером. Шкаф и контейнер может состоять из нескольких стоек. Если на лицевую панель стойки шкафа выведены приборы и устройства контроля и управления, то иногда конструктивное исполнение меняют для удобства управления процессом и называют такой шкаф пультом. Вообще, деление РЭА на блоки, стойки, шкафы и т. д. чисто условное и применяется для обозначения похожих конструктивных единиц. Внутри стойки располагаются в определенном порядке блоки, которые можно легко вынуть из стоек для осмотра, ремонта или настройки. Блоки расположены на металлическом каркасе (раме), разделенном на ячейки. Каркас стойки помещается в кожух (шкаф), с помощью которого образуются каналы для охлаждения РЭА. В зависимости от способа охлаждения кожух может быть герметичным или негерметичным.

На рис. 2.3 приведена конструктивная схема стойки естественного охлаждения с перфорированным кожухом. Перфорационные отверстия выполнены в виде жалюзи на верхней и нижней частях боковых стенок кожуха. В нижней части кожуха иногда делается поддон, в который поступает холодный воздух и распределяется по рядам блоков.

В большинстве случаев стойки выполняются с принудительным воздушным охлаждением и продувом наружного воздуха или воздуха от специальной системы. Принудительное воздушное охлаждение стоек с внутренним перемешиванием или наружным обдувом применяется редко. В зависимости от способа подачи воздуха в блоки различают два типа конструкции стоек: стойки с последовательным продувом блоков, стойки с параллельным продувом блоков.

В первом случае общий поток воздуха проходит последовательно ряд блоков; холодный воздух, поступая из первого блока в каждый следующий блок, все более нагревается, через все блоки проходит одинаковое количество воздуха, если не учитывать утечки.

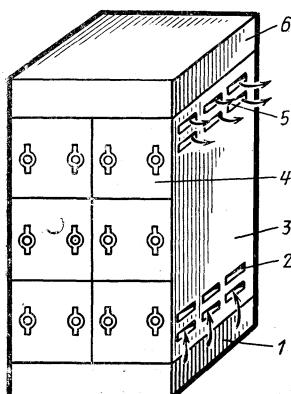


Рис. 2.3. Стойка с перфорированным кожухом:

1 — нижнее основание; 2, 5 — жалюзи; 3 — кожух; 4 — блоки; 6 — верхнее основание.

Во втором случае воздух из общего канала параллельно распределяется между блоками, в каждый блок поступает холодный воздух; количество воздуха, продуваемого через блок, меньше, чем поступает в стойку.

При многорядном расположении блоков может применяться последовательно-параллельное или параллельно-последовательное охлаждение блоков.

Конструктивная схема стойки с принудительным воздушным охлаждением и последовательным продувом блоков показана на рис. 2.4. Стойка состоит из несущего металлического каркаса (рамы) 2, нижнего и верхнего оснований 1, 4, выполненных в виде полых параллелепипедов, кожуха 5 и регулирующих решеток 3, 6. Верхнее и нижнее основания служат воздуховодами. Принудительное движение воздуха по направлению, указанному стрелками, осуществляется с помощью индивидуальных вентиляторов либо от централизованной системы. Индивидуальные вентиляторы (или вентилятор) могут устанавливаться в верхнем либо нижнем основаниях. При использова-

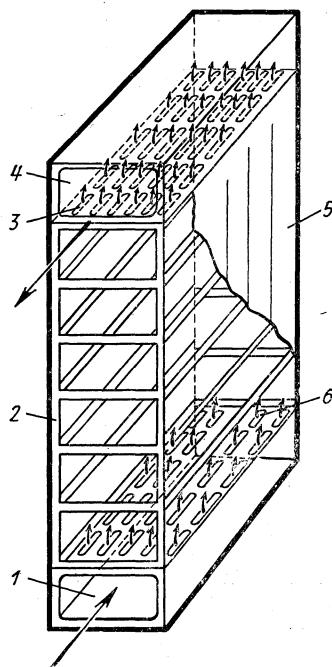


Рис. 2.4. Стойка с последовательным продувом блоков.

нии централизованной системы стойка подключается к воздуховодам боковыми фланцами верхнего и нижнего основания. Регулирующие решетки 3, 6 служат для подбора аэродинамического сопротивления стойки путем изменения количества и размера отверстий (сменой решеток). Регулирование аэродинамического сопротивления стойки осуществляется однажды при наладке. Кожух должен быть снабжен уплотнительными прокладками, чтобы предотвратить утечку охлаждающего воздуха в помещение, в котором установлена стойка, или засасывание воздуха из этого помещения. По этим же причинам желательно, чтобы разность давлений между внутренней полостью стойки и помещением была минимальной.

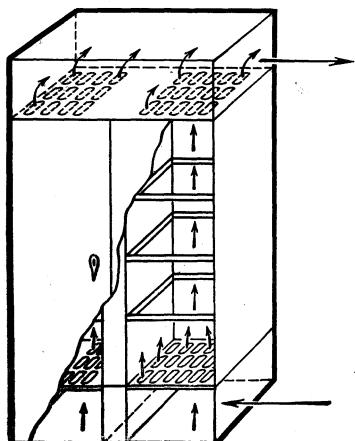


Рис. 2.5. Стойка при последовательно-параллельном продуве воздуха.

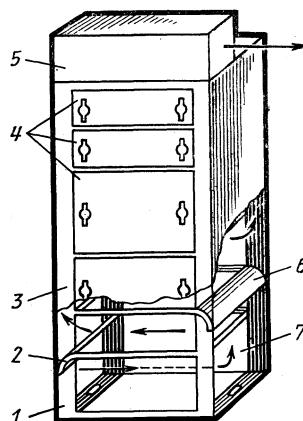


Рис. 2.6. Стойка с последовательным продувом и горизонтальной ориентацией шасси: 1 — рама; 2, 6 — направляющие козырьки; 3 — кожух; 4 — блоки; 5, 7 — верхнее и нижнее основания — воздуховоды.

На рис. 2.5 приведена другая разновидность конструкции стойки при двухрядном расположении блоков, т. е. при последовательно-параллельном продуве воздуха через блоки. Распределение воздуха между двумя вертикальными рядами блоков осуществляется также регулирующими решетками. Конструктивные схемы стоек, приведенные на рис. 2.4 и 2.5, обычно применяются для блоков с вертикальной ориентацией шасси.

При горизонтальной ориентации шасси блоков и последовательном их продуве воздухом применяется стойка, приведенная на рис. 2.6. Воздух от централизованной системы или индивидуального вентилятора поступает в нижнее основание стойки и благодаря наличию направляющих козырьков (2, 6) последовательно проходит через блоки в горизонтальном направлении.

Конструкция стойки при параллельном продуве блоков приведена на рис. 2.7. На рис. 2.7, а показана схема прохождения воздуха, на рис. 2.7, б — конструктивное решение. Стойка состоит из рамы 1, заключенной в кожух 5. Между боковыми стенками рамы и кожуха имеется зазор для прохождения потока воздуха. В центре стойки расположен воздуховод 6. По обе стороны от центрального воздуховода в специальных приемниках 3 рамы устанавливаются блоки 4 кассетной

конструкции с вертикальной ориентацией шасси. Для равномерного распределения воздуха по высоте стойки используются направляющие 7 и регулировочные 2 решетки.

Приведенные на рис. 2.3—2.7 конструктивные схемы стоек применяются на стационарных и наземных передвижных объектах. Места контакта блоков, двери стоек и другие соединения уплотняются прокладками для устранения утечек или подсоса воздуха. В теплонапряженных стойках кожух обклеивается тепловой изоляцией. В некоторых конструкциях кожух покрывается противошумными покрытиями.

В самолетной и корабельной РЭА стойки часто состоят из набора блоков, установленных на общей раме. Каждый блок смонтирован

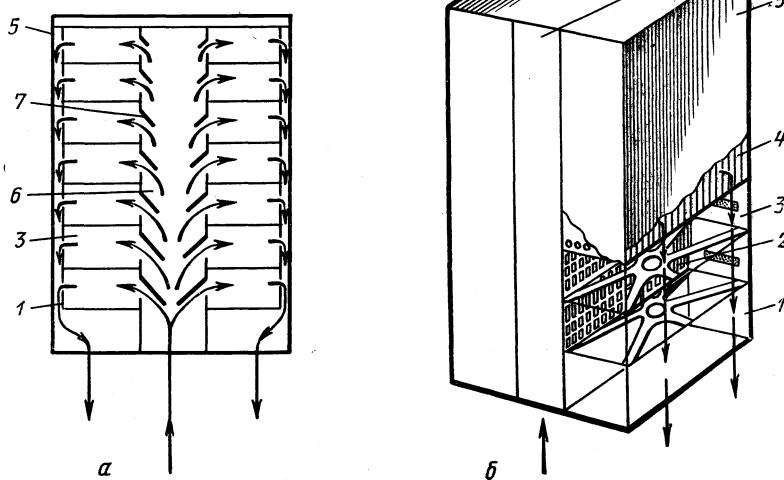


Рис. 2.7. Стойка с параллельным продувом.

в отдельном кожухе и охлаждается индивидуально. Пример конструктивной схемы такой стойки приведен на рис. 2.8. Охлажденный воздух от центрального воздуховода 5 распределительными воздуховодами 4 подводится к блокам 2, установленным на общей раме 1. Горячий воздух через перфорированные отверстия 3 выбрасывается в окружающую среду. Подобные стойки обычно устанавливаются в герметичных отсеках самолета или в закрытых помещениях на кораблях.

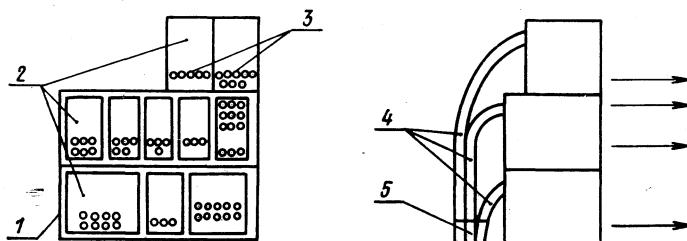


Рис. 2.8. Параллельный продув отдельных блоков.

Другая конструктивная схема стойки самолетной РЭА приведена на рис. 2.9. На общей раме установлены пять блоков (*Б1—Б5*) в отдельных кожухах. Наружные стенки кожухов имеют перфорированные отверстия *3*. Все блоки, за исключением *Б4*, имеют принудительное

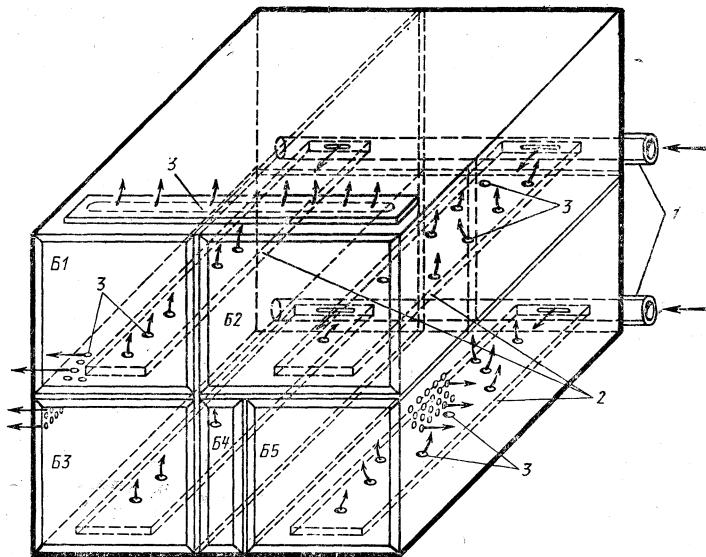


Рис. 2.9. Стойка самолетной РЭА.

воздушное охлаждение. Холодный воздух от напорных воздуховодов *1* поступает в поддоны *2*, расположенные в нижней части каждого блока. Из поддонов воздух поступает к элементам блока, охлаждает их и через перфорированные отверстия выбрасывается в окружающую

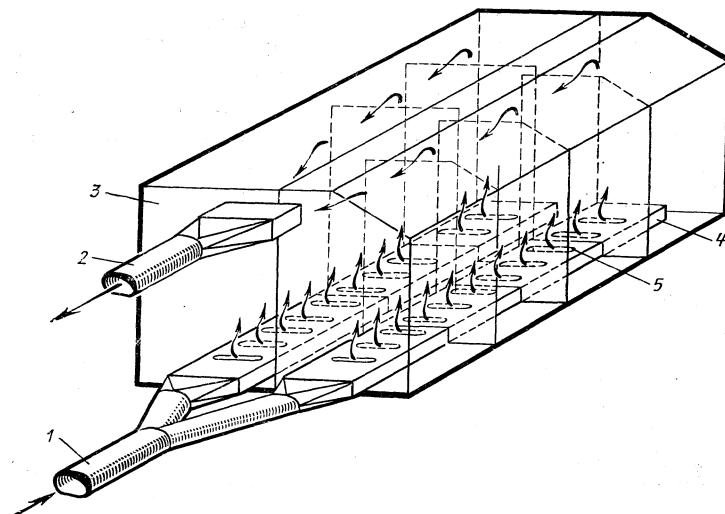


Рис. 2.10. РЭА в контейнере.

среду. Подобные стойки устанавливаются в герметичном отсеке самолета.

В самолетной, корабельной и ракетно-космической РЭА часто блоки объединяют в единую конструкцию, называемую контейнером. Конструктивная схема контейнера приведена на рис. 2.10. Воздух из напорного воздуховода 1 поступает в поддоны 4, откуда через отверстия 5

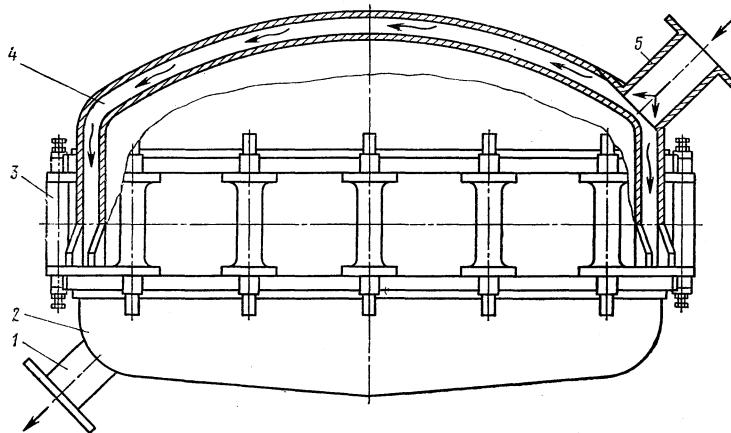


Рис. 2.11. Герметичный контейнер.

распределяется между блоками. Горячий воздух поступает в воздуховод 2. Воздуховоды 1, 2 подключаются к воздушной магистрали. Кожух контейнера 3 обычно выполняется герметичным. Жестких требований к герметичности не предъявляется, если такие конструкции контейнеров устанавливаются в герметичных отсеках самолетов.

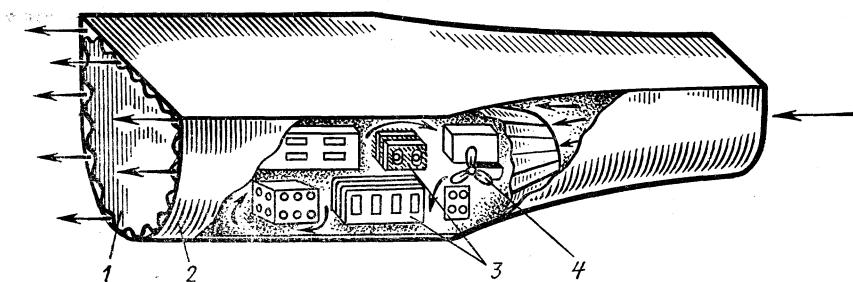


Рис. 2.12. Негерметичные блоки в герметичном контейнере.

Конструкция контейнера для установки в негерметичных отсеках самолета показана на рис. 2.11. Охлаждение контейнера осуществляется наружным обдувом кожуха. Воздух от магистрали поступает через напорный воздуховод 5 в полость двойного кожуха 4. Распределение воздуха в полости двойного кожуха осуществляется специальными направляющими (на рис. 2.11 не показаны). Горячий воздух через воздуховод 1 возвращается в систему. Массивный кожух 2 через прокладку стянут шпильками 3, чем достигается герметичность и механическая прочность контейнера. Для поддержания давления воздуха вну-

три контейнера осуществляется наддув его внутренней полости. Для этой цели внутренняя полость контейнера подсоединяется к воздушной линии носителя.

Несколько другая конструкция контейнера для установки в негерметичных отсеках самолета приведена на рис. 2.12. Наружный кожух 2 служит одновременно стенкой воздуховода. Блоки РЭА 3 расположены в гофрированном внутреннем кожухе 1. Охлаждение контейнера осу-

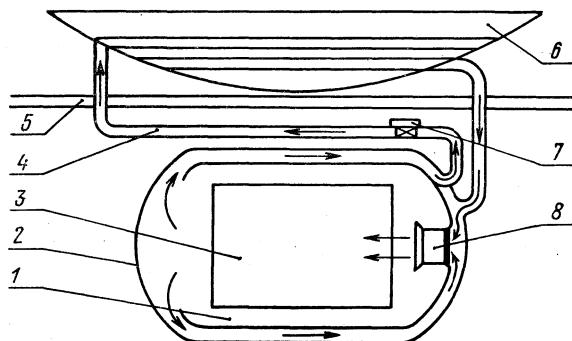


Рис. 2.13. Контейнер для космической РЭА.

ществляется наружным обдувом кожуха 1 воздухом от общей системы, внутренним перемешиванием воздуха внутри контейнера вентилятором 4. Внутренняя полость контейнера обычно подсоединяется к линии наддува.

Схема конструкции контейнера для космической РЭА приведена на рис. 2.13. Контейнер 2 расположен внутри носителя 5. Во внутренней полости контейнера 1 расположена рама 3, на которой установлены

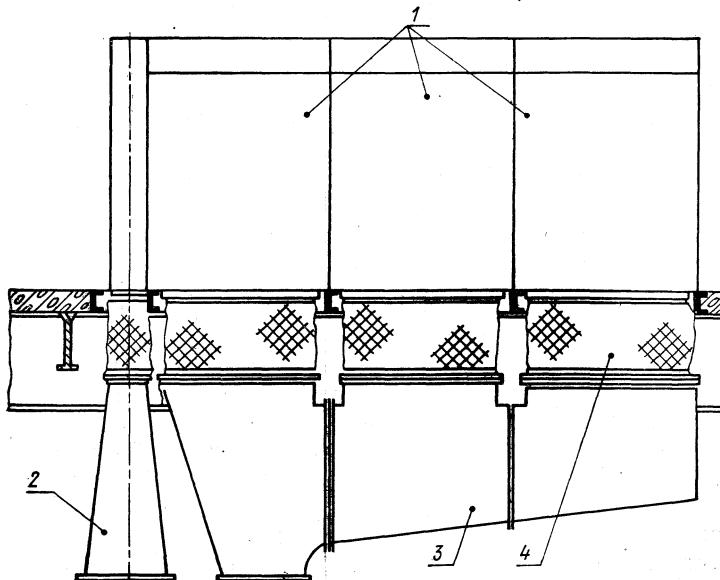


Рис. 2.14. Принудительное охлаждение шкафа.

блоки РЭА. Вентилятор 8 направляет поток холодного воздуха на блоки РЭА. Горячий воздух отбирается из контейнера по двум воздуховодам. По воздуховоду 4 через регулятор 7 воздух поступает в радиационный теплообменник 6 и охлаждается, по другому — возвращается к вентилятору 8. Путем распределения количества воздуха между двумя воздуховодами осуществляется регулирование температуры смеси горячего и холодного воздуха на входе вентилятора 8, подаваемого на охлаждение РЭА.

Объединение нескольких стоек в единый комплекс РЭА часто называют шкафом. Наиболее часто шкафы применяются в стационарной РЭА. На рис. 2.14 приведена конструкция шкафа стационарной РЭА,

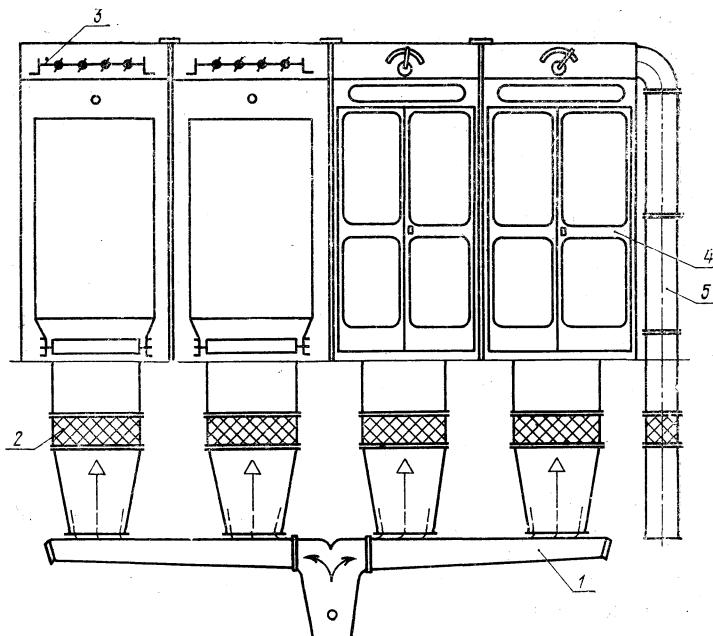


Рис. 2.15. Шкаф с распределительным коллектором воздуха:
1, 5 — воздуховоды; 2 — мягкие вставки; 3 — жалюзи; 4 — стойка.

состоящего из трех стоек 1, при принудительном воздушном охлаждении. Воздуховоды 2 и 3 присоединяются к централизованной системе. Воздух от системы поступает в напорный воздуховод 3, который служит распределительным коллектором. Распределение воздуха между стойками осуществляется с помощью регулировочных решеток каждой стойки. Для облегчения условий распределения воздуха между стойками часто применяют специальные конструкции распределительного коллектора. Для этой же цели сечение распределительного коллектора выполняется большим, чем у воздуховодов, так как при низкой скорости движения воздуха правильное распределение его между стойками значительно упрощается. Для уменьшения шума в аппаратном зале воздуховоды 2, 3 вместе с другим оборудованием для подачи воздуха обычно располагаются в нижнем этаже здания, а РЭА — в верхнем этаже. Для той же цели, а также для предотвращения передачи вибрации от воздуховодов к стойкам, удобства монтажа и ремонта возду-

ховоды соединяются со стойками мягкими вставками 4, которые изготавливаются из брезента или прорезиненной ткани.

Несколько другая конструктивная схема принудительного воздушного охлаждения шкафа стационарной РЭА приведена на рис. 2.15. Распределительный коллектор напорного воздуховода состоит из двух половин, что позволяет уменьшить его сечение. Для распределения воздуха между стойками применяются жалюзи, привод которых выведен на лицевую или заднюю стенку стойки.

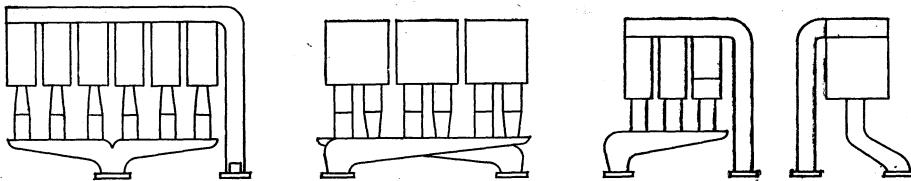


Рис. 2.16. Расположение коллекторов подвода и отвода воздуха.

Возможны различные компоновки воздуховодов для шкафов РЭА. Примеры компоновок для шкафов стационарной РЭА приведены на рис. 2.16. Выбор той или другой компоновки воздуховодов шкафа зависит от многих факторов, главными из которых являются следующие: удобство подключения воздуховодов к системе, мощность рассеяния и количество стоек в шкафу, конструкция шкафа.

Конструкции блоков РЭА зависят главным образом от условия их использования и конструкции стоек, в которых размещаются блоки. Блоки РЭА могут быть также оформлены и в виде отдельных конструктивных единиц.

По характеру элементов, монтируемых в блоках, последние разделяются на следующие группы: электронные, механические, электромеханические, блоки СВЧ и антенных трактов. Электронные блоки состоят из различных механических конструкций, на которых смонтированы дискретные и микроминиатюрные элементы, соединенные в специальные схемы для различного рода преобразований сигналов. Остальные блоки содержат редукторы, следящие системы, релейные блоки, волноводы и т. п. Поскольку электронные блоки составляют большинство, в дальнейшем будем рассматривать только эти блоки. Блоки могут иметь собственный кожух либо монтироваться на раме стойки без кожуха.

В стационарной и наземной передвижной РЭА блоки обычно монтируются в стойке без индивидуальных кожухов; в самолетной, корабельной и ракетно-космической РЭА блоки обычно монтируются в собственном кожухе, хотя встречаются конструкции и без индивидуального кожуха. Конструкция стойки накладывает определенные ограничения на конструктивное оформление блоков: габариты блоков ограничены габаритами стойки, ориентация и конструкция шасси должны соответствовать конструкции воздушных каналов в стойке. Блоки без индивидуальных кожухов, устанавливаемые в стойке, могут иметь вертикальную или горизонтальную ориентацию шасси, а также навесной монтаж элементов. Более часто встречается конструкция с вертикальной ориентацией шасси, которая выполняется в виде набора вертикальных шасси, укрепленных на общей пластине либо раме. Отдельные блоки РЭА обычно выполняются в индивидуальных кожухах. В зависимости от

условий использования и мощности рассеяния блока РЭА кожух может быть герметичным или негерметичным, иметь приспособления для принудительного воздушного охлаждения.

На рис. 2.17 показана конструкция блока с вертикальными шасси кассетной конструкции, помещенными в открытый с двух сторон кожух. Воздух продувается через открытые части кожуха так, как это показано стрелкой.

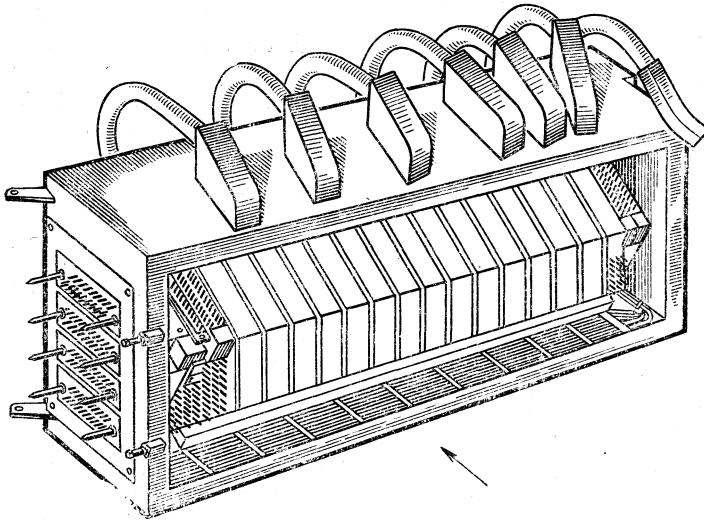


Рис. 2.17. Блок с вертикальными шасси кассетной конструкции.

но стрелкой на рис. 2.17. Блоки такой конструкции собираются в стойку. В зависимости от конструкции стойки блок ориентируется открытыми частями кожуха горизонтально или вертикально. Другая конструкция блока с вертикальными шасси приведена на рис. 2.18. В этой конструкции на каждой шасси собран законченный функциональный узел — субблок. Блоки, в зависимости от функционального назначения, собираются из отдельных субблоков, электрические соединения между

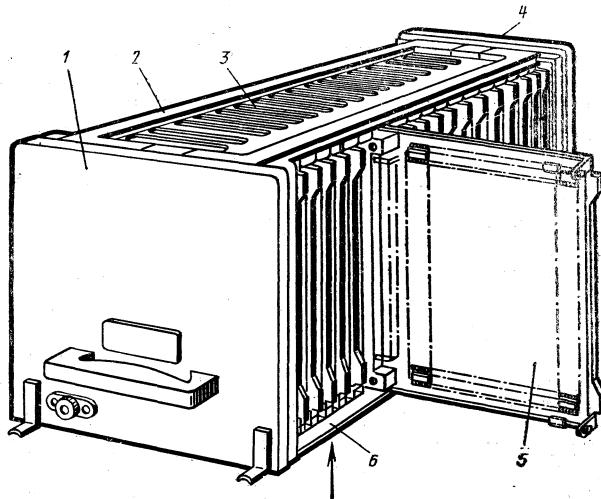


Рис. 2.18. Блок с субблоками на вертикальных шасси.

которыми выполняются с помощью специальных разъемов и навесного монтажа. Каждая плата-субблок легко выдвигается из блока по специальным направляющим; на рис. 2.18 плата-субблок 5 показана в выдвинутом состоянии. Функциональный узел-субблок представляет собой часть сложного изделия, выполняет одно или несколько простейших электрических преобразований и обладает конструктивной и технологической автономией.

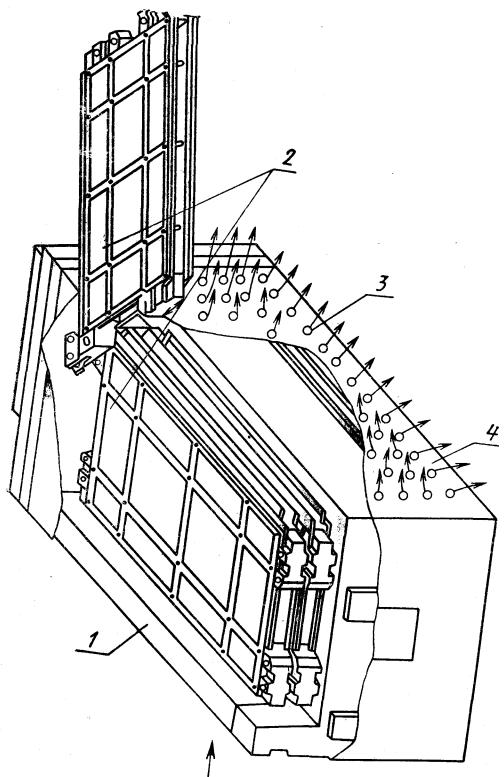
В основу проектирования блоков субблочкой конструкции положен функционально-узловой метод, т. е. метод, предусматривающий деление принципиальной электрической схемы РЭА на отдельные функционально и конструктивно законченные унифицированные узлы и сборку блока из этих узлов. Блок субблочкой конструкции, показанный на рис. 2.18, состоит из лицевой панели 1 и задней панели 4, параллельно которым на специальных направляющих установлены платы-субблоки 5. На верхней крышке 2 и нижнем основании имеются жалюзи 3. Боковые крышки кожуха съемные (на рис. 2.18 не показаны). В собранном виде блок имеет естественное воздушное охлаждение. При снятом нижнем основании 6 или исполнении нижнего основания в виде решетки блок может иметь принудительное воздушное охлаждение. (Направление движения воздуха на рис. 2.18 показано стрелкой.)

Рис. 2.19. Блок с откидными кассетами.

При установке блоков в стойке нижнее основание и верхняя крышка демонтируются и осуществляется сплошной продув блоков воздухом.

Конструкция блока с откидными кассетами показана на рис. 2.19. Каждая кассета 2 состоит из нескольких вертикальных плат, собранных в пакет. Между платами предусмотрены зазоры для прохождения охлаждающего воздуха. Кассеты соединены между собой шарниром и могут поворачиваться вокруг горизонтальной оси так, как это показано на рис. 2.19. Вся конструкция монтируется на нижнем основании 1 и может быть закрыта кожухом 4. В верхней части кожуха и в основании имеются перфорированные отверстия 3 для естественного воздушного охлаждения блока. При снятом кожухе блок может охлаждаться принудительным потоком воздуха. (Направление движения воздуха показано стрелкой.)

На рис. 2.20 приведен общий вид блока книжной конструкции. Каждый субблок-страница 1 шарнирно соединен с основанием и по-



зволяет вертикально раскрывать страницы. Субблок собран из плат 2, между которыми имеются зазоры для прохождения охлаждающего воздуха. (Направление движения воздуха при принудительном охлаждении показано стрелками.) В одном блоке может быть смонтировано несколько субблоков.

На рис. 2.21 приведен блок книжной конструкции с горизонтальным раскрытием и лицевой панелью 1. Каждая секция 2 состоит из двух плат 5, 7. Секции в сборе образуют вертикальные каналы для воздуха, который проходит в направлении, указанном на рис. 2.21 стрелками, через отверстия 6 в раме 3 с задней панелью 4.

Блоки, конструкции которых показаны на рис. 2.17—2.21, применяются главным образом в стационарной и наземной передвижной, а также в самолетной РЭА.

Типичный блок субблочкой конструкции самолетной РЭА приведен на рис. 2.22. Субблоки 2 выполнены в виде отдельных модулей, заключенных в индивидуальные кожухи. Субблоки смонтированы на горизонтальном поддоне 1, установленном на амортизаторах. В полость поддона подается воздух

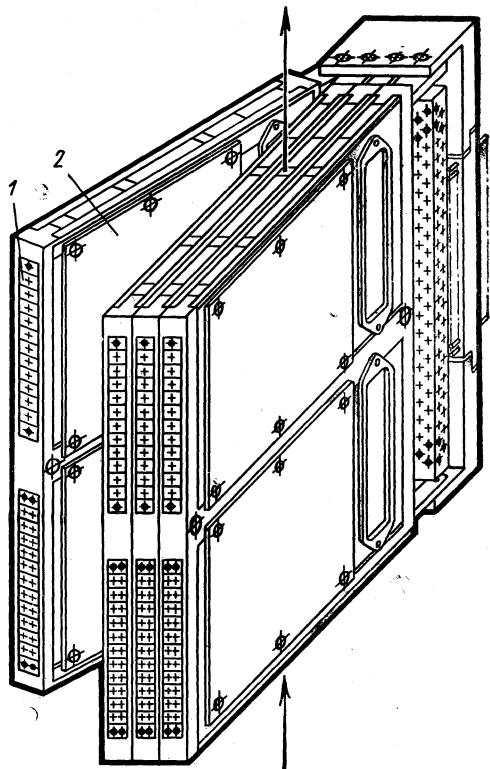


Рис. 2.20. Блок книжной конструкции.

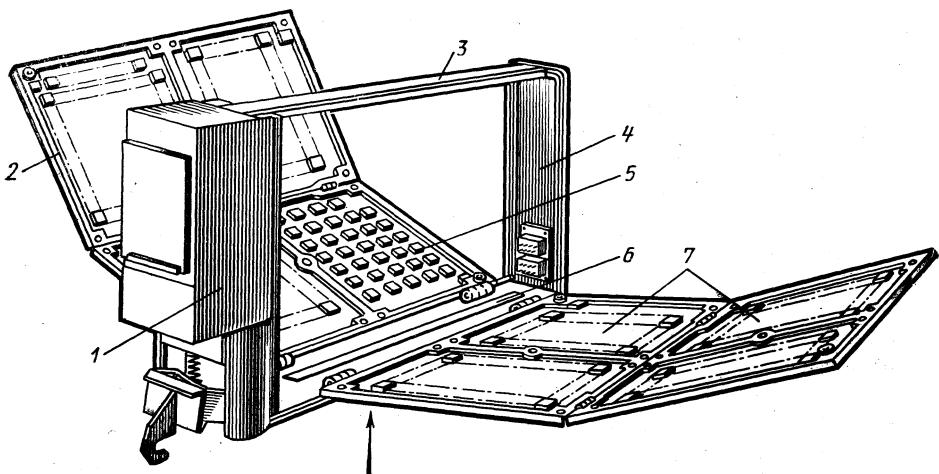


Рис. 2.21. Блок книжной конструкции с горизонтальной осью раскрытия.

из системы через напорный воздуховод 5. Жалюзи 4 в поддоне и верхних крышках 3 кожухов служат для прохода охлаждающего воздуха. Конструкция блока унифицирована и позволяет собирать различные модули на шасси.

Другая конструкция блока самолетной РЭА с объемными субблоками приведена на рис. 2.23. Субблоки 3 собираются на трубе 2. Ребра

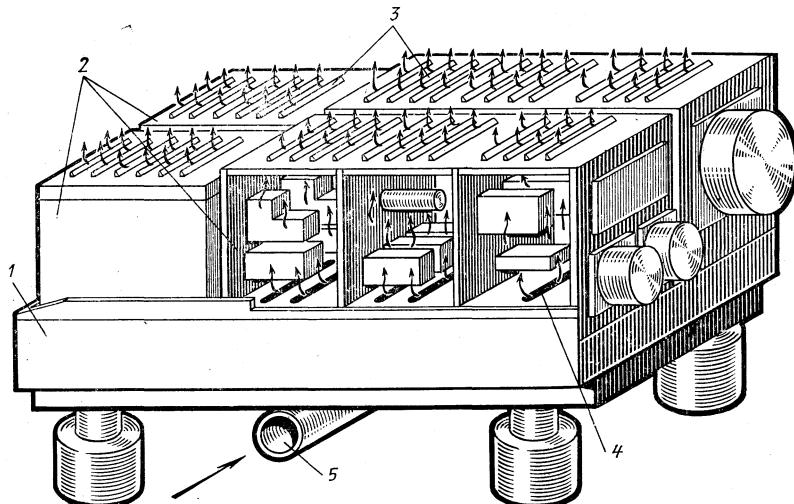


Рис. 2.22. Субблоки самолетной РЭА.

трубы 2 проходят между отдельными секциями субблоков 3. Электрические соединения между субблоками выполняются с помощью плат 1. Охлаждающий воздух от системы подается в трубу 2.

Конструктивная схема блока ракетно-космической РЭА приведена на рис. 2.24. Внутри корпуса 3 установлена горизонтальная плата 1, покрытая слоем пенопласта. Элементы смонтированы внутри пенопластового слоя для уменьшения ударных нагрузок. Пенопластовый слой не ухуд-

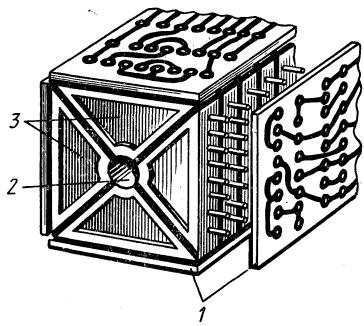


Рис. 2.23. Блок с объемными субблоками.

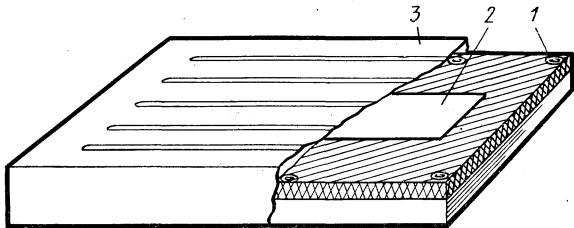


Рис. 2.24. Вариант охлаждения ракетно-космической РЭА.

шает условий охлаждения РЭА, так как при невесомости естественная конвекция воздуха отсутствует. Наиболее теплонагруженные элементы РЭА имеют теплопроводный контакт с металлической пластиной 2, которая соединена с корпусом 3. Таким образом осуществляется

кондуктивный теплообмен между теплонагруженными элементами РЭА и кожухом блока. Тепловой поток от кожуха 3 отводится кондуктивным способом к корпусу контейнера либо принудительным воздушным охлаждением путем наружного обдува оребренного кожуха.

Воздушное охлаждение элементов РЭА, смонтированных внутри блока (дискретные и микроминиатюрные элементы), а также монтируемых отдельно (большие элементы), является наиболее простым, дешевым и удобным в эксплуатации способом охлаждения. Однако эффективность этого способа охлаждения мала по сравнению с жидкостным и испарительным способами охлаждения. Для увеличения эффективности воздушного охлаждения элементов РЭА на практике широко используют оребрение поверхностей охлаждения. Для мощных

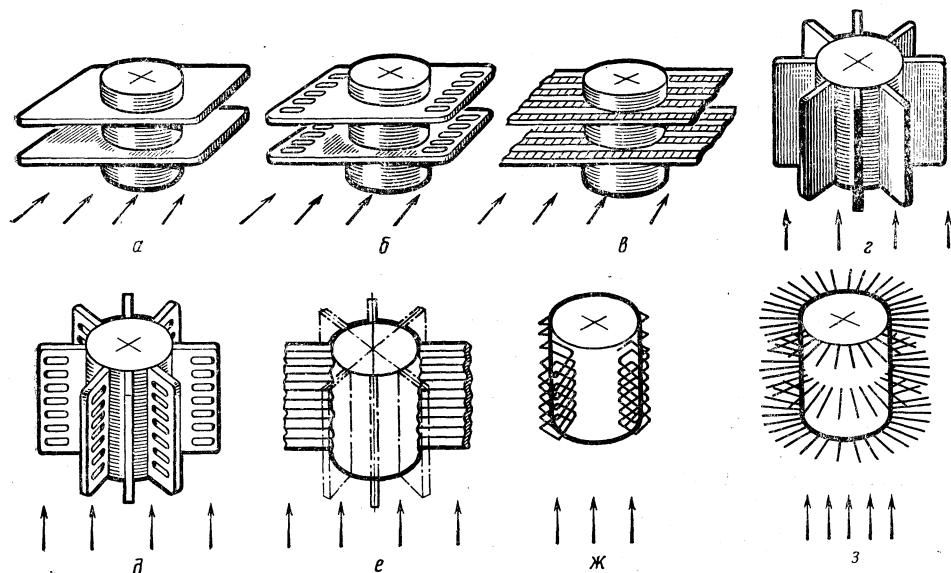


Рис. 2.25. Схемы оребрения поверхностей охлаждения.

радиоэлектронных ламп с воздушным охлаждением наиболее часто встречаются поверхности охлаждения в виде оребренного цилиндра с продольным или поперечным омыванием потоком воздуха. В качестве оребряющих элементов применяются гладкие, перфорированные и гофрированные пластины различной формы, штыри, иголки, проволочные спирали и т. п.

На рис. 2.25 приведены виды оребрения поверхностей охлаждения мощных электронных ламп. Цилиндрическая поверхность охлаждения с гладкими ребрами и поперечным омыванием потоком воздуха показана на рис. 2.25, а; то же, но с продольным омыванием — на рис. 2.25, г. Направление движения воздуха показано на рис. 2.25 стрелками. При естественном охлаждении поверхности должны быть ориентированы по этим стрелкам. На рис. 2.25, б и д приведены оребренные поверхности с перфорированными ребрами. Перфорация ребер осуществляется вдоль потока воздуха, чем достигается срыв пограничного слоя и увеличение конвективного коэффициента теплоотдачи. Опыты показывают, что у перфорированных продольно омываемых пластин по сравнению

с гладкими пластинаами конвективный коэффициент теплоотдачи увеличивается на 30—50% [15]. На рис. 2.25,в и е показаны поверхности охлаждения с гофрированными ребрами. Гофрировка поверхности ребра приводит к увеличению конвективного коэффициента теплоотдачи по сравнению с гладкими пластинаами в 2—3 раза [16].

На рис. 2.25,з показана схема игольчатого (штыревого) оребрения, первое или второе название применяется в зависимости от толщины шипов, а на рис. 2.25,ж—петельно-проводолочного оребрения. Применение этих видов оребрения при принудительном воздушном охлаждении позволяет существенно увеличить конвективный коэффициент теплоотдачи по сравнению с гладкими ребрами.

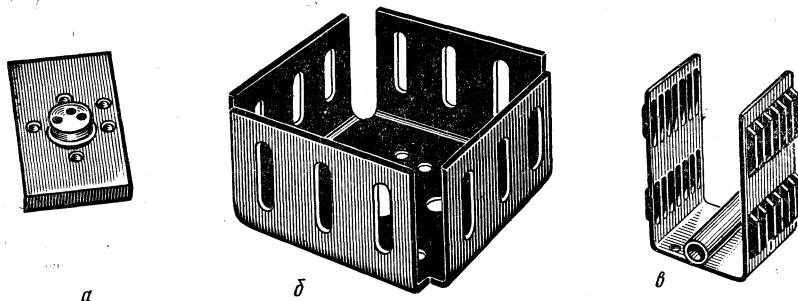


Рис. 2.26. Пластинчатые радиаторы.

Большое влияние на теплоотдачу оребренных поверхностей, приведенных на рис. 2.25, оказывает способ соединения ребер с гладкой поверхностью. Наиболее эффективным способом соединения является изготовление ребер зацело с гладкой поверхностью путем литья или механической обработки, а также сварка или пайка. Кроме этого, в настоящее время применяются следующие соединения: завальцовка или зачеканка ребер в пазы, тугая посадка, напряженная навивка с последующей пайкой или без нее, посадка оребренной муфты.

Широко применяются оребренные поверхности для отвода тепла от полупроводниковых приборов средней и большой мощности, монтируемых отдельно (большие элементы) и группами (дискретные элементы). В практике детали с оребренными поверхностями называют радиаторами или теплоотводами. В последнее время радиаторы начинают применять и для полупроводниковых приборов малой мощности, а также для мощных резисторов и других элементов РЭА. Высокая эффективность радиаторов, используемых для отвода тепла от полупроводниковых приборов, а также массовое их применение в РЭА породили большое разнообразие конструкций радиаторов. Условно все конструкции радиаторов можно разбить на четыре класса: пластинчатые, штырьковые, проволочные, особые.

Радиаторы выполняются в виде отдельной конструкции, на которую крепится полупроводниковый прибор. В качестве материалов для радиаторов применяются главным образом алюминиевые сплавы, а также медь, магний, бериллий. Многие радиаторы выпускаются серийно, и их размеры унифицированы.

В пластинчатых радиаторах теплоотдающие поверхности могут иметь различную форму. На рис. 2.26 и 2.27 приведены конструкции

пластинчатых радиаторов. Простейшая конструкция показана на рис. 2.26, а. Здесь пластина крепится к шасси. Пластина может быть выполнена в виде лапки для крепления, флагка, крыльышек, вертикальных загнутых пластин (рис. 2.26, б), пружинящей пластины (рис. 2.27, а), пружинящей обоймы (рис. 2.27, в). Для увеличения поверхности охлаждения пластина может быть оребрена, как это показано на рис. 2.26, в и 2.27, б. Расположение ребер может быть горизонтальным либо вертикальным в зависимости от расположения радиаторов и направления движения воздуха.

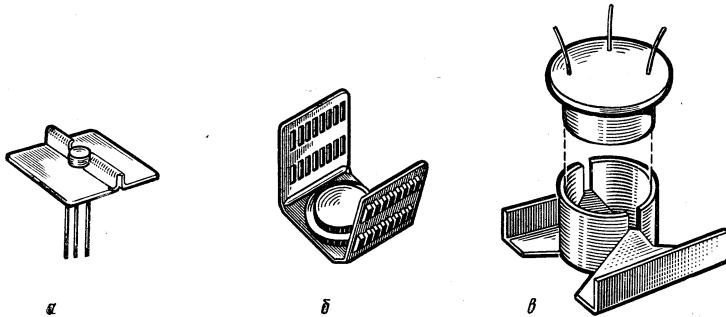


Рис. 2.27. Пластинчатые пружинящие радиаторы.

На рис. 2.28 и 2.29 приведены различные конструкции радиаторов с набором пластин. На рис. 2.28, в, 2.29, б показана конструкция радиатора с зигзагообразным расположением ребер. Ребра располагают так, чтобы облегчить естественную конвекцию воздуха. При принудительном охлаждении направление потока воздуха может быть не строго ориен-

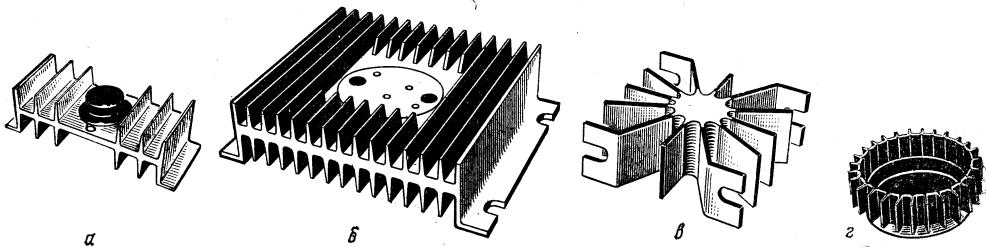


Рис. 2.28. Радиаторы с равномерным набором пластин.

тировано вдоль ребер, что будет способствовать турбулизации потока. На рис. 2.29, г, д показаны конструкции радиаторов, в которых для увеличения поверхности охлаждения использованы гофрированные пластины. На рис. 2.30 приведена конструкция штырькового, а на рис. 2.31 — проволочного радиатора. К особым конструкциям относятся обычно радиаторы, предназначенные для работы в специальных условиях: в разреженном воздухе, невесомости, нестационарном режиме и т. д.

Конструкции особых радиаторов могут значительно отличаться от описанных выше. Так, например, радиаторы для полупроводниковых приборов, работающих в кратковременном режиме, выполняются в виде

массивных металлических деталей, имеющих большую теплоемкость, либо в виде емкостей для аккумуляторов тепла.

Пластинчатые радиаторы без ребер наиболее просты, но область их применения ограничена элементами малой мощности. Широко используются на практике пластинчатые радиаторы с ребрами, так как они достаточно просты в изготовлении и могут быть применены для полупроводниковых приборов средней и большой мощности. Но ребра

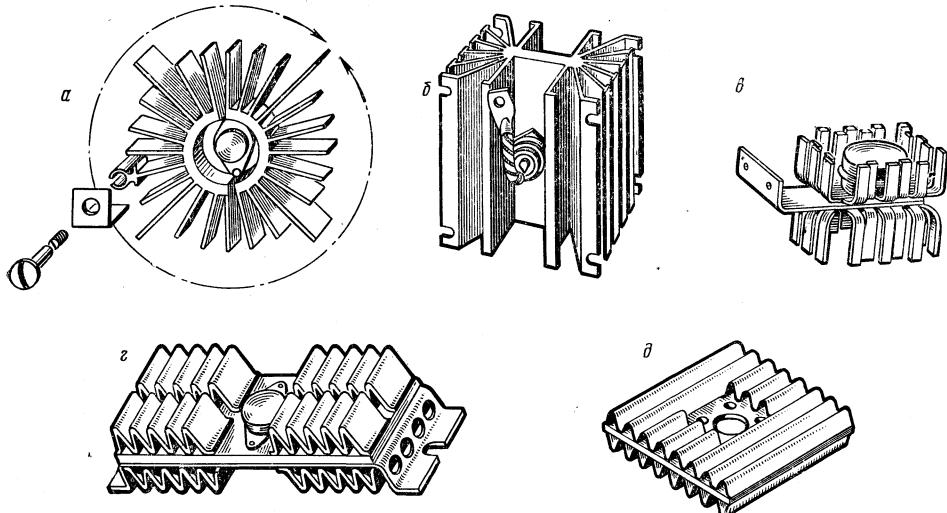


Рис. 2.29. Радиаторы с неравномерным набором пластин.

радиаторов должны быть ориентированы по направлению потока воздуха (за исключением радиаторов с зигзагообразным расположением ребер), что не всегда удобно для конструкторов РЭА. С этой точки зрения интересен штырьковый радиатор, так как здесь строгой ориен-

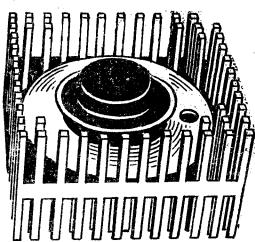


Рис. 2.30. Штырьковый радиатор.

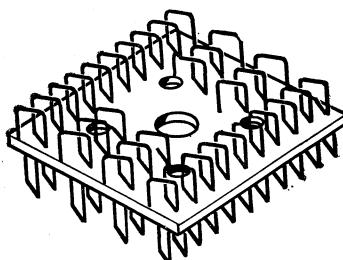


Рис. 2.31. Схема петельно-проводолочного радиатора.

тации потока воздуха не требуется. Радиатор используется при естественном и принудительном воздушном охлаждении для полупроводниковых приборов большой и средней мощности. Радиаторы с проволочным оребрением при принудительном воздушном охлаждении имеют, как правило, более высокие эффективные коэффициенты теплообмена, однако технология их изготовления более сложная, поэтому пока они не получили широкого распространения.

Конструктивное выполнение больших элементов РЭА при использовании воздушного охлаждения очень разнообразно. Несколько примеров конструкций мы приведем ниже.

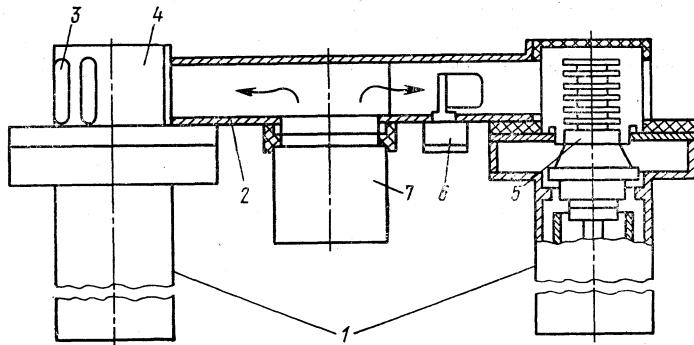


Рис. 2.32. Воздушное принудительное охлаждение металлокерамических ламп.

На рис. 2.32 дан пример выполнения металлокерамических ламп в генераторах СВЧ при принудительном воздушном охлаждении [17]. Усилилительные лампы 1, смонтированные внутри резонаторов, имеют оребренный анод 5 и камеры 4. Камеры 4 соединяются через воздуховод 2 с системой или специальным вентилятором 7. Внутри воздуховода смонтирован аэроконтакт 6 для отключения усилителей при отсутствии охлаждающего воздуха. Воздух омывает оребренный анод 5 и выбрасывается наружу через отверстия 3. При необходимости к отверстиям 3 может быть подключен второй воздуховод системы.

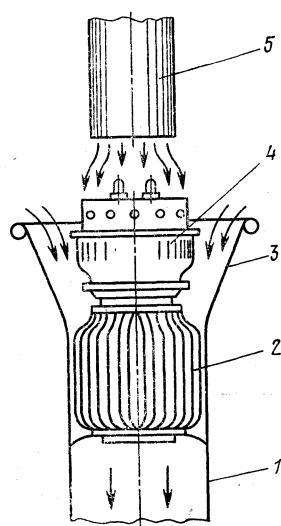


Рис. 2.33. Воздушное принудительное охлаждение мощной радиолампы.

На рис. 2.33 приведена конструктивная схема мощной радиолампы при принудительном воздушном охлаждении [18]. Воздуховод 1 подключается к системе или индивидуальному вентилятору. Воздух засасывается из помещения через направляющие конус 3 и патрубок 5. Направляющий конус служит для ориентации потока воздуха при охлаждении баллона лампы 4 и оребренного анода 2. Направляющий патрубок служит для подачи охлаждающего воздуха к катодной ножке. При большой мощности, рассеиваемой лампой, направляющие конус и патрубок подключаются к специальному раздающему воздуховоду.

Мощные полупроводниковые приборы часто монтируются отдельными блоками. На рис. 2.34 показаны конструктивные схемы таких блоков

с принудительным воздушным охлаждением. На рис. 2.34,а показана конструкция блока полупроводниковых приборов 3, смонтированных на шасси 4 и продуваемых воздухом с помощью встроенного вентилятора 2 [19]. Корпус блока 1 служит воздуховодом. В зависимости от рассеиваемой полупроводниковыми приборами мощности могут применять-

ся радиаторы (шасси) различной конструкции. На рис. 2.34,а применены радиаторы в виде пластины, изолированные друг от друга втулками. Воздух засасывается из помещения через фильтр и выбрасывается наружу через воздуховод 1 (на рис. 2.34,а показано стрелками).

Другая конструкция блока с полупроводниковыми приборами и принудительным охлаждением с встроенным вентилятором приведена на

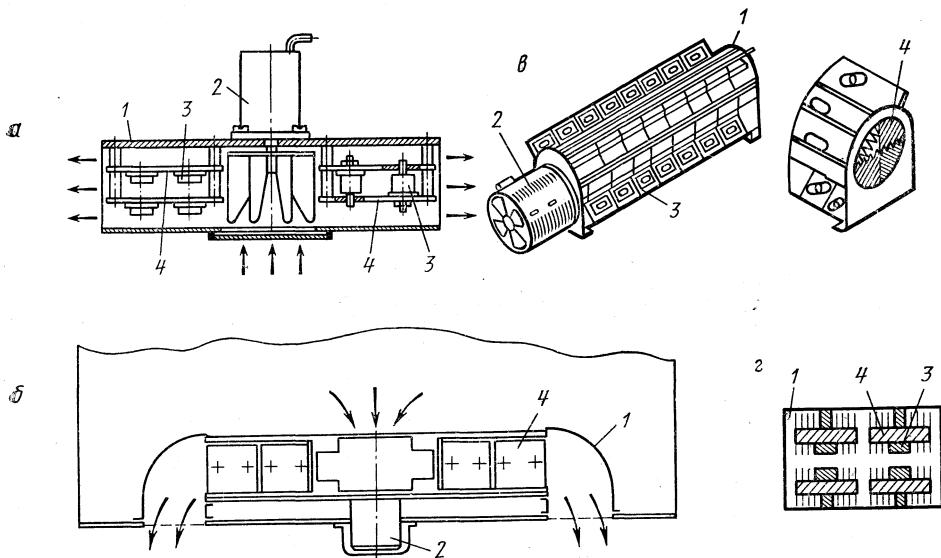


Рис. 2.34. Принудительное воздушное охлаждение полупроводниковых приборов.

рис. 2.34,б [20]. В этой конструкции воздуховод выполнен таким образом, что блок с полупроводниковыми приборами может быть установлен отдельно либо на стенке другого блока. Конструктивная схема установки полупроводниковых приборов на стенке блока РЭА позволяет использовать один вентилятор для охлаждения обоих блоков. Холодный воздух вначале поступает на полупроводниковые приборы, а затем в блок. Конструкция допускает и другую схему, когда холодный воздух вначале проходит через блок других элементов, а затем поступает на полупроводниковые приборы.

Широкое применение в отечественной и зарубежной практике получили блоки полупроводниковых приборов, конструктивная схема которых показана на рис. 2.34,в [21]. Эти блоки собираются из отдельных секций, которые в сборе образуют воздуховод, заполненный радиаторами полупроводниковых приборов [21]. Полупроводниковые приборы устанавливаются на периферийных выступах радиаторов. Конструкция допускает модификации в зависимости от числа установленных в секции приборов, количества секций и параметров вентилятора, что позволяет ее использовать для различных типов полупроводниковых приборов и различных условий их использования. В некоторых конструкциях полупроводниковые приборы с радиаторами монтируют внутри канала, подающего воздух к другим блокам (рис. 2.34,г) [22].

Отметим, что естественное и принудительное воздушное охлаждение широко применяется для отвода тепла от других «больших» элементов РЭА: трансформаторов, дросселей, оптических квантовых генераторов, электродвигателей, эквивалентов антенн и т. п.

2.3. ВЫБОР СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ НА РАННЕЙ СТАДИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ

В предыдущих параграфах мы познакомили читателя с основными способами охлаждения и особенностями конструкций РЭА при воздушном охлаждении. Основной вывод, который можно сделать после знакомства с конструктивными особенностями РЭА, состоит в том, что способ охлаждения во многом определяет конструкцию РЭА. Поэтому уже на ранней стадии конструирования, т. е. на стадии технического предложения или эскизного проекта, необходимо выбрать способ охлаждения РЭА, после чего можно приступить к предварительной проработке конструкции. Выбранный способ охлаждения должен обеспечить заданный по ТЗ тепловой режим РЭА, что можно проверить расчетным путем после детальной проработки конструкции аппарата либо опытным путем после испытания макета или опытного образца. Следовательно, если на ранней стадии конструирования мы неправильно выберем способ охлаждения, то это обнаружится только на более поздних стадиях конструирования, в результате чего работа большого коллектива будет сведена на нет, а сроки создания РЭА значительно увеличатся. Если к этому добавить, что на ранней стадии конструирования мы располагаем минимальной информацией о конструкции РЭА, то станет очевидным, сколь ответственна и сложна задача выбора способа охлаждения.

На ранней стадии конструирования в распоряжении конструктора имеется ТЗ, причем, как правило, необходимые сведения о требуемом тепловом режиме РЭА заключены в картах тепловых характеристик блоков. Для выбора способа охлаждения прежде всего требуются следующие данные:

- суммарная мощность P , рассеиваемая в блоке;
- диапазон возможного изменения температуры окружающей среды $T_{c \max}, T_{c \min}$;
- пределы изменения давления окружающей среды p_{\max}, p_{\min} ;
- время непрерывной работы t ;
- допустимые температуры элементов T_i .

Кроме того, необходимо задать коэффициент заполнения аппарата

$$K_3 = \sum_{i=1}^n v_i / V,$$

где v_i — объем i -го элемента РЭА; n — число элементов в РЭА; V — объем, занимаемый РЭА; горизонтальные и вертикальные размеры корпуса РЭА соответственно L_1, L_2 и L_3 либо для «больших» элементов — величину охлаждаемой поверхности S_{Π} . Коэффициент заполнения аппарата характеризует степень полезного использования объема и является одним из главных показателей качества конструкции. Коэффициент заполнения должен быть указан в ТЗ или может выбираться на основании опыта конструирования подобных РЭА. Основные размеры корпуса РЭА можно определить прикидочными расчетами компоновки РЭА, которые описаны в [23].

Эти исходные данные недостаточны для детального расчета теплового режима, но их можно использовать для предварительной оценки. Выбор способа охлаждения на ранней стадии конструирования часто имеет вероятностный характер, т. е. дает возможность оценить веро-

ятность обеспечения заданного по ТЗ теплового режима РЭА при выбранном способе охлаждения, а также те усилия, которые нужно затратить при разработке будущей конструкции РЭА с учетом обеспечения теплового режима.

Выбор способа охлаждения РЭА можно выполнить с помощью графиков (рис. 2.35), характеризующих области целесообразного применения различных способов охлаждения. Эти области строятся по результатам обработки статистических данных для реальных конструкций, тепловых расчетов и данных испытания макетов. Для удобства пользования графиками необходимо из перечисленных выше исходных данных получить ряд комплексных показателей. Покажем, как использовать данные ТЗ для выбора способа охлаждения.

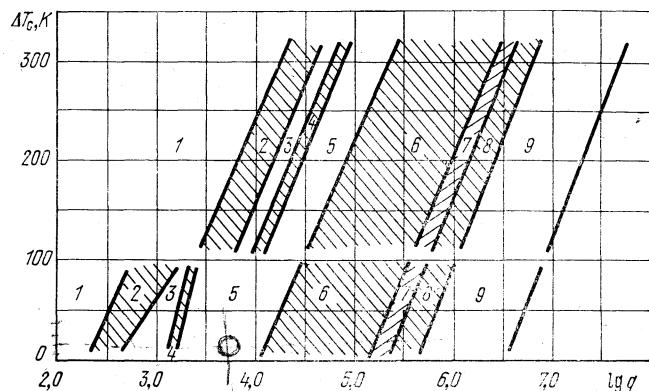


Рис. 2.35. Области целесообразного применения различных способов охлаждения.

Время непрерывной работы РЭА необходимо для оценки режима работы, так как области целесообразного применения способов охлаждения построены только для длительного режима РЭА как наиболее часто встречающегося. Если РЭА работает в кратковременном или периодическом режиме, то описанные в этом параграфе методы малопригодны.

Пределы изменения давления окружающей среды интересуют нас с точки зрения выявления минимального давления, при котором работает РЭА. Ниже мы опишем методы определения способа охлаждения РЭА при атмосферном давлении, а затем покажем, как применять эти методы при пониженном давлении.

Размеры корпуса аппарата и коэффициент заполнения используются для определения условной величины поверхности теплообмена $S_{\text{н}} = 2[L_1L_2 + (L_1+L_2)L_3K_3]$.

Если способ охлаждения выбирается для большого элемента, то величина поверхности теплообмена определяется из соответствующих чертежей по геометрическим размерам поверхности, находящейся в непосредственном контакте с теплоносителем.

За основной показатель, определяющий области целесообразного применения способа охлаждения, принимается величина плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена $q = -PK_p/S_{\text{н}}$, где P — суммарная мощность, рассеиваемая РЭА с поверхности теплообмена; K_p — коэффициент, учитывающий давление воздуха

(при атмосферном давлении $K_p=1$). Вторым показателем может служить минимально допустимый перегрев элементов РЭА $\Delta T_c = T_{i \min} - T_c$, где $T_{i \min}$ — допустимая температура корпуса наименее теплостойкого элемента по ТЗ, т. е. элемента, для которого допустимая температура имеет минимальное значение; для больших элементов это допустимая температура охлаждаемой поверхности; T_c — температура окружающей среды; для естественного охлаждения $T_c = T_{c \max}$, т. е. соответствует максимальной температуре окружающей среды, заданной в ТЗ; для принудительного охлаждения $T_c = T_{vх}$, т. е. соответствует температуре воздуха (жидкости) на входе в РЭА.

На рис. 2.35 области целесообразного применения различных способов охлаждения приведены в координатах ΔT_c , $\lg q$. Имеется два типа областей. Области, в которых можно рекомендовать применение определенного способа охлаждения, и области, в которых с примерно одинаковым успехом можно применять два или три способа охлаждения. Области первого типа не заштрихованы и относятся к следующим способам охлаждения: 1 — естественное воздушное, 3 — принудительное воздушное, 5 — принудительное жидкостное, 9 — принудительное испарительное. Области второго типа заштрихованы: 2 — возможно применение естественного и принудительного воздушного, 4 — возможно применение принудительного воздушного и жидкостного, 6 — возможно применение принудительного жидкостного и естественного испарительного, 7 — возможно применение принудительного жидкостного, принудительного и естественного испарительного, 8 — возможно применение естественного и принудительного испарительного.

Следует заметить, что верхние кривые на рис. 2.35, соответствующие $\Delta T_c > 373$ К (100°C), обычно применяются для выбора способа охлаждения больших элементов, так как допустимые температуры их охлаждаемых поверхностей часто выше 373 К. Нижние кривые на рис. 2.35 применяются для выбора способа охлаждения блоков, стоек и т. п., выполненных на дискретных и микроминиатюрных элементах, так как для них обычно $\Delta T_c < 373$ К. Поэтому области целесообразного применения различных способов воздушного охлаждения в верхней части графика не являются продолжением соответствующих кривых в нижней части. Последнее вызвано также и тем, что при охлаждении разветвленных поверхностей больших элементов можно получить более высокие эффективные коэффициенты теплоотдачи.

Если показатели q и ΔT_c рассматриваемой РЭА попадают в незаштрихованные области рис. 2.35, то для нее сразу может быть выбран способ охлаждения, соответствующий этой области. Если же показатели РЭА попадают в заштрихованные области, где возможно применение двух или трех различных способов охлаждения, то задача выбора способа охлаждения усложняется и необходимо пользоваться дополнительными графиками.

Наиболее полно задача выбора способа охлаждения разработана для области 2, так как в настоящее время накоплен большой опыт разработки РЭА с воздушным охлаждением. Рассмотрим порядок выбора способа охлаждения РЭА, показатели q и ΔT_c которой попадают в область 2 на рис. 2.35.

Для этой цели построены вспомогательные графики применительно к дискретным и микроминиатюрным элементам (рис. 2.36—2.39). На рис. 2.36 представлены вероятностные кривые для РЭА в герметичном корпусе с естественным и принудительным воздушным охлаждением

с внутренним перемешиванием. По осям координат отложены показатели РЭА, причем на оси ординат даны четыре шкалы для различных массовых удельных расходов (на единицу площади сечения) принудительного движения воздуха: $W=0$ — естественное охлаждение; $W=1-3$ кг/с·м² — принудительное внутреннее перемешивание воздуха.

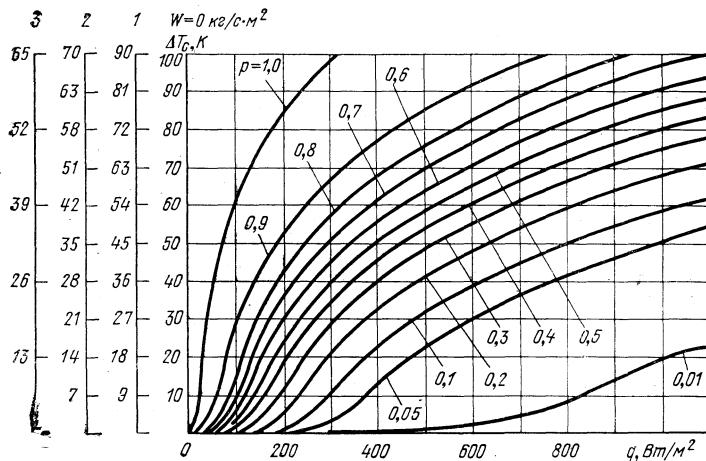


Рис. 2.36. Вероятностные кривые для РЭА в герметичном кожухе с естественным воздушным охлаждением и внутренним перемешиванием.

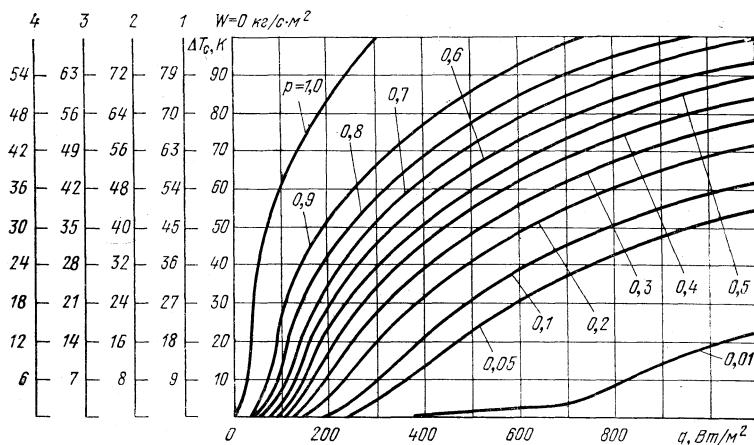


Рис. 2.37. Вероятностные кривые для РЭА в герметичном кожухе с естественным воздушным охлаждением и наружным обдувом.

На поле графика приведены различные кривые, соответствующие вероятностям $p=0,01-1,0$. По графику можно установить для РЭА с показателями q и ΔT_c вероятность, с которой тепловой режим будет соответствовать заданному в ТЗ, если воздушное охлаждение будет естественным или с внутренним перемешиванием в герметичном кожухе.

Например, для РЭА с показателями $q=600$ Вт/м² и $\Delta T_c=60$ К при естественном воздушном охлаждении в герметичном кожухе вероятность обеспечения теплового ре-

жима равна 0,4, а при внутреннем перемешивании воздуха с удельным расходом 2 кг/с·м² вероятность обеспечения теплового режима равна 0,7.

На рис. 2.37 представлены вероятностные кривые для РЭА в герметичном корпусе с естественным и принудительным воздушным охлаждением с наружным обдувом. Смысл кривых такой же, как и на рис. 2.36, а значения для $W=0$ (естественное охлаждение) на обоих графиках совпадают.

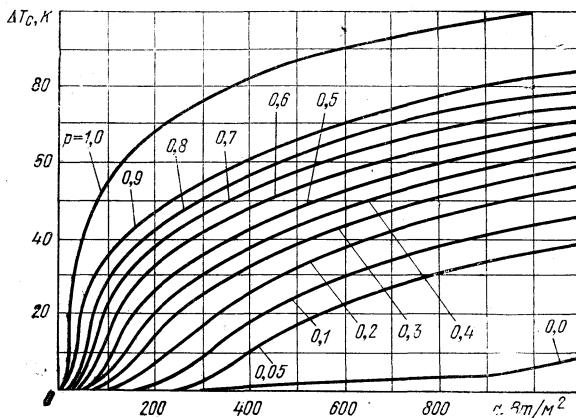


Рис. 2.38. Вероятностные кривые для РЭА с естественным воздушным охлаждением в перфорированном кожухе.

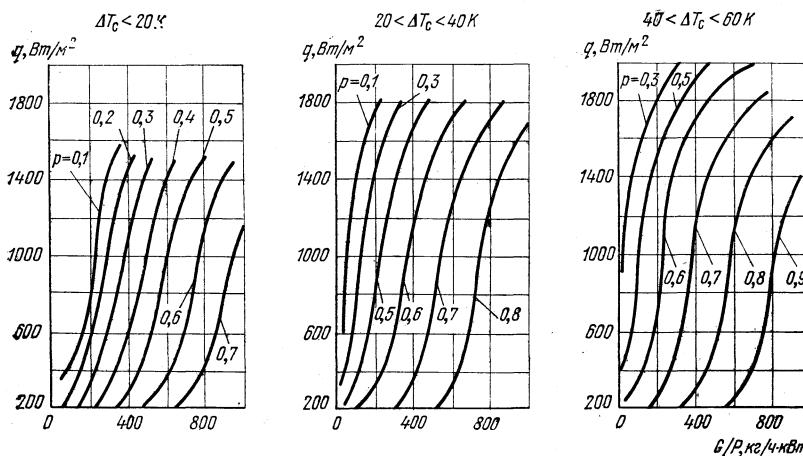


Рис. 2.39. Вероятностные кривые для РЭА с принудительным охлаждением продувом воздухом.

На рис. 2.38 построены вероятностные кривые для РЭА с естественным воздушным охлаждением в перфорированном кожухе, на рис. 2.39 — вероятностные кривые для РЭА с принудительным охлаждением путем продува холодным воздухом. На рис. 2.39, в отличие от предыдущих, введен еще один показатель — массовый расход воздуха на единицу рассеиваемой РЭА мощности $g = G/10^{-3} P$. Расход воздуха на охлаждение РЭА может быть задан в ТЗ, в противном случае необходимо пользоваться принятыми на сегодня приближенными оценками.

При рациональном конструировании можно обеспечить заданный в ТЗ тепловой режим РЭА при удельном расходе воздуха 180—250 кг/ч·кВт. В стационарных РЭА, где нет столь жестких ограничений по габаритам, массе и энергопотреблению СОТР, удельный расход воздуха может быть увеличен до 250—350 кг/ч·кВт. Конечно, увеличение расхода воздуха имеет смысл только в том случае, если это приводит к увеличению надежности РЭА. В тех случаях, когда для охлаждения используется очень холодный воздух или РЭА допускает большие значения ΔT_c , расходы воздуха могут быть намного меньше, чем в приведенных выше рекомендациях.

Таким образом, с помощью рис. 2.36—2.39 можно определить вероятность обеспечения теплового режима РЭА при применении различных модификаций естественного и принудительного воздушного охлаждения и, пользуясь этими оценками, сделать окончательный выбор способа охлаждения.

Поясним более подробно смысл вероятностных оценок, приведенных на указанных рисунках. При конструировании конкретной РЭА конструктор должен обеспечить выполнение множества различных требований, важнейшими из которых являются: электротехнические требования, высокая надежность, уменьшение массы и объема, создание нормального теплового режима, защита от ударов и вибраций, технологичность, взаимозаменяемость деталей и узлов, снижение стоимости в производстве и эксплуатации. Часто эти требований противоречивы и улучшение одних характеристик РЭА может быть осуществлено только за счет ухудшения других.

Вероятностная оценка на рис. 2.36—2.39 и показывает, какое внимание конструктор должен уделять одному из перечисленных выше условий — обеспечению нормального теплового режима.

При выборе способа охлаждения следует руководствоваться следующими правилами:

- а) если точка с заданными параметрами на одном из графиков рис. 2.36—2.39 попадает в область вероятности $p \geq 0,8$, можно остановиться на этом способе охлаждения;
- б) если точка попадает в область с вероятностью $0,8 > p \geq 0,3$, можно выбрать этот способ охлаждения, однако при конструировании РЭА обеспечению нормального теплового режима следует уделить тем больше внимания, чем меньше вероятность;
- в) при вероятностной оценке $0,3 > p \geq 0,1$ не рекомендуется выбирать этот способ охлаждения. В противном случае следует уделить особое внимание обеспечению нормального теплового режима РЭА и, может быть, даже пойти на увеличение габаритов, массы и энергопотребления аппарата в целом;
- г) при вероятностной оценке $0,1 > p \geq 0,05$ обеспечить нормальный тепловой режим рассматриваемым способом удается очень редко, а при $p < 0,05$ практически невозможно.

Поясним порядок пользования рис. 2.36—2.39 на примере. Предположим, что по техническому заданию необходимо определить способ охлаждения блока негерметичной РЭА со следующими исходными данными: $P = 0,5$ кВт; $\Delta T_c = 30$ К, $q = 400$ Вт/м². Режим работы длительный. Давление воздуха, окружающего блок, атмосферное. Точка с заданными параметрами на графике рис. 2.35 попадает в область 2. Возможно как естественное, так и принудительное воздушное охлаждение.

По кривым рис. 2.38 находим, что нормальный тепловой режим этого аппарата может быть обеспечен при естественном охлаждении и перфорированном кожухе с вероятностью $p=0,28$. Так как вероятность обеспечения нормального теплового режима при естественном охлаждении мала и нужно уделить особое внимание его обеспечению даже в ущерб другим характеристикам РЭА, целесообразно выбрать принудительное воздушное охлаждение.

По рис. 2.39 для вероятности $p=0,6$ находим требуемый для обеспечения нормального теплового режима удельный расход воздуха: $G/10^{-3}P=240$ кг/ч·кВт, отсюда $G=120$ кг/ч. Этот расход воздуха соответствует приведенным выше рекомендациям.

Таблица 2.2

Коэффициенты K_p , учитывающие влияние пониженного давления на тепловой режим герметичного блока при $H_1 \sim H_2$

$H \cdot 10^{-5}$, Па	0,67	0,53	0,4	0,27	0,13	0,11	0,08	0,05	0,03	0,007
K_p	1,08	1,12	1,19	1,26	1,35	1,38	1,40	1,44	1,47	1,51

Как известно, понижение давления воздуха способствует ухудшению условий теплообмена. С уменьшением давления температуры элементов РЭА возрастают при неизменной мощности рассеивания. При нормальном атмосферном давлении такое увеличение температуры можно получить, увеличив мощность рассеивания элементов. Поэтому для выбора способа воздушного охлаждения при пониженном давлении можно пользоваться графиками рис. 2.35, 2.36 и 2.38, соответственно увеличивая удельную мощность рассеяния. Степень увеличения удельной мощности для различных способов охлаждения определяется коэффициентом K_p , введенном для этой цели в показатель q .

Коэффициент K_p учитывает ухудшение охлаждения РЭА при пониженном давлении только в условиях естественной конвекции воздуха; в герметичном корпусе изменение условий теплообмена при вынужденной конвекции следует учесть путем изменения массового расхода или скорости воздуха. Значения коэффициента K_p в зависимости от давления приведены в табл. 2.2.

Часто для самолетной РЭА, размещенной в негерметичных отсеках, для улучшения условий охлаждения используется наддув корпусов герметичных блоков. В этом случае корпусы герметичных блоков соединяются между собой и присоединяются к отсеку или воздушной линии повышенного давления, в результате чего давление внутри корпуса

Таблица 2.3

Коэффициенты K_p , учитывающие влияние пониженного давления на тепловой режим герметичного блока при $H_1 \neq H_2$

$H_2 \cdot 10^{-5}$, Па	$H_1 \cdot 10^{-5}$, Па									
	0,67	0,53	0,4	0,27	0,13	0,11	0,08	0,05	0,03	0,07
0,75	1,06	1,09	1,13	1,17	1,25	1,28	1,30	1,33	1,35	1,38
0,61		1,11	1,15	1,19	1,26	1,29	1,31	1,33	1,36	1,38
0,27				1,26	1,32	1,34	1,36	1,39	1,40	1,43
0,13					1,35	1,37	1,40	1,42	1,45	1,46

сов блоков (H_2) выше, чем давление окружающей среды (H_1). В этом случае также можно пользоваться вероятностными графиками (рис. 2.36 или 2.37) при $W=0$. Коэффициенты K_p в зависимости от давлений внутри блока (H_2) и снаружи (H_1) приведены в табл. 2.3.

При оценке теплового режима РЭА в герметичном корпусе с наружным обдувом и пониженным давлением воздуха внутри блока следует пользоваться вероятностными графиками рис. 2.37 при $W \neq 0$. Влияние пониженного давления на тепловой режим РЭА внутри корпуса блока (H_2) учитывается коэффициентом K_p , значения которого приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Коэффициенты K_p , учитывающие влияние пониженного давления на тепловой режим герметичного блока с наружным обдувом

W , кг/м ² ·с	$H \cdot 10^{-5}$, Па									
	0,67	0,53	0,4	0,27	0,13	0,11	0,08	0,05	0,03	0,007
1 — 2	1,03	1,06	1,1	1,16	1,24	1,28	1,3	1,35	1,37	1,39
3 — 4	1,05	1,09	1,15	1,22	1,32	1,35	1,38	1,45	1,48	1,51

При оценке теплового режима РЭА в герметичном блоке с внутренним перемешиванием и пониженным давлением воздуха следует пользоваться вероятностными графиками рис. 2.36 при $W \neq 0$. Изменение давления воздуха внутри блока учитывать не следует, а влияние пониженного давления окружающей среды (H_1) на тепловой режим учитывается, коэффициентом K_p , значения которого приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Коэффициенты K_p , учитывающие влияние пониженного давления на тепловой режим герметичного блока с внутренним перемешиванием

W , кг/м ² ·с	$H \cdot 10^{-5}$, Па									
	0,67	0,53	0,40	0,27	0,13	0,11	0,08	0,05	0,03	0,007
1	1,05	1,09	1,13	1,22	1,35	1,41	1,47	1,53	1,61	1,73
2	1,07	1,1	1,16	1,25	1,40	1,48	1,54	1,61	1,70	1,85
3	1,08	1,12	1,18	1,30	1,48	1,55	1,64	1,72	1,85	2,02

Для оценки теплового режима РЭА с естественным воздушным охлаждением в перфорированном кожухе при пониженном давлении можно применять кривые рис. 2.38 с использованием значений коэффициента K_p , приведенных в табл. 2.6.

Значения коэффициентов K_p из табл. 2.6 следует применять и для учета пониженного давления воздуха при выборе способов воздушного охлаждения в соответствии с рис. 2.35.

Проиллюстрируем выбор способа воздушного охлаждения РЭА при пониженном давлении воздуха на конкретном примере. Предположим, что необходимо выбрать способ охлаждения блока РЭА, работающего в длительном режиме в негерметичном отсеке.

Таблица 2.6

Коэффициенты K_p , учитывающие влияние пониженного давления на тепловой режим блоков с перфорированным кожухом

$H \cdot 10^{-5}$, Па	0,67	0,53	0,40	0,27	0,13	0,11	0,08	0,05	0,03	0,007
K_p	1,07	1,19	1,28	1,36	1,6	1,67	1,76	1,87	2,02	2,17

ке самолета при $H=5 \cdot 10^4$ Па (40 мм рт. ст.). Исходные данные блока следующие: $q=500$ Вт/м², $\Delta T_c=50$ К. Пользуясь табл. 2.6, определим $q'=500 \cdot 1,87=935$ Вт/м²; по кривым рис. 2.35 найдем, что параметры блока лежат на границе областей 2 и 3. Следовательно, для охлаждения блока необходимо выбрать принудительное воздушное охлаждение. Однако проверим и возможность применения естественного воздушного охлаждения. Обратимся с этой целью к рис. 2.36—2.39.

По рис. 2.36 при $W=0$ проверим возможность применения герметичного корпуса без наддува и с наддувом. С учетом табл. 2.2 $q''=500 \cdot 1,44=720$ Вт/м², что соответствует на рис. 2.36 вероятности $p=0,15$, и в соответствии с приведенными выше рекомендациями этот способ охлаждения выбирать не следует. Применение наддува не приводит к значительному улучшению условий охлаждения, так как максимальное значение коэффициента $K_p=1,33$ (табл. 2.3) и $q'''=500 \cdot 1,33=665$ Вт/м², что соответствует вероятности $p=0,2$ (рис. 2.36). Применение внутреннего перемешивания со скоростями воздуха $W=2$ кг/с·м² и $W=3$ кг/с·м² соответствует (с учетом табл. 2.5), $q^{IV}=500 \cdot 1,61=805$ Вт/м²; $q^V=500 \cdot 1,72=860$ Вт/м², что по рис. 2.36 обеспечивает тепловой режим блока с вероятностями соответственно $p=0,3$ и $0,5$. Следовательно, этот способ охлаждения может быть использован. Однако для обеспечения необходимой скорости внутреннего перемешивания воздуха может потребоваться наддув. Для решения этого вопроса необходимо рассчитать режимы работы вентиляторов, используемых для внутреннего перемешивания воздуха в блоке при пониженном давлении.

По рис. 2.37 при $W=3-4$ кг/с·м² проверим возможность применения наружного обдува. С учетом табл. 2.4 $q^{VI}=500 \cdot 1,45=725$ Вт/м², тогда по рис. 2.37 вероятность обеспечения теплового режима блока лежит в пределах $p=0,43-0,45$. Следовательно, этот способ охлаждения может быть принят.

Если использовать охлаждение блока продувом холодным воздухом, то из рис. 2.39 следует, что при удельном расходе воздуха $g=300$ кг/ч·кВт тепловой режим блока может быть обеспечен с вероятностью $p=0,7$.

И, наконец, при использовании перфорированного корпуса (рис. 2.38 и табл. 2.6) вероятность обеспечения теплового режима блока составит $p=0,22$. Можно сделать следующие выводы.

Если по условиям эксплуатации блок должен быть выполнен в герметичном корпусе, то необходимо выбрать принудительное воздушное охлаждение с внутренним перемешиванием воздуха либо с наружным обдувом. Если осуществить принудительное охлаждение не представляется возможным, то для осуществления естественного охлаждения даже при наличии наддува необходимо либо увеличить размеры блока, либо снизить рассеиваемую мощность, либо понизить температуру окружающей среды, что, безусловно, ухудшит показатели блока в целом и вызовет большие трудности.

Если по условиям эксплуатации блок может быть выполнен в негерметичном корпусе, то с большой вероятностью можно обеспечить нормальный тепловой режим при принудительном охлаждении с продувом холодного воздуха. Этот способ является наиболее предпочтительным из всех рассмотренных. При естественном охлаждении этого блока в перфорированном корпусе вероятность обеспечения нормального теплового режима почти в три раза меньше и соответственно во столько же раз большие трудности в осуществлении этого способа. Кстати, трудности почти такие же, как при

осуществлении естественного охлаждения в герметичном корпусе. Количественное представление о трудностях, которые имеют место при осуществлении различных способов охлаждения, можно составить по величинам вероятностных оценок.

Заметим, что графики на рис. 2.36—2.39 построены для РЭА с дискретными и микроминиатюрными элементами. Для больших элементов, показатели которых попадают в область 2), необходимо выполнить очечный расчет теплового режима, после чего можно выбирать способ охлаждения.

Следует подчеркнуть, что окончательный выбор способа охлаждения РЭА не сводится только к определению области, в которую попадают тепловые показатели на диаграмме областей целесообразного применения различных способов охлаждения (рис. 2.35), или только к сопоставлению вероятностных оценок, приведенных на рис. 2.36—2.39. Это важные, но не все влияющие факторы. Необходимо также учитывать техническую возможность осуществления данного способа охлаждения и характеристики СОТР: массу, объем, потребляемую мощность. Сопоставление таких факторов, как принадлежность к определенной области на рис. 2.35, достаточная вероятность, техническая осуществимость, приемлемые характеристики СОТР, а иногда и специальные требования, позволяет осуществить окончательный выбор рационального способа охлаждения РЭА.

Мы подробно обсудили выбор способа охлаждения при попадании показателей РЭА в область 2 на рис. 2.35. При попадании показателей РЭА в другие области подобного типа (возможно применение двух-трех способов), т. е. в области 4, 6—8 на рис. 2.35, практически с одинаковой вероятностью можно осуществить любой соответствующий способ охлаждения. Поэтому дальнейший выбор способа охлаждения РЭА в этом случае сводится к сопоставлению двух других факторов: технической осуществимости и основных характеристик СОТР.

Указанный подход позволяет решать на ранней стадии конструирования РЭА и другие задачи. Для иллюстрации этого положения приведем два примера. При конструировании мощных ламп на ранней стадии необходимо определить, потребуется ли оребрение охлаждаемой поверхности, так как масса и объем лампы во многом зависят от наличия и величины ребер. Предположим, что охлаждаемая поверхность анода имеет следующие показатели: $q=4 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $\Delta T_c=250 \text{ К}$. В этом случае показатели попадают в область 5 на рис. 2.35, т. е. требуется жидкостное охлаждение для обеспечения нормального теплового режима анода лампы. Однако, как следует из этого же рисунка, достаточно уменьшить удельную рассеиваемую мощность в 1,6 раза и показатели попадают в область 3 (принудительное воздушное охлаждение). Таким образом, для обеспечения нормального теплового режима лампы при принудительном воздушном охлаждении достаточно уменьшить удельную рассеиваемую мощность в 1,6 раза или, что то же самое, увеличить поверхность анода за счет оребрения в 1,6 раза.

Другой пример. На ранней стадии проектирования функционального блока РЭА и блока питания необходимо решить следующий вопрос: выполнить конструкцию в виде одного блока, внутри которого размещены элементы функционального назначения и питания, либо выполнить конструкцию в виде двух отдельных блоков. С точки зрения электрических соединений, трудоемкости и технологии изготовления первый вариант, как правило, лучше, с точки зрения ремонтопригодности луч-

ше второй. Необходимо решить, какому варианту отдать предпочтение с точки зрения обеспечения теплового режима РЭА в герметичном кожухе. Показатели имеют следующие значения:

для функционального блока $\Delta T_c = 30$ К, $q = 250$ Вт/м²;

для блока питания $\Delta T_c = 60$ К, $q = 520$ Вт/м²;

при монтаже в одном блоке $\Delta T_c = 30$ К, $q = 390$ Вт/м².

Пользуясь рис. 2.36 при $W=0$, определим, что вероятности обеспечения теплового режима имеют значения:

для функционального блока $p = 0,45$;

для блока питания $p = 0,5$;

при монтаже в одном блоке $p = 0,19$.

В соответствии с приведенными выше рекомендациями при монтаже в одном блоке обеспечение нормального теплового режима будет связано с большими трудностями и не исключено, что окажется необходимым применение принудительного воздушного охлаждения. Эти соображения позволяют конструктору принять решение и выбрать один из вариантов конструкции.

В заключение напомним читателю, что изложенные здесь методы являются приближенными, так как они опираются на минимальную информацию о будущей конструкции РЭА. Поэтому ими следует пользоваться на ранней стадии конструирования. На последующих стадиях выбор способа охлаждения необходимо уточнить.

Глава 3

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА

3.1. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА «БОЛЬШИХ» ЭЛЕМЕНТОВ

Аналитическое исследование (расчет) теплового режима является основным методом анализа при теплофизическом конструировании элементов РЭА и широко используется на стадиях эскизного и технического проектирования РЭА.

Методам расчета тепловых режимов элементов РЭА посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ. Это создает серьезные трудности, с которыми сталкиваются при расчете конкретных изделий, особенно при определении тепловых сопротивлений реальных поверхностей. Здесь не ставится задача изложить все эти результаты. В этой главе будут изложены лишь основные идеи и наиболее приемлемая, на наш взгляд, последовательность расчетов теплового режима ряда элементов РЭА. Для более полного знакомства с расчетами теплового режима других элементов РЭА в тексте даны ссылки на соответствующую литературу.

В гл. 2 мы уже познакомили читателя с основными конструктивными особенностями «больших» элементов. Особенностью этих конструкций является наличие оребренной поверхности теплообмена. Поэтому методы теплового и аэродинамического расчета больших элементов РЭА сводятся главным образом к расчету оребренных (в частном случае гладких) поверхностей.

Мощность, рассеиваемая поверхностью элемента, равна

$$P = k(T - T_c) \xi S, \quad (3.1)$$

где T и S относятся к оребренной поверхности; k — коэффициент теплоизлучения; T_c — средняя температура теплоносителя; ξ — коэффициент эффективности ребра (при отсутствии оребрения $\xi=1$). Входящие в уравнение (3.1) величины P , k , T_c , ξ и S обычно заданы. Величина k зависит от интенсивности теплообмена α и термического сопротивления слоя краски или покрытия на поверхности охлаждения $\delta_{\text{п}}/\lambda_{\text{п}}$:

$$k = 1/(1/\alpha + \delta_{\text{п}}/\lambda_{\text{п}}), \quad (3.2)$$

где α учитывает передачу тепла конвекцией и излучением.

Коэффициент эффективности ребра ξ характеризует температурный перепад по ребру и равен [24]

$$\xi = \text{th} (mh)/mh, \quad (3.3)$$

где $m = \sqrt{aU/\lambda F}$; U — периметр сечения ребра; λ — коэффициент теплопроводности ребра; F — площадь поперечного сечения ребра; h — высота ребра (рис. 3.1 и 3.2); у ребер круглого сечения (рис. 3.1, б) $m = \sqrt{4a/\lambda d}$; у ребер прямоугольного сечения, когда длина ребра значительно меньше его толщины (рис. 3.1, в), $m = \sqrt{2a/\lambda \delta}$; d — диаметр сечения; δ — толщина ребра.

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{5,67\epsilon_{\text{пр}} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]}{T_1 - T_2}, \quad (3.4)$$

где T_1, T_2 — температуры поверхностей, между которыми имеет место теплообмен излучением; $\epsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты этих поверхностей. С методами расчета приведенной степени черноты можно ознакомиться в [8, 25—29]. Теплоотдача излучением играет существенную роль при естественном воздушном охлаждении. При жидкостном и испарительном охлаждении теплоотдача излучением отсутствует. Если поверхность излучающего тела значительно меньше поверхности тела, на которое происходит излучение (в частности, окружающая среда), то в (3.4) приближенно можно считать приведенную степень черноты $\epsilon_{\text{пр}}$ равной степени черноты поверхности охлаждения ϵ_1 . Значения ϵ_1 для различных типов поверхностей приведены в [8, 25, 26].

Большие трудности возникают при определении конвективного коэффициента теплообмена (как в однородной, так и в двухфазной среде). Поэтому рассмотрим более подробно методы его определения при различных способах охлаждения.

Конвективный коэффициент теплообмена определяется по формуле

$$\alpha_{\text{к}} = \text{Nu} \lambda / l_0, \quad (3.5)$$

где Nu — критерий Нуссельта; λ — коэффициент теплопроводности теплоносителя; l_0 — определяющий размер.

При естественном воздушном охлаждении критерий Нуссельта определяется по одной из формул (3.6), (3.7), сведенных в табл. 3.1.

Для горизонтальной пластины, обращенной охлаждаемой поверхностью вверх, коэффициент теплообмена должен быть увеличен на 30 % по сравнению с величиной, найденной из уравнений (3.5) и (3.6).

При давлении воздуха, отличном от нормального, конвективный коэффициент теплообмена определяется по формуле [8, 31]

$$\alpha_{\text{кн}} = \alpha_{\text{к}0} (H/760)^{0.5}, \quad (3.8)$$

где $\alpha_{\text{к}0}$ — коэффициент конвективного теплообмена при нормальном давлении воздуха; H — давление воздуха.

Так как при естественном охлаждении величины Gr , Pr , Nu , а следовательно, и величина конвективного коэффициента теплообмена зависят не только от T_c , но и от температуры поверхности охлаждения T , расчет теплового режима выполняется методом последовательных приближений. Порядок расчета представлен в табл. 3.2. Изложенная схема применяется при проведении простейших расчетов. (Более подробно с подобными методами расчета можно ознакомиться в [8, 24—29, 32—37].)

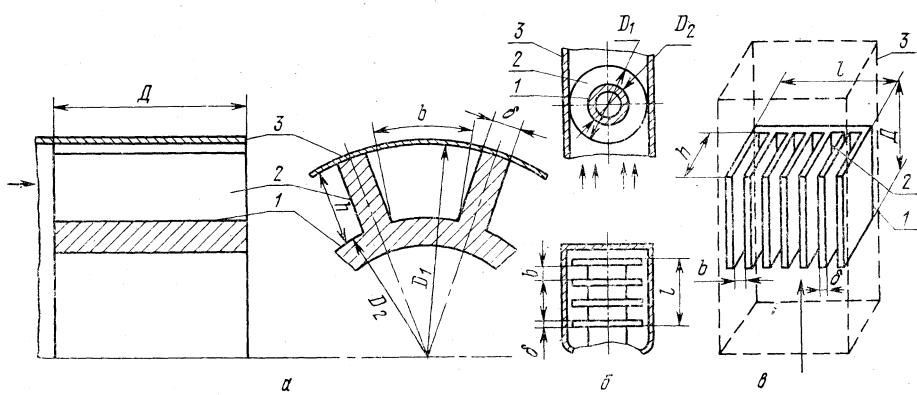


Рис. 3.1. Схемы установки ребристых радиаторов:

a — продольное обтекание; *b* — поперечное обтекание; *c* — пластины; *1* — основание; *2* — ребра; *3* — кожух.

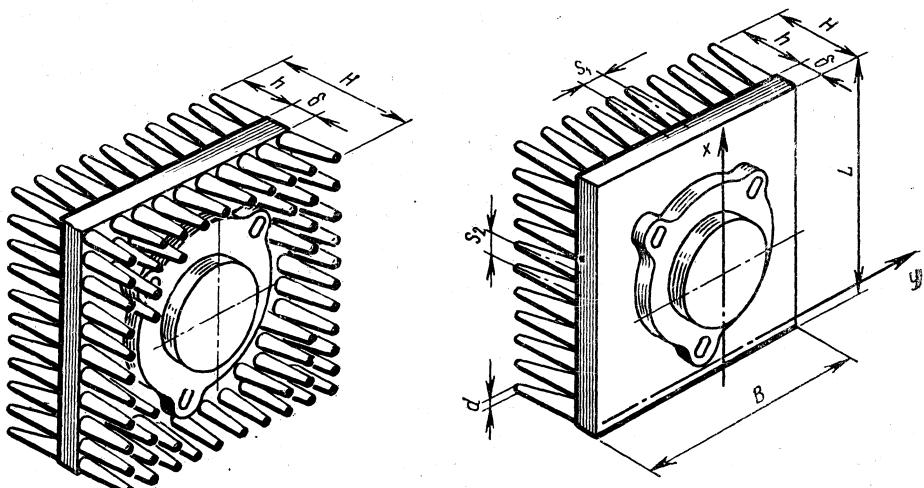


Рис. 3.2. Характерные размеры штырьковых радиаторов.

Таблица 3.1

Формулы для определения критерия Nu при естественной конвекции

Вид поверхности	Формула	Область применимости
Гладкая (неоребренная) в большом объеме [29]	$Nu = \begin{cases} 0,45 & (3.6a) \\ 1,18 (GrPr)^{0,125}, & (3.6b) \\ 0,54 (GrPr)^{0,25}, & (3.6b) \\ 0,135 (GrPr)^{0,33}, & (3.6c) \end{cases}$	$(GrPr) \leq 10^{-3}$ $10^{-3} < (GrPr) < 10^2$ $10^2 < (GrPr) < 2 \cdot 10^7$ $2 \cdot 10^7 < GrPr$
Пластинчатый радиатор с вертикально расположенными ребрами [30]	$Nu = \begin{cases} 1,4 [V(1+0,113Gr) \times \\ \times l_0/D + 0,33Gr l_0/D - \\ - (1 + 0,113Gr l_0/D)], & (3.7a) \\ 0,64 + 0,023Gr l_0/D, & (3.7b) \\ 0,5 (Gr l_0/D) & (3.7b) \end{cases}$	$Gr l_0/D < 7$ $7 \leq Gr l_0/D < 20$ $Gr l_0/D \geq 20$

D — длина ребра, $l_0 = b/2$,
 b — расстояние между ребрами

Примечание. Термофизические свойства определяются при $T_{cp} = (T + T_c)/2$, определяющий размер: для шара и горизонтального цилиндра — диаметр, для вертикального цилиндра и пластины — высота, для горизонтальной пластины — наименьший размер в плане.

Таблица 3.2

Порядок расчета теплового режима оребренной поверхности при естественной конвекции (исходные данные: P , геометрические размеры поверхности охлаждения; $T^{(x)}$, T_c , H , ε , δ_{π} , λ_{π})

1. Задаемся величиной суммарного коэффициента теплообмена $\alpha' = 10 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.
2. Определяем величину коэффициента эффективности ребра ξ' по формуле (3.3).
3. Находим величину коэффициента теплопередачи k' по формуле (3.2).
4. В первом приближении определяем температуру поверхности охлаждения: $T' = P/k' \xi' S + T_c$.
5. Определяем среднюю температуру воздуха: $T_{cp} = (T' + T_c)/2$.
6. Находим величины суммарного коэффициента теплообмена α'' и коэффициента теплопередачи k'' во втором приближении: $\alpha'' = \alpha_k + \alpha_{\pi}$; α_k находится по табл. 3.1 и формуле (3.5) с учетом вида и положения поверхности; α_{π} — по (3.4); k'' — по (3.2).
7. Уточняем величину коэффициента эффективности ребра ξ'' по формуле (3.3).
8. Определяем температуру поверхности охлаждения во втором приближении: $T'' = P/k'' \xi'' S + T_c$.
9. Повторяем расчет по пп. 5—8 до выполнения условия $(T^{n+1} - T^n) < \eta$ (η — величина заданной наперед погрешности расчета при n и $(n+1)$ приближениях. Обычно бывает достаточно сделать не более трех приближений).
10. Сравниваем полученную температуру поверхности с допустимой $T^n \leq T^{(x)}$.

Пример. Необходимо определить среднюю температуру большого элемента, установленного на пластинчатом радиаторе с вертикально расположенными ребрами, в условиях естественной конвекции, если известны: мощность, рассеиваемая большим элементом, $P = 100 \text{ Вт}$; геометрические размеры и площадь радиатора $\delta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $b = 10^{-2} \text{ м}$, $h_{\pi} = 0,1 \text{ м}$, $D = 0,2 \text{ м}^2$, $S = 0,5 \text{ м}^2$; коэффициент теплопроводности материала

ребра $\lambda = 170 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; максимально допустимая температура поверхности охлаждения $T_{(\lambda)} = 358 \text{ К}$ (75°C); температура окружающей среды и давление воздуха $T_c = 333 \text{ К}$ ($+50^\circ\text{C}$), $H = 0,1 \text{ МПа}$; степень черноты поверхности $\varepsilon = 0,9$.

Задаемся величиной коэффициента теплоотдачи $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$. Определяем коэффициент эффективности:

$$m = \sqrt{2 \cdot 10 / (170 \cdot 2 \cdot 10^{-3})} = 7,58,$$

$$\xi = \text{th}(7,58 \cdot 0,1) / (7,58 \cdot 0,1) = (0,64 / 0,758) / 0,758 = 0,845.$$

В первом приближении находим среднюю температуру поверхности охлаждения

$$T' = 100 / (10 \cdot 0,84 \cdot 0,5) + 323 = 346,2 \text{ К.}$$

Определяем среднюю температуру воздуха $T_{cp} = (346,2 + 323) / 2 = 334,6 \text{ К.}$

Определяем критерий Грасгофа

$$\text{Gr} = \frac{9,8 (0,5 \cdot 10^{-2})^3 (1/334,6) \cdot 23,2}{(18,97 \cdot 10^{-6})^2} = 236,$$

$$\text{Gr} (l_0/D) = 236 (0,5 \cdot 10^{-2}) 0,2 = 5,9 < 7.$$

Следовательно, необходимо использовать формулу (3.7а)

$$\text{Nu} = 1,4 [V(1 + 0,113 \cdot 5,9)^2 + 0,333 \cdot 5,9 - (1 + 0,113 \cdot 5,9)] = 0,71.$$

Находим

$$\alpha_k = \frac{0,71 \cdot 2,9 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 4,2 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К};$$

$$\alpha_l = \frac{5,67 \cdot 0,9 \left[\left(\frac{270 + 73,2}{100} \right)^4 - \left(\frac{270 + 56}{100} \right)^4 \right]}{73,2 - 50} = 7,8 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}^4,$$

$$\alpha' = 4,2 + 7,8 = 12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К.}$$

Уточняем:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot 12}{170 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} = 8,3; \quad \xi = \frac{\text{th}(8,3 \cdot 0,1)}{8,3 \cdot 0,1} = 0,82;$$

$$T'' = \frac{100}{12 \cdot 0,82 \cdot 0,5} + 323 = 343,3 \text{ К};$$

$$T'_{cp} = \frac{343,3 + 323}{2} = 333,1 \text{ К};$$

$$\text{Gr}' = \frac{9,8 (0,5 \cdot 10^{-2})^2 (20,3 / 333,1)}{(18,97 \cdot 10^{-6})^2} = 207;$$

$$\left(\text{Gr} \frac{l_0}{D} \right)' = 207 \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 5,2 < 7;$$

$$\text{Nu}' = 1,4 [V(1 + 0,113 \cdot 5,2)^2 + 0,333 \cdot 5,2 - (1 + 0,113 \cdot 5,2)] = 0,644.$$

Находим второе приближение для коэффициентов теплообмена

$$\alpha''_k = \frac{0,644 \cdot 2,9 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 3,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}},$$

$$\alpha''_l = \frac{5,67 \cdot 0,9 \left[\left(\frac{273 + 70,3}{100} \right)^4 - \left(\frac{283 + 50}{100} \right)^4 \right]}{70,3 - 50} = 7,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}},$$

$$\alpha'' = 3,8 + 7,8 = 11,6 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К.}$$

Еще раз уточняем величину температуры поверхности

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,6}{270 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} = 8,2;$$

$$\xi = \frac{\operatorname{th}(8,2 \cdot 0,1)}{8,2 \cdot 0,1} = 0,825;$$

$$T'' = \frac{100}{11,6 \cdot 0,825 \cdot 0,5} + 323 = 343,8 \text{ К.}$$

Так как третье приближение практически совпадает со вторым, то принимаем в качестве средней температуры охлаждаемой поверхности 343,8 К (70,8°C). Допустимая температура составляет 348 К, поэтому тепловой режим будет нормальным.

При *принудительном воздушном охлаждении* за температуру охлаждающего воздуха в формуле (3.1) принимается средняя в пределах теплоотдающей поверхности температура воздуха

$$T_b = T_c + (P/2c_p G), \quad (3.9)$$

где T_c — температура охлаждающего воздуха на входе в элемент; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; G — массовый расход охлаждающего воздуха.

Критерий Нуссельта в этом случае определяется по одной из следующих формул.

1. При продольном обтекании пластины, цилиндра [8]

$$\text{Nu} = 0,58 \text{Re}^{0,5} \text{ при } \text{Re} < 4 \cdot 10^4, \quad \text{Nu} = 0,032 \text{Re}^{0,8} \text{ при } \text{Re} \geq 4 \cdot 10^4, \quad (3.10)$$

где $\text{Re} = WL/v$ — критерий Рейнольдса; W — средняя скорость воздуха.

Теплофизические свойства воздуха в этом случае определяются при температуре T_b , а в качестве определяющего размера принимается длина теплоотводящей пластины (либо цилиндра) по направлению потока.

2. Для одиночного цилиндра с гладкими продольными ребрами (рис. 3.1,а) при движении турбулентного потока воздуха в осевом направлении [26, 29]

$$\text{Nu} = 0,0185 \text{Re}^{0,8} \varepsilon_D, \quad (3.11)$$

$$\text{где } \varepsilon_D = \begin{cases} 5,22 \text{Re}^{0,125} (D/d_s)^{-2/\text{Re}^{0,3}} & \text{при } D/d_s < 50, \\ 1 & \text{при } D/d_s \geq 50, \end{cases}$$

D — длина ребра (рис. 3.1,а); F — сечение канала для прохода воздуха; L — смоченный периметр.

3. Для одиночного цилиндра с поперечными ребрами прямоугольного сечения, плотно охваченными кожухом воздушного канала (рис. 3.1,б) [38]

$$\text{Nu} = 0,785 [1 + 21J_1(A/50)] \text{Re}^m \quad (3.12)$$

при

$$\text{Re} = 4 \cdot 10^3 - 45 \cdot 10^3, \quad m = \frac{5,6}{11,8 + (h_p/S_p)};$$

$$\text{Nu} = 0,202 [1 + 93J_1(A/302)] \text{Re}^m \quad (3.13)$$

при

$$\text{Re} = 45 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^6, \quad m = \frac{12,9}{20,8 + (h_p/S_p)},$$

где $J_1(x)$ — функция Бесселя мнимого аргумента первого рода первого порядка;

$$A = \frac{l_0 h_p}{D \delta}; S_p = b \delta; h_p = \frac{D - D_2}{2}; l_0 = \frac{2D_2}{\pi} \left(\frac{D - D_2}{S_p} + 1 \right); \text{Re} = \frac{v l_0}{\nu};$$

δ — толщина ребра; h_p — средняя высота ребер; S_p — шаг ребер вдоль оси цилиндра; b — зазор между ребрами; D_2 — диаметр цилиндра; D — диаметр ребра (рис. 3.1, б).

Скорость воздуха определяется в поперечном осевом сечении цилиндра. В [38] приведены формулы для расчета при различных конфигурациях ребер.

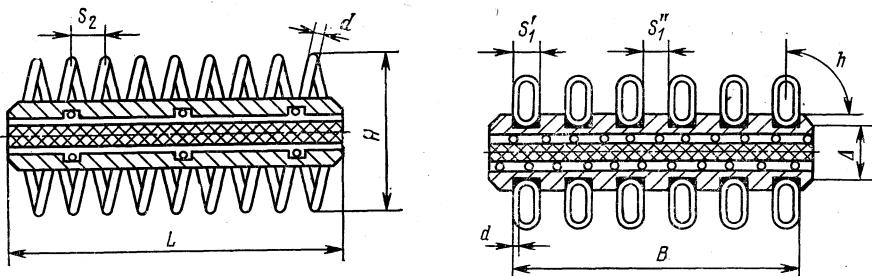


Рис. 3.3. Характерные размеры петельно-проводочных радиаторов.

4. При расчете теплового режима «больших» элементов со штыревыми радиаторами, охлаждаемых принудительным воздушным потоком (рис. 3.2),

$$Nu = 0,21 \text{Re}^{0,65} \text{ при } 2 \cdot 10 \leq \text{Re} \leq 2 \cdot 10^5, \quad (3.14)$$

где в качестве определяющего размера принят диаметр штыря d , а скорость воздуха рассматривается в узком сечении канала $v = v_{\text{вх}}(1 + d/S_1 - d)$; $v_{\text{вх}}$ — скорость воздуха на входе в радиатор; S_1 — шаг установки штырей (рис. 3.2).

5. Для петельно-проводочных радиаторов (рис. 3.3) [39]

$$Nu = c \text{Re}^m (1 - a \text{Re}^{0,25}), \quad (3.15)$$

где a , c и m являются функциями параметров S_1/d , S_2/d , h/d , L/d и φ ; $S_1 = (S'_1 + S''_1)/2$ — средний поперечный шаг оребрения, определяемый через расстояния между осями проволочек в самой петле спирали S'_1 и расстояния между осями проволочек по зазору между спиралями S''_1 ; S_2 — средний продольный шаг оребрения; d — диаметр проволочки; L — длина основания; h — условная высота петли (рис. 3.3); $\varphi = (BH - B\Delta)/(F_{\text{тр}} - B\Delta)$ — степень заполнения сечения канала; B — ширина радиатора; H — высота радиатора по оребрению; Δ — толщина основания радиатора; $F_{\text{тр}}$ — площадь сечения канала;

$$a = a_{S_1} a_{S_2} v a_L; \quad c = c_{\varphi} c_{S_1} c_{S_2} c_h c_L; \quad m = m_{\varphi} m_{S_1} m_{S_2} m_L.$$

Значения коэффициентов, составляющих a , c , m , могут быть найдены в зависимости от определяющих параметров S_1/d , S_2/d , h/d , L/d и φ по графикам, приведенным на рис. 3.4 и 3.5 [39].

Большие трудности, с которыми встречаются разработчики при определении коэффициента теплоотдачи оребренных поверхностей, привели к необходимости экспериментального определения этих зависимостей для более узкого класса подобных конструкций. Особенно удачно этот вопрос решен для унифицированных конструкций радиаторов

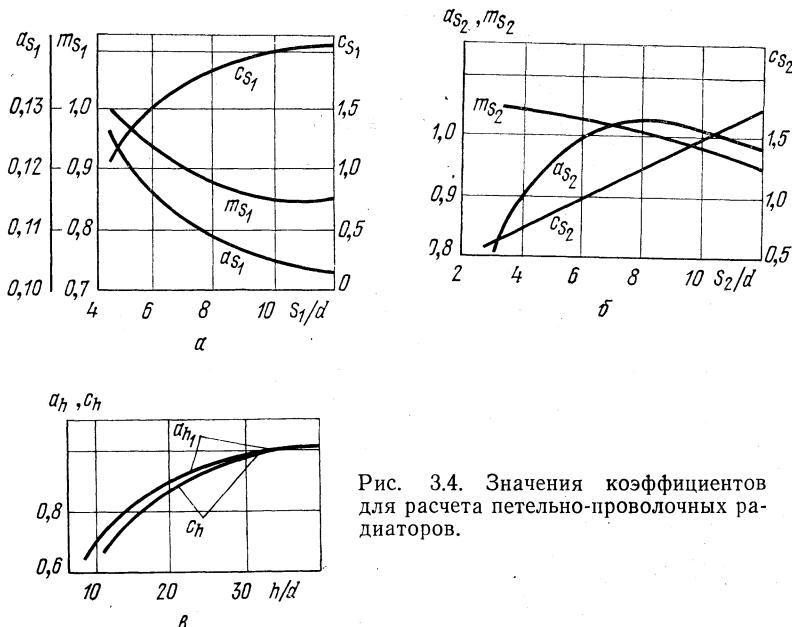


Рис. 3.4. Значения коэффициентов для расчета петельно-проводочных радиаторов.

полупроводниковых приборов, для которых в ряде отраслевых стандартов приведены экспериментальные характеристики для определения коэффициента теплоотдачи в зависимости от способа охлаждения и условий эксплуатации, площади теплоотдающей поверхности, рассеиваемой мощности и конструкции радиатора. Эти характеристики представлены в виде номограмм [34], графиков [32] и позволяют по исходным данным выбрать радиатор для полупроводникового прибора. В качестве примера на рис. 3.6 приведены данные для стандартного радиатора.

Для дискретных элементов, как правило, применяются унифицированные радиаторы. Поэтому расчет радиатора для полупроводниковых

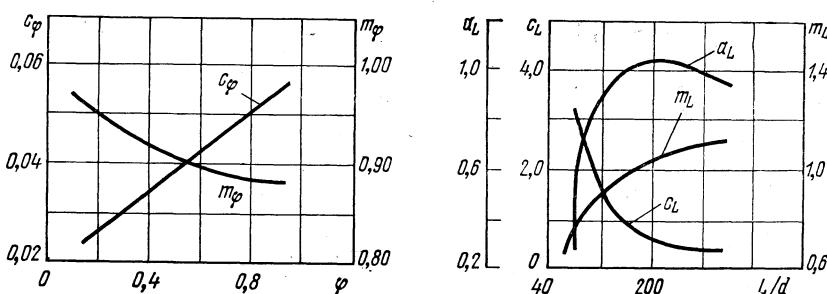


Рис. 3.5. Значения коэффициентов для расчета петельно-проводочных радиаторов.

приборов, монтируемых внутри блока РЭА, сводится к выбору его по соответствующим номограммам или справочным листам.

Пример.

1. Необходимо определить среднюю температуру «большого» элемента, установленного на штыревом радиаторе, если известны:

- мощность, рассеиваемая большим элементом, $P = 100 \text{ Вт}$;
- геометрические размеры и площадь радиатора (рис. 3.2) $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $S_1 = 7 \cdot 10^{-3}$, $h = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $S = 0,3 \text{ м}^2$;
- коэффициент теплопроводности материала штыря $\lambda = 170 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$;
- максимально допустимая температура поверхности охлаждения $T^{(n)} = 358 \text{ К}$ ($+85^\circ\text{C}$);

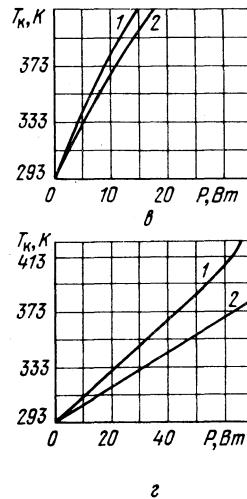
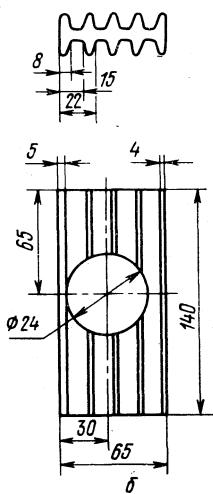
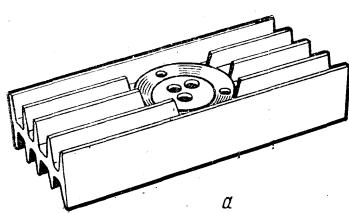


Рис. 3.6. Размеры и характеристики стандартного радиатора:

a — общий вид радиатора; **б** — чертеж радиатора; **в** — зависимость температуры корпуса транзистора при естественном охлаждении от рассеиваемой мощности для двух положений теплоотвода: 1 — горизонтальное; 2 — вертикальное; **г** — зависимость температуры корпуса транзистора от рассеиваемой мощности при принудительном охлаждении со скоростью воздуха: 1 — 1,5 м/с; 2 — 3 м/с.

— массовый расход охлаждающего воздуха $G = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$;

— скорость воздуха на входе в радиатор $v_{bx} = 3 \text{ м}$;

— температура и давление охлаждающего воздуха на входе в элемент $T_e = 323 \text{ К}$ ($+50^\circ\text{C}$), $H = 0,1 \text{ МПа}$.

2. По формуле (3.9) определяем среднюю температуру воздуха

$$T_b = 323 + \frac{100}{2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 333 \text{ К.}$$

3. Определяем скорость воздуха в узком сечении

$$v = 3 \left(1 + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}} \right) = 4,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

4. Определяем критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{4,2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{18,97 \cdot 10^{-6}} = 442.$$

5. Определяем коэффициент теплообмена по формуле (3.14)

$$Nu = 0,21 \cdot 442^{0,65} = 1,1,$$

откуда по (3.5)

$$\alpha = \frac{1,1 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Читатель может убедиться самостоятельно, что коэффициент теплообмена излучением в данном примере учитывать не следует.

6. Определяем по (3.3) коэффициент эффективности штыря:

$$m = \sqrt{\frac{4 \cdot 16}{170 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} = 13,7,$$

$$\xi = \frac{\operatorname{th}(13,7 \cdot 2 \cdot 10^{-2})}{13,7 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 0,98.$$

7. Определяем среднюю температуру охлаждаемой поверхности

$$T_{\text{ср}} = \frac{100}{16 \cdot 0,98 \cdot 0,3} + 333 = 354 \text{ К.}$$

Так как предельно допустимая температура равна 358 К (85°C), то тепловой режим большого элемента является допустимым.

Расчет теплового режима для «большого» элемента РЭА не всегда сводится к определению средней или даже максимальной температуры корпуса поверхности охлаждения. Часто необходимо провести более детальный анализ теплового режима с определением температурного поля в некоторых заданных точках внутри элемента. Методика такого расчета во многом зависит от конструкции элемента и должна быть составлена исследователем по общим методам расчета теплопередачи, изложенным в [8, 24—27, 29, 37].

Величина контактного теплового сопротивления между радиатором и корпусом прибора зависит от многих факторов: площади контактных поверхностей, физико-химических свойств материалов контактных поверхностей, их покрытий, изолирующих прокладок, усилий затяжки винтов, качества обработки контактных поверхностей. С методами расчета контактного теплового сопротивления, а также с рекомендациями по его уменьшению читатель может ознакомиться в [32, 37, 40—42].

Тепловое сопротивление между корпусом и $p-n$ -переходом является основным параметром полупроводникового прибора и для мощных приборов, какими обычно бывают «большие» элементы РЭА, задается в паспорте прибора. С методами измерения теплового сопротивления между $p-n$ -переходом и корпусом можно ознакомиться в [32].

С расчетами температурного поля внутри трансформаторов и дросселей, резисторов, оптических квантовых генераторов читатель может ознакомиться по литературным источникам, приведенным в конце книги.

3.2. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РЭА

Тепловой режим РЭА определяется прежде всего тепловыми характеристиками элементов, конструктивным выполнением аппаратуры, характеристиками системы охлаждения.

Разработчики аппаратуры используют заданные по техническим условиям тепловые характеристики элементов и вынуждены обеспечивать допустимый тепловой режим РЭА, либо увеличивая габариты аппаратуры (увеличивая зазоры между элементами, узлами и платами), либо применяя системы охлаждения, что также приводит к увеличению габаритов.

Посмотрим, как изменится тепловой режим РЭА и ее габариты, если использовать элементы с улучшенными тепловыми характеристиками. Тепловой режим РЭА считается допустимым, если температуры на ее элементах равны или ниже допустимых по техническим условиям на эти элементы.

Под оптимальной конструкцией РЭА с точки зрения тепловых режимов будем понимать конструкцию с «оптимальными характеристиками» при допустимом тепловом режиме. Понятие «оптимальные характеристики» может меняться в зависимости от назначения РЭА. Так, в одном случае под оптимальной характеристикой может подразумеваться минимальный вес, в другом случае — максимальная надежность,

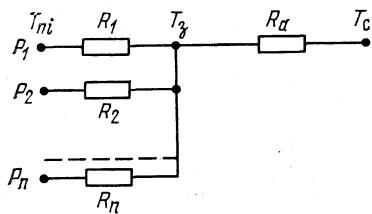


Рис. 3.7. Упрощенная тепловая схема РЭА.

в третьем — минимальный расход воздуха на охлаждение и т. п. В большинстве случаев требуется некоторое разумное сочетание всех факторов. Обычно в аппаратуре есть один или несколько элементов, обладающих низкими допустимыми температурами или большой плотностью теплового потока, которые и определяют конструкцию блока и способ его охлаждения. Часто этими элементами являются достаточно мощные (теплонагруженные) транзисторы.

Поэтому в дальнейших рассуждениях будем считать, что допустимый тепловой режим РЭА ограничен допустимыми по техническим условиям температурами корпуса (или окружающей среды) для нагруженных транзисторов.

Определим, как зависят в указанном выше смысле характеристики РЭА от допустимого теплового режима. На рис. 3.7 приведена упрощенная тепловая схема РЭА. Тепловыделения элементов и их тепловые сопротивления обозначены P_i [Вт], R_i [К/Вт], $i=1, 2, \dots, n$ (n — число элементов). Тепловой режим аппарата характеризуют его эквивалентное тепловое сопротивление R_a [К/Вт], температуры нагретой зоны T_3 , окружающей среды T_c и наиболее нагретой части (критической зоны) элемента T_{ni} .

Если по техническим условиям заданы допустимые температуры поверхности элементов, то допустимый тепловой режим РЭА имеет место, когда соблюдается следующее неравенство:

$$T_3 \leq T_i^{(3)}, \quad (3.16)$$

где T_i — температура поверхности i -го элемента; здесь и в дальнейшем индексом (3) обозначаются допустимые или заданные значения; (д) — действительные значения; (р) — расчетные значения.

Температура нагретой зоны РЭА, схема которой приведена на рис. 3.7, может быть определена из уравнения

$$T_3 = T_c + R_a \sum_{i=1}^n P_i. \quad (3.17)$$

Предположим, что элемент 1 есть транзистор, который ограничивает тепловую нагрузку РЭА; тогда вместо (3.16) можно записать

$$T_3 \leq T_1^{(3)}, \quad (3.18)$$

т. е. условие, при соблюдении которого тепловой режим РЭА считается допустимым. Если (3.18) считать равенством, то

$$T_3 = T_{n1} + P_1 R_1. \quad (3.19)$$

Необходимо оговорить случаи, когда справедливы уравнения (3.16) — (3.19). При выводе этих уравнений использовано понятие нагретой зоны, введенное в [8], а следовательно, использованы та же модель аппарата и те же допущения. Напомним, что уравнение (3.16) справедливо в том случае, если температуры поверхности элементов могут быть отождествлены со среднеповерхностной температурой нагретой зоны. В том случае, если задана температура элемента, которая не может быть непосредственно отождествлена с температурой нагретой зоны (например, в технических условиях может быть задана температура окружающей элемент среды, температура корпуса при наличии радиатора и т. п.), необходимо по известным формулам [8] привести ее к температуре на поверхности нагретой зоны и вместо (3.16) пользоваться уравнением

$$T_3 \leq T_{i \text{ пр}}^{(3)},$$

где $T_{i \text{ пр}}^{(3)}$ — допустимая температура элемента, приведенная к поверхности нагретой зоны.

Из уравнений (3.17) и (3.19) можно определить допустимую удельную рассеиваемую мощность РЭА:

$$P_{\text{уд}} = 1/R_a S_a (T_{n1} - P_1 R_1 - T_c), \quad (3.20)$$

где S_a — поверхность нагретой зоны РЭА.

Уравнения (3.18) — (3.20) связывают основные тепловые параметры РЭА: удельную рассеиваемую мощность и допустимые температуры. Другие параметры РЭА: масса (или объем), надежность, потребляемая мощность — в той или иной степени зависят от значения удельной рассеиваемой мощности.

Раскроем физический смысл уравнения (3.20). В нем коэффициент $1/R_a S_a$ характеризует влияние конструкции и способа охлаждения на величину рассеиваемой мощности, а величины T_{n1} и R_1 — влияние тепловых характеристик транзистора. Допустимый перегрев в РЭА по наиболее нагруженному элементу определяется разностью

$$\Delta T^{(3)} = T_{n1} - T_c. \quad (3.21)$$

Этот перегрев состоит из двух частей: перегрева элемента

$$\Delta T_1^{(3)} = T_{n1} - T_3 = P_1 R_1 \quad (3.22)$$

(где T_{n1} — температура p — n -перехода), и перегрева РЭА.

Таким образом,

$$\Delta T_2^{(3)} = T_3 - T_c, \quad (3.23)$$

$$\Delta T^{(3)} = \Delta T_1^{(3)} + \Delta T_2^{(3)}. \quad (3.24)$$

Уравнение (3.20) позволяет определить влияния конструкции РЭА, системы охлаждения и тепловых характеристик элементов на основной параметр аппарата — допустимую удельную рассеиваемую мощность. Уравнения (3.21) — (3.24) позволяют оценить, какая доля допустимого перегрева температуры приходится на элемент и какая на блок.

На рис. 3.8 условно показано, как распределяется температурный перепад между p — n -переходом транзистора и окружающей средой при работе транзистора в составе аппаратуры.

Величина $\Delta T_1^{(3)}$ зависит только от тепловых характеристик транзистора и рассеиваемой им мощности, а величина $\Delta T_2^{(3)}$ — от конструкции прибора и способа охлаждения. Разработчик имеет возможность варьировать величину $\Delta T_2^{(3)}$ путем интенсификации теплообмена. Несколько снизить значение $\Delta T_1^{(3)}$ можно уменьшением мощности, рассеиваемой транзистором.

Очевидно, что изменение $\Delta T_1^{(3)}$ приводит либо к дроблению необходимой по условиям работы схемы рассеиваемой мощности (вместо одного транзистора появятся два и более или вместо одной схемы две и более), либо к применению транзисторов большей мощности, работающих с малыми коэффициентами нагрузки.

Для оценки степени влияния тепловых характеристик транзисторов и аппаратуры на габариты и надежность РЭА найдем значения $\Delta T_1^{(3)}$ и $\Delta T_2^{(3)}$ для транзистора, режим которого является определяющим в тепловом режиме РЭА. Примем, что транзистор загружен на 80%, т. е. $K_h = P_1/P_{\max} = 0,8$ и температура окружающей среды равна 298 К (25°C).

Для транзистора большой и средней мощности будем считать, что температура на поверхности теплоотвода равна температуре нагретой зоны аппарата, т. е. $T_{t1} = T_3$, а для транзистора малой мощности температура окружающей среды вблизи корпуса равна температуре нагретой зоны, т. е. $T_{b1} = T_3$.

Для оценки степени влияния тепловых сопротивлений для мощного транзистора изображена на рис. 3.9. Здесь R_{pk1} — заданное в ТУ внутреннее сопротивление транзистора; T_{k1} — температура корпуса транзистора; R_{kt1} — сопротивление корпус — теплоотвод; T_{t1} — температура теплоотвода транзистора; R_a — сопротивление аппарата. Сопротивление корпус — теплоотвод определяется как R_kF , где F — площадь контакта транзистора с теплоотводом; R_k — контактное термическое сопротивление. Тогда $T_3 = T_{t1} = T_{pk1} - P_1 R_1$ и $R_1 = R_{pk1} + R_{kt1}$.

Схематическая картина распределения тепловых сопротивлений для транзистора малой мощности, показана на рис. 3.10. Здесь R_{pk1} — заданное в ТУ внутреннее сопротивление транзистора; T_{k1} — температура корпуса транзистора; R_{kt1} — сопротивление корпус — теплоотвод; T_{t1} — температура теплоотвода транзистора; R_a — сопротивление аппарата. Сопротивление корпус — теплоотвод определяется как R_kF , где F — площадь контакта транзистора с теплоотводом; R_k — контактное термическое сопротивление. Тогда $T_3 = T_{t1} = T_{pk1} - P_1 R_1$ и $R_1 = R_{pk1} + R_{kt1}$.

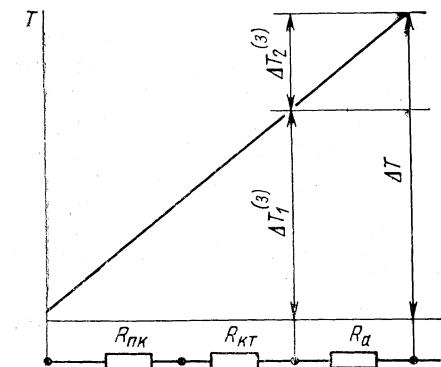


Рис. 3.8. Распределение перегревов в аппаратуре.

Площадь контакта транзистора с теплоотводом; Тогда $T_3 = T_{t1} = T_{pk1} - P_1 R_1$ и $R_1 = R_{pk1} + R_{kt1}$.

Схема распределения тепловых сопротивлений, если применяется транзистор малой мощности, показана на рис. 3.10. Здесь R_{pk1} — заданное в ТУ внутреннее сопротивление транзистора; T_{k1} — температура корпуса транзистора; R_{kt1} — сопротивление корпус — теплоотвод; T_{t1} — температура теплоотвода транзистора; R_a — сопротивление аппарата. Сопротивление корпус — теплоотвод определяется как R_kF , где F — площадь контакта транзистора с теплоотводом; R_k — контактное термическое сопротивление. Тогда $T_3 = T_{t1} = T_{pk1} - P_1 R_1$ и $R_1 = R_{pk1} + R_{kt1}$.



Рис. 3.9. Схема распределения тепловых сопротивлений для мощного транзистора.

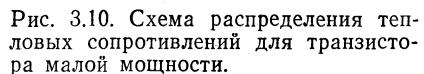


Рис. 3.10. Схема распределения тепловых сопротивлений для транзистора малой мощности.

Таблица 3.3

Распределение перегревов в РЭА с транзисторами средней и большой мощности
($K_n = 0,8$, $T_c = 298\text{K}$ (25°C))

Тип транзистора	P_{\max} , Вт	$T_{\text{н1}}^{(3)}$, К	$R_{\text{н1К}}^{(3)}$, К/Вт	$R_{\text{К11}}^{(3)}$, К/Вт	$T_{\text{т1}}^{(3)}$, К	$\Delta T_{\text{1}}^{(3)}$, К	$\Delta T_{\text{2}}^{(3)}$, К	$\Delta T_{\text{2}}^{(3)}$, К	K_1	K_2
П303										
П306	10	423	10	1,67	329,7	125	93,3	31,7	0,75	0,25
П701										
П213	11,5	358	2,8	1,41	319,2	60	38,8	21,2	0,65	0,35
П213А										
П213Б	10	358	3,3	1,41	320,3	60	37,7	22,3	0,63	0,37
П214										
П215										
КТ802А										
П702	50	423	2,5	0,84	289,4	125	133,6	-8,6	1,07	-0,07
П216										
П217	24	358	1,3	1,4	306,2	60	51,8	8,2	0,865	0,135

Примечание. Средние значения для K_1 и K_2 : $K_{1\text{ср}} = 0,8$; $K_{2\text{ср}} = 0,2$.

данное в ТУ сопротивление переход — воздух (среда); $T_{\text{в1}}$ — температура окружающего транзистор воздуха. При таком распределении сопротивлений температура воздуха определяется из формулы $T_3 = T_{\text{в1}} = T_{\text{н1}} - P_1 R_{\text{пв1}}$.

После вычисления температуры нагретой зоны данного РЭА, по (3.22) определяем перегрев в транзисторе, а по (3.23) — перегрев в РЭА. Суммарный перегрев определяется по (3.24).

Результаты этих расчетов приведены в табл. 3.3 и 3.4. В этих таблицах показано, как используется допустимый перегрев $\Delta T^{(3)}$ в транзисторе ($\Delta T_1^{(3)}$) и в РЭА ($\Delta T_2^{(3)}$). Коэффициенты K_1 и K_2 показывают, какая часть допустимого перегрева используется в транзисторе и РЭА соответственно.

Для транзисторов большой и средней мощности

$$K_1 = (T_{\text{н1}}^{(3)} - T_{\text{т1}}^{(3)}) / (T_{\text{н1}}^{(3)} - T_c), \quad K_2 = 1 - K_1 = (T_{\text{т1}}^{(3)} - T_c) / (T_{\text{н1}}^{(3)} - T_c),$$

для транзистора малой мощности

$$K_1 = (T_{\text{н1}}^{(3)} - T_{\text{в1}}^{(3)}) / (T_{\text{н1}}^{(3)} - T_c),$$

$$K_2 = 1 - K_1 = (T_{\text{в1}}^{(3)} - T_c) / (T_{\text{н1}}^{(3)} - T_c).$$

Транзисторы, у которых $K_1 > 1$ ($K_2 < 0$), вообще не могут быть использованы в РЭА при $K_n = 0,8$ и $T_c = 298\text{K}$ ($+25^\circ\text{C}$).

Из таблицы следует, что 65—80% допустимого по техническим условиям полного температурного перепада приходится на транзистор и только 20—30% на РЭА. Положение усугубляется еще и тем, что в целях повышения надежности РЭА разработчик стремится не использовать весь допустимый температурный перепад, т. е. уменьшает ΔT_2 , и действительные перепады температуры в РЭА составляют не более 10—15% от полного перепада. Отсюда ясно, что у разработчиков РЭА остается мало возможностей конструировать аппаратуру без примене-

ния довольно громоздких систем охлаждения, так как практически почти весь допустимый температурный перепад остается внутри транзистора. Отметим, что эти данные получены при температуре окружающей среды 298 К (25°C), а при температуре 323–333 К значения коэффициента K_2 еще более снижаются.

Таблица 3.4

Распределение перегревов в РЭА с транзисторами малой мощности ($K_h = 0,8$, $T_c = 298\text{K}$ (25°C))

Тип транзистора	P_{\max} , мВт	$T_{n1}^{(3)}$, К	$R_{\text{пв}}^{(3)}$, К/мВт	$T_{b1}^{(3)}$, К	$\Delta T^{(3)}$, К	$\Delta T_1^{(3)}$, К	$\Delta T_2^{(3)}$, К	K_1	K_2
ГТ109А, ГТ109Б—И	30	353	1,8	310	55	43	12	0,78	0,22
МГТ108А—Г, ГТ108А—Г	75	353	0,8	305	55	48	7	0,87	0,13
1Т313А, П410, 1Т313Б, П411, П410А, П411А,									
П416, П416А, Б	100	358	0,43	323	60	35	25	0,58	0,42
МП20	150	358	0,33	318	60	40	20	0,67	0,33
МП25, МП25А, Б МП26А, Б МП42, П42 МП42А, П42А, МП42Б, П42Б	200	348	0,2	316	50	32	18	0,64	0,36
1Т321А, НП39, П39Б, МП40, П40, МП41, П41	150	358	0,25	328	60	30	30	0,5	0,5
ГТ320А, Б, В	200	363	0,225	327	65	36	29	0,55	0,45
1Т-321А—Е, 2Т-301Г—Ж КТ301А—Ж	150	423	0,6	351	125	72	53	0,58	0,42

Примечание. Средние значения для K_1 и K_2 : $K_{\text{ср1}} = 0,65$; $K_{\text{ср2}} = 0,35$.

Существует мнение, что улучшение тепловых характеристик транзистора не столь эффективно, как поиски новых методов охлаждения и принципов конструирования систем охлаждения.

Воспользуемся формулой (3.20) для определения эффективности влияния изменения тепловых характеристик транзистора и конструкции РЭА (включая систему охлаждения) на основной тепловой параметр аппаратуры — допустимую удельную рассеиваемую мощность. Необходимо учесть, что увеличение допустимой удельной рассеиваемой мощности РЭА равносильно уменьшению габаритов и массы аппаратуры в целом, так как в одном и том же объеме можно разместить большее число активных элементов; либо повышению надежности прибора, так как при неизменном объеме создаются меньшие допустимых плотности теплового потока и, как следствие, менее высокие температуры элементов.

Пусть из-за улучшения конструкции РЭА и использования лучшей системы охлаждения мы можем уменьшить ее эквивалентное тепловое

сопротивление R_a на $a\%$, тогда удельная рассеиваемая мощность аппарата по (3.20) может быть увеличена в L_a раз:

$$L_a = \frac{P_{y_{d1}}}{P_{y_{d2}}} = \frac{R_a + 0,01aR_a}{R_a} = 1 + 0,01 a. \quad (3.25)$$

Улучшение тепловых характеристик транзистора на $a\%$ также приведет к возможности увеличения удельной рассеиваемой мощности аппарата в L_a раз. Улучшить тепловые характеристики транзистора на $a\%$ — значит увеличить на этот процент допустимую температуру p — n -перехода и уменьшить сопротивление переход — корпус. Тогда из (3.20)

$$P_{y_{d1}} = (1/R_a S_a) [(1 + 0,01 a) T_n - (1 - 0,01 a) P_1 R_1 - T_c];$$

$$L_a = P_{y_{d1}}/P_{y_{d2}}. \quad (3.26)$$

Подставляя выражения для K_1 и K_2 в (3.26), получаем

$$L_a = 1 + 0,01a [(1 + K_1)/(1 - K_1) + (T_c - 273)/(T_3 - T_c)]. \quad (3.27)$$

Для мощных транзисторов в нашем примере (см. табл. 3.1) можно принять $K_1 \approx 0,8$ и $(T_c - 273)/(T_3 - T_c) \approx 1$, тогда

$$L_{a1} = 1 + 0,1a. \quad (3.28)$$

Для транзисторов малой мощности (см. табл. 3.2) можно принять $K_1 \approx 0,65$ и $(T_c - 273)/(T_3 - T_c) \approx 1$, тогда

$$L_{a2} = 1 + 0,057a. \quad (3.29)$$

На рис. 3.11 построены графики по уравнениям (3.25), (3.28), (3.29), из которых видно, как изменяются тепловые характеристики

Таблица 3.5

Средние значения тепловой проводимости аппаратов при двух видах воздушного охлаждения

Тип кожуха аппарата	Тепловая проводимость $\sigma_a = 1/R_a S_a$, Вт/К·м ²	
	естественное охлаждение	принудительная вентиляция
Герметичный	4,2	8,2 (с внутренним перемешиванием)
Перфорированный	11	25

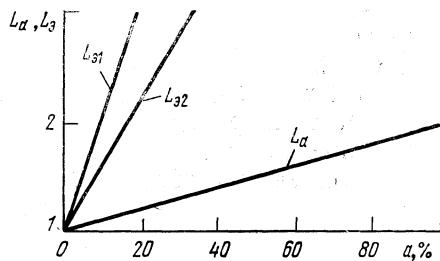


Рис. 3.11. Влияние относительного изменения тепловых характеристик транзистора и РЭА.

РЭА при изменении тепловых характеристик транзистора (L_a) и конструкции РЭА (L_3). Анализ этих характеристик показывает, что увеличение удельной рассеиваемой мощности РЭА в два раза может быть получено при улучшении тепловых характеристик транзистора на 10—15% или при улучшении условий охлаждения аппарата на 100%, т. е. улучшение тепловых характеристик транзистора на 10—15% равноценно улучшению условий охлаждения аппарата в два раза. Это показы-

вает, что улучшение тепловых характеристик транзистора является более рациональным направлением для совершенствования тепловых режимов РЭА, чем оптимальное конструирование аппарата и системы охлаждения.

Раскроем физический смысл приведенных выше цифр, т. е. покажем, с какими затратами связано улучшение условий охлаждения РЭА. В табл. 3.5 приведены средние значения эквивалентной тепловой проводимости РЭА $\sigma_a = 1/R_a S_a$ для двух видов воздушного охлаждения — естественного и принудительного. Из этой таблицы легко сделать вывод, что улучшение условий охлаждения РЭА в два раза можно получить, используя вместо естественного охлаждения принудительное. Использование принудительного охлаждения связано с потреблением дополнительной мощности для вентилятора, значительным увеличением габаритов и массы РЭА. Тот же эффект может быть получен за счет улучшения тепловых характеристик транзистора, следовательно, улучшение тепловых характеристик транзистора на 10—15% равноценно отказу в ряде случаев от использования принудительной вентиляции для охлаждения РЭА.

При анализе тепловых характеристик транзисторов обращает на себя внимание еще одно важное обстоятельство. В последние годы разработаны транзисторы с кремниевыми $p-n$ -переходами. Одна из основных целей при разработке этих транзисторов — получение необходимых электрических характеристик при повышении допустимой температуры $p-n$ -перехода. Сравним характеристики германиевых и кремниевых транзисторов:

$$a_n = \frac{T_{n(kp)} - T_{n(герм)}}{T_{n(герм)}} 100, \quad a_{pk} = \frac{R_{pk(герм)} - R_{pk(kp)}}{R_{pk(герм)}} 100, \quad (3.30)$$

где $T_{n(kp)}$, $T_{n(герм)}$ — допустимые по ТУ температуры $p-n$ -переходов соответственно кремниевых и германиевых транзисторов; $R_{pk(kp)}$, $R_{pk(герм)}$ — заданные в ТУ тепловые сопротивления $p-n$ -переход — корпус для кремниевых и германиевых транзисторов. В табл. 3.6 с помощью (3.30) проведено сравнение тепловых характеристик германиевых и кремниевых транзисторов с примерно одинаковыми электрическими параметрами. Это сравнение показывает, что в кремниевых транзисторах увеличена температура $p-n$ -перехода на 76% и ухудшены тепловые сопротивления на 185—257%. Таким образом, эффект, полученный в кремниевых транзисторах за счет повышения температуры $p-n$ -перехода, практически не приводит к улучшению их тепловых характеристик.

Простое перечисление цифр, характеризующих потенциальные возможности улучшения тепловых характеристик транзисторов, еще не дает полного представления об эффективности этого мероприятия. Для

Таблица 3.6

Сопоставление тепловых параметров германиевых и кремниевых транзисторов

Тип транзистора	Германиевые		Тип транзи- стора	Кремниевые		a_n , %	a_{pk} , %
	T_{n1} , К	R_{pk1} , К/Вт		T_{n1} , К	R_{pk1} , К/Вт		
П201	358	3,5	П302	423	10	76	—185
П213	358	2,8	П701	423	10	76	—257

того чтобы представить, какие возможности появляются при использовании транзисторов с улучшенными характеристиками, необходимо сопоставить характеристики конкретного РЭА при использовании обычных и улучшенных транзисторов.

Выше мы показали, что улучшение тепловых характеристик транзисторов на 10—15% позволяет в ряде случаев отказаться от принудительного охлаждения. Здесь мы исследуем тепловые характеристики некоторого характеристического РЭА при использовании обычных и улучшенных транзисторов.

Таблица 3.7

Транзисторы средней и большой мощности с имеющимися и улучшенными тепловыми характеристиками

Тип транзистора	Имеющиеся тепловые характеристики		Улучшенные тепловые характеристики	
	$T_{\text{пп}}, \text{К}$	$R_{\text{ппк}}, \text{К/Вт}$	$T_{\text{пп}}, \text{К}$	$R_{\text{ппк}}, \text{К/Вт}$
П201	358	3,5	373	2,5
			373	0,8
П303	423	10,0	473	1,0
			373	0,83
П4БЭ	363	2,0	373	1,1
			373	0,83
			373	1,0
			373	1,5
			373	0,4
П213	358	2,8	373	2,0
			373	0,4
			373	0,8
			358	0,43
П213А	358	3,3	373	1,5
			373	0,8
			1313А	358
КТ802А	423	2,5	473	1,5
			373	1,5
П210А	358	1,0	398	0,8
			373	0,5
			348	0,2
П216	358	1,3	408	1,5
			363	0,225

тепловые характеристики некоторого характеристического РЭА при использовании обычных и улучшенных транзисторов.

Таблица 3.8

Транзисторы малой мощности с имеющимися и улучшенными тепловыми характеристиками

Тип транзистора	Имеющиеся тепловые характеристики		Улучшенные тепловые характеристики	
	$T_{\text{пп}}, \text{К}$	$R_{\text{ппв}}, \text{К/мВт}$	$T_{\text{пп}}, \text{К}$	$R_{\text{ппв}}, \text{К/мВт}$
ГТ109А	353	1,8	373	2,0
МГТ108А	353	0,8	353	0,67
1313А	358	0,43	373	0,4
МП20	358	0,33	373	0,45
1Т321А	358	0,25	373	0,27
МП25	348	0,2	373	0,3
ГТ320А	363	0,225	373	0,19

ных транзисторов. В качестве улучшенных транзисторов исследуем два вида. В первом случае будем предполагать, что имеются новые транзисторы с улучшенными тепловыми характеристиками. Во втором случае будем предполагать, что для получения транзисторов с улучшенными тепловыми характеристиками на заводах-изготовителях используется сортировка выпускаемых транзисторов по тепловым сопротивлениям. В табл. 3.7, 3.8 представлены данные исследований последних лет, которые позволяют прогнозировать возможности улучшения тепловых характеристик транзисторов.

Во втором случае имеется в виду внедрение в практику сравнительно простого мероприятия по сортировке транзисторов для получения улучшенных модификаций. Поясним метод сортировки более подробно. Современный технологический процесс массового производства не позволяет получить транзисторы с высокостабильными значениями $R_{\text{ппк}}$. Анализ опытных данных показывает, что разброс значений теплового сопротивления $R_{\text{ппк}}$ достигает 1:2—1:5, а в некоторых случаях соотношение между максимальным и минимальным значениями $R_{\text{ппк}}$ со-

ставляет 1 : 10. Разброс значений сопротивления отражает современный уровень технологического процесса, на который влияет большое число факторов. При нормальном распределении величины теплового сопротивления $R_{\text{пк}}$ наибольшее значение основной ошибки с высокой вероятностью равняется утроенному значению среднеквадратического отклонения σ , т. е. $\bar{R} \pm 3\sigma = R_{\text{max}}$. Причем можно считать, что значения теплового сопротивления, обычно приводимые в справочном материале, являются максимальными. Кривая нормального распределения $R_{\text{пк}}$ приведена на рис. 3.12: $M(R_{\text{пк}}) = 0,5R_{\text{max}}$; $\sigma = 0,17R_{\text{max}}$.

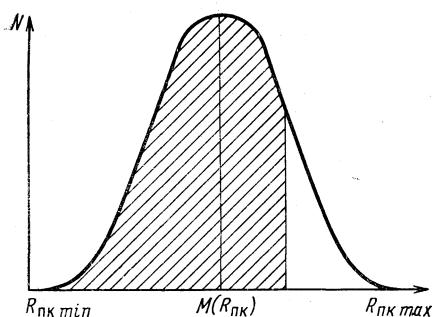


Рис. 3.12. Распределение внутреннего сопротивления для группы транзисторов.

ограниченной сверху значением сопротивления $R_{\text{пк2max}}$ (рис. 3.12). Зададимся максимальным значением сопротивления в виде $R_{\text{пк2max}} =$

$$= \frac{2}{3} R_{\text{пк, max}}.$$

Можно определить часть площади, ограниченную этим новым сопротивлением с помощью нормированной функции Лапласа $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t/2} dt$. В [12] приводится таблица для функции $\Phi(t)$.

В нашем случае формула для определения t выглядит следующим образом: $t = (R_{\text{пк2max}} - R_{\text{пк}})/\sigma$. После подстановки величин, входящих в формулу, получаем $t = 0,485$, по таблице [12] находим значение $\Phi(t) = 0,1862$, т. е. 18,62% — это площадь, ограниченная, с одной стороны, средним значением сопротивления $\bar{R}_{\text{пк}}$, а с другой стороны, максимальным значением сопротивления $R_{\text{пк2max}}$. Так как $\bar{R}_{\text{пк}}$ делит всю площадь пополам, то для определения площади заштрихованной части кривой нужно к половине всей площади прибавить вычисленную $S = 50\% + 18,62\% = 68,62\%$, т. е. операцией сортировки вся партия транзисторов делится на две группы; группа со значениями $R_{\text{пк}}$ меньшими, чем $R_{\text{пк2max}}$, представляет собой модификацию транзисторов с улучшенными характеристиками и составляет 68,62% от общего количества, поступающего на сортировку. Если внедрить в практику установки для экспрессного определения значений $R_{\text{пк}}$, то можно отсортировать транзисторы с меньшими значениями $R_{\text{пк}}$ и выпустить их на рынок как модификацию транзисторов с улучшенными тепловыми характеристиками.

Для исследования влияния тепловых характеристик транзисторов на тепловой режим РЭА зададимся конкретными блоками со следующими данными при естественном охлаждении: герметичный блок (№ 1) — $T_c = 298$ К, $T_3 = 326$ К, $P = 160$ Вт, $V = 0,125$ м³; перфорированный блок (№ 2) — то же, что и блок № 1, но $T_3 = 311$ К; герметичный блок (№ 3) — $T_c = 298$ К, $T_3 = 336,2$ К, $P = 36$ Вт, $V = 0,008$ м³.

Первые два блока используем для исследования транзисторов большой и средней мощности, последний блок — для транзисторов малой мощности. Исследуем влияние выпускаемых в настоящее время транзисторов на тепловой режим этих блоков при каталожных и улучшенных значениях тепловых характеристик транзисторов, причем будем считать, что именно транзистор ограничивает тепловой режим РЭА.

Поскольку мы выбрали для исследования блоки РЭА с естественным охлаждением, применение транзисторов с улучшенными характеристиками должно следующим образом влиять на характеристики РЭА:

а) в блоке тех же габаритов может быть смонтирована схема, рассеивающая большую мощность;

б) схема, рассеивающая ту же мощность, может быть смонтирована в блоке меньшего габарита;

в) если оставить без изменения рассеиваемую мощность и габариты блока, то увеличится надежность транзистора, а следовательно, и всего блока.

В соответствии с этим введем три коэффициента для иллюстрации влияния характеристик транзисторов на тепловой режим блока.

Увеличение рассеиваемой мощности в блоке будем оценивать коэффициентом

$$L_a = P_1/P, \quad (3.31)$$

где P — рассеиваемая мощность аппарата при использовании обычного транзистора; P_1 — то же, но при использовании транзистора с улучшенными характеристиками. Поскольку мощности P и P_1 рассчитываются для блоков одинаковых габаритов, то можно пользоваться удельными мощностями, т. е. выражения (3.25) и (3.31) идентичны.

Уменьшение габарита блока будем учитывать коэффициентом

$$N_a = V/V_1, \quad (3.32)$$

где V_1 , V — объем блока при использовании транзисторов с улучшенными и обычными характеристиками соответственно.

Увеличение надежности будем учитывать коэффициентом

$$M_a = \lambda/\lambda_1, \quad (3.33)$$

где λ и λ_1 — интенсивность отказов транзисторов с обычными и улучшенными характеристиками.

Необходимо сделать несколько замечаний о физическом смысле этих коэффициентов. Объем (масса) и максимально допустимая рассеиваемая мощность РЭА зависят главным образом от двух факторов: установочных размеров (массы) элементов и теплового режима РЭА.

Коэффициенты в (3.31) и (3.32) показывают, во сколько раз можно увеличить рассеиваемую мощность при неизменном объеме либо уменьшить объем при неизменной рассеиваемой мощности блока, улучшив тепловой режим РЭА. При этом конструктивные возможности РЭА не учитываются. Значит, эти коэффициенты отражают только одну сторону вопроса конструирования РЭА; будем называть их условным увеличением рассеиваемой мощности и уменьшением объема аппаратуры. Анализ результатов расчетов тепловых режимов РЭА при использовании транзисторов с обычными и улучшенными по табл. 3.5 и 3.6 характеристиками для блоков 1, 2 и 3 показывает, что освоение лучших по

тепловым характеристикам образцов транзисторов позволит либо увеличить удельную рассеиваемую мощность в 2,5—5 раз, либо уменьшить объем РЭА в 4—10 раз, либо увеличить надежность транзисторов в 1,5—1,6 раза. Следует помнить, что эти цифры получены без учета конструктивных возможностей по уплотнению монтажа РЭА.

Анализ результатов расчетов тепловых режимов РЭА при использовании отсортированных транзисторов с лучшими тепловыми характеристиками показывает, что внедрение сравнительно простого мероприятия по сортировке транзисторов позволит либо увеличить удельную рассеиваемую мощность в 2,2—2,3 раза, либо уменьшить объем РЭА в 3,5—3,8 раза, либо увеличить надежность транзисторов в 1,15—1,2 раза. К сожалению, сортировка транзисторов по тепловым сопротивлениям не находит пока применения из-за значительного удорожания вследствие отсутствия сортировочных автоматов.

Интересно оценить, какие результаты получены разработчиками транзисторов по улучшению их тепловых характеристик при использовании для $p-n$ -переходов материалов, допускающих более высокие температуры. Сравним тепловые режимы конкретных РЭА при использовании аналогичных по электрическим характеристикам транзисторов, но с разными $p-n$ -переходами — германиевыми и кремниевыми, и выполним расчеты тепловых режимов блоков 1 и 2 (данные этих блоков приведены выше) при использовании германиевого транзистора и его электрического аналога — транзистора с кремниевым $p-n$ -переходом.

Анализ этих результатов показывает, что применение транзистора с кремниевым $p-n$ -переходом позволяет незначительно увеличить условную удельную рассеиваемую мощность, а в некоторых случаях применение кремниевого транзистора вместо германиевого вообще не приводит к улучшению тепловых характеристик РЭА. Следовательно, использование в конкретном РЭА кремниевого транзистора вместо германиевого с точки зрения теплового режима РЭА дает незначительные результаты. Это, на наш взгляд, объясняется тем, что разработчики транзисторов не уделяют достаточного внимания снижению тепловых сопротивлений вновь разрабатываемых транзисторов.

3.3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА МИКРОМИНИАТЮРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В современной микроминиатюрной РЭА находят применение различные интегральные микросхемы (ИМС): полупроводниковые, пленочные, гибридные. В последнее время начали использоваться большие интегральные гибридные микросхемы. Методы расчета теплового режима полупроводниковых интегральных микросхем подробно изложены в [43—45].

Одним из наиболее распространенных элементов современной микроминиатюрной РЭА являются гибридные интегральные микросхемы (ГИС). Развитие гибридной технологии характеризуется повышением степени интеграции и плотности монтажа. Наиболее перспективным направлением в настоящее время является разработка ГИС с высокой степенью интеграции — больших гибридных интегральных микросхем.

Методам расчета теплового режима ГИС посвящен данный параграф. Проектирование РЭА на ИМС производится по функционально-

узловому методу [2]: электрическая схема устройства разбивается на части, конструктивно выполняемые в виде ИМС, которые впоследствии соединяются между собой в функционально законченные блоки. При этом должна быть обеспечена защита ИМС от климатических и механических воздействий. Защита может осуществляться для каждой ИМС отдельно или поблочно. ГИС выпускаются в основном с индивидуальной защитой.

Существующие ГИС подразделяются на корпусные и бескорпусные. Герметизация корпусных ГИС выполняется в трех вариантах: 1) в металлическом корпусе сваркой или пайкой (металлостеклянные корпуса), 2) в металлическом корпусе при помощи компаунда (металлополимерные корпуса), 3) в неметаллических корпусах (полимерных, керамических и др.). Бескорпусные ГИС могут быть выполнены заливкой

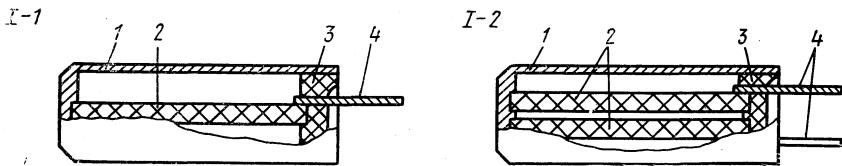


Рис. 3.13. Конструкции ГИС первой группы:
1 — корпус; 2 — подложка; 3 — компаунд; 4 — выводы.

компаундом, покрытием лакокрасочными материалами, обволакиванием. В отечественной практике для защиты ГИС широко применяются металлостеклянные и металлополимерные корпуса. Другие виды корпусов и бескорпусные конструкции применяются реже (несмотря на их сравнительно небольшую стоимость и малый вес), так как они не обеспечивают достаточно надежной защиты.

Рассмотрим конструкции ГИС в корпусе. В этом случае конструкция ГИС состоит из корпуса, подложки и материала (клей или компаунда), прикрепляющего подложку к корпусу (рис. 3.13 и 3.14).

Корпуса ГИС изготавливаются из металлов, сплавов, керамики и полимерных материалов. Наиболее широкое распространение получили ковар (коэффициент теплопроводности $\lambda = 15-21 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$) и пластмассы ($\lambda = 0,2-1 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$) [46].

Подложки ГИС имеют толщину $(0,5-0,6) \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Допускается применение подложек толщиной до $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, но эти типоразмеры не нашли широкого применения.

Компаунды и клеи на основе эпоксидных смол, получившие наибольшее распространение в мировой практике, имеют низкий коэффициент теплопроводности ($0,25-0,4 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$). Для улучшения теплопроводности в компаунды и клеи вводят специальные наполнители. Использование пылевидного кварца в качестве такого наполнителя позволяет увеличить коэффициент теплопроводности до $0,5-0,8 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$, а применение пылевидного кремния — до $1,9-2,4 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$.

Конструктивные и теплофизические параметры корпуса, подложки, компаундов во многом определяют интенсивность теплообмена между элементами и наружной поверхностью ГИС. Этот теплообмен осуществляется преимущественной кондукцией. Одним из важнейших факторов, определяющих кондуктивный теплообмен в ГИС, является местоположение теплового контакта подложка — корпус. По этому фактору

целесообразно разделить конструкции ГИС на две группы. К первой группе отнесем такие конструкции ГИС (рис. 3.13), в которых кондуктивный теплообмен осуществляется с нескольких или всех торцов подложки (под торцами понимаются все четыре грани меньшей поверхности). Однако эти конструкции почти не применяются, в связи с чем мы их в дальнейшем рассматривать не будем.

Ко второй группе отнесем такие конструкции ГИС (рис. 3.14), в которых кондуктивный теплообмен осуществляется с одной или обеих больших поверхностей подложки в любой комбинации с торцами. В этой группе выделим четыре типа конструкций: тип II-1 — конструкции с «корпусом — подложкой»; тип II-2 — металлополимерные конструк-

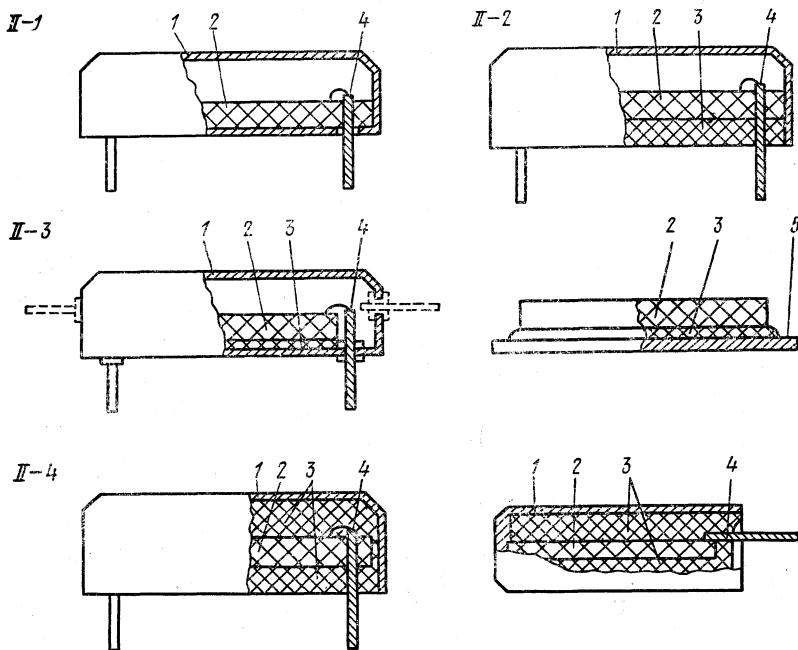


Рис. 3.14. Конструкции ГИС второй группы:

1 — корпус; 2 — подложка; 3 — клей (компаунд); 4 — выводы; 5 — теплоотводящая шина.

ции (компаунд используется только для герметизации выводов); тип II-3 — металлокерамические и бескорпусные конструкции (подложка приклеивается к основанию корпуса или к теплоотводящей шине); тип II-4 — металлополимерные и металлокерамические конструкции (внутренний объем залит компаундом).

ГИС рассматриваемой группы (рис. 3.14) характеризуются прямоугольной многослойной структурой. Конструкции типа II-1 можно рассматривать как частный случай конструкций типа II-2 или II-3 при нулевой толщине слоя компаунда (клея). Расчет теплового режима залитых ГИС типа II-4 также может быть сведен к расчету конструкций типа II-2 или II-3. Таким образом, конструкции типа II-2 и II-3 являются основными с точки зрения тепловых режимов. Ниже рассматриваются эти два типа конструкций ГИС.

При выборе тепловой модели ГИС примем следующие допущения:

1. Влиянием теплопроводности и толщины Δ_3 тонких пленок на температурное поле ГИС можно пренебречь. Пленочные тепловыделяющие элементы заменяются плоскими ($\Delta_3 \rightarrow 0$) источниками тепла. Такие допущения являются правомерными, так как тонкопленочные элементы имеют толщину от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ м, что на 3—7 порядков меньше толщины подложки и, следовательно, теплопроводность подложки с учетом пленки будет отличаться от теплопроводности без учета пленки меньше чем на 1%.

2. Навесные тепловыделяющие элементы заменяются плоскими источниками тепла с той же мощностью рассеивания с учетом дополнительного теплового сопротивления между критической зоной элемента (например, p — n -переходом) и поверхностью подложки.

3. Корпус (основание) ГИС изотермичен.

4. Влиянием выводов на избыточное температурное поле (относительно температуры корпуса) ГИС можно пренебречь.

При планарном расположении, а в некоторых случаях и при торцевом (вертикальном) выводы ГИС не имеют непосредственного контакта с подложкой (рис. 3.13, 3.14). Тепловые сопротивления золотых проводников (диаметр $0,03 \cdot 10^{-3}$ м, длина более 2×10^{-3} м), с помощью которых осуществляется коммутация, по своей величине (больше 1×10^4 К/Вт) значительно превышают тепловые сопротивления между элементами и корпусом ($0,1$ — $1,3 \cdot 10^3$ К/Вт), и по этой причине не могут приниматься во внимание.

Вертикальные (торцевые) выводы ГИС, как правило, имеют непосредственный контакт с подложкой. Однако, если размещение элементов ГИС вблизи выводов не допускается, то влияние последних на избыточное температурное поле (относительно температуры корпуса) неизначительно. Тогда общей тепловой моделью для конструкций ГИС типа II-2 и II-3 будет двухслойный прямоугольный параллелепипед, на одной из больших граней которого находятся плоские прямоугольные источники тепла (рис. 3.15).

При математической постановке задачи примем дополнительно:

1. Коэффициенты теплопроводности материалов подложки $\lambda_{\text{пп}}$ и компаунда (или клея) $\lambda_{\text{к}}$ постоянны в исследуемом диапазоне температур.

2. Теплоотдачей через газовую прослойку внутри ГИС можно пренебречь. Положим, что суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности подложки равен нулю ($\alpha=0$).

Влияние теплоотдачи через газовую прослойку на тепловой режим ГИС может быть оценено с помощью электромоделирования. Исследование, например, конструкции типа II-3 (ситалл — $0,6 \cdot 10^{-3}$ м, клей — $0,1 \cdot 10^{-3}$ м) при $\alpha=14$ Вт/м·К показало, что перегрев элементов уменьшился менее чем на 0,5% по сравнению со случаем, когда $\alpha=0$.

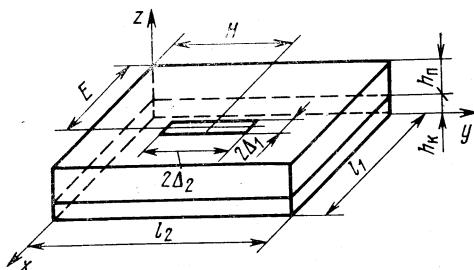


Рис. 3.15. Термическая модель ГИС:
2 Δ_1 , 2 Δ_2 — размеры источника тепла; l_1 , l_2 — размеры подложки; E, H — координаты центра источника тепла; $h_{\text{пп}}$ — толщина подложки; $h_{\text{к}}$ — толщина слоя компаунда (или клея).

Решение поставленной задачи будем искать, используя метод суперпозиции. При этом температурное поле на поверхности подложки определяется как суперпозиция температурных полей, создаваемых элементами ГИС (прямоугольными плоскими источниками тепла).

Температурное поле, создаваемое прямоугольным источником тепла, определяется системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \vartheta^{(1)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta^{(1)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta^{(1)}}{\partial z^2} &= 0, \\ \frac{\partial^2 \vartheta^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta^{(2)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta^{(2)}}{\partial z^2} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

$$\vartheta^{(1)}|_{z=h_K} = \vartheta^{(2)}|_{z=h_K}, \quad \lambda_n \frac{\partial \vartheta^{(1)}}{\partial z}|_{z=h_K} = \lambda_K \frac{\partial \vartheta^{(2)}}{\partial z}|_{z=h_K}$$

с граничными условиями:

а) для конструкции типа II-3

$$\frac{\partial \vartheta^{(1)}}{\partial z}|_{z=h} = \begin{cases} -\frac{W}{\lambda_n} & \text{при } E - \Delta_1 \leq x \leq E + \Delta_1, H - \Delta_2 \leq y \leq H + \Delta_2, \\ 0 & \text{во всей остальной области;} \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\vartheta^{(2)}|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta^{(i)}}{\partial x}|_{x=0} = \frac{\partial \vartheta^{(i)}}{\partial y}|_{y=0} = 0, \quad i = 1, 2;$$

б) для конструкций типа II-2

$$\frac{\partial \vartheta^{(1)}}{\partial z}|_{z=h} = \begin{cases} -\frac{W}{\lambda_n} & \text{при } E - \Delta_1 \leq x \leq E + \Delta_1, H - \Delta_2 \leq y \leq H + \Delta_2, \\ 0 & \text{во всей остальной области;} \end{cases} \quad (3.36)$$

$$\vartheta^{(2)}|_{z=0} = \vartheta^{(i)}|_{x=0} = \vartheta^{(i)}|_{y=0} = 0, \quad i = 1, 2;$$

где $\vartheta^{(1)} = T^{(1)} - T_K$; $\vartheta^{(2)} = T^{(2)} - T_K$; $T^{(1)}$, $T^{(2)}$ — текущие температуры; T_K — температура корпуса (основания) ГИС; W — поверхностная плотность тепловыделений, для прямоугольного источника тепла $W = P/4\Delta_1\Delta_2$; P — мощность, рассеиваемая в источнике тепла; $h = h_n + h_K$. Обозначения геометрических параметров приведены на рис. 3.15.

Система уравнений (3.34) с граничными условиями (3.35) является частным случаем более общей задачи определения температурного поля в двухслойном параллелепипеде при $a \neq 0$ и $\Delta_3 \neq 0$.

Учитывая, что размеры источника тепла намного меньше размеров подложки, выражение для расчета температурного поля, создаваемого плоским источником тепла на поверхности подложки ($z=h$), для конструкций ГИС типа II-3, имеет вид

$$\vartheta(x', y') = c_1 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{th} \Gamma_{mn} h_K + s_1 \operatorname{th} \Gamma_{mn} h_n}{m n \Gamma_{mn} (s_1 + \operatorname{th} \Gamma_{mn} h_K \operatorname{th} \Gamma_{mn} h_n)} \sin m \delta'_1 \sin n \delta'_2 \cos m x' \times$$

$$\times \cos n y' \cos m \varepsilon \cos n \eta, \quad (3.37)$$

где

$$c_1 = 16W/\pi^2\lambda_0; \quad \delta'_1 = \pi\Delta_1/l_1; \quad \delta'_2 = \pi\Delta_2/l_2; \quad s_1 = \lambda_K/\lambda_{\Pi};$$

$$x' = \pi X/l_1; \quad y' = \pi Y/l_2; \quad \Gamma_{mn} = \sqrt{(m\pi/l_1)^2 + (n\pi/l_2)^2};$$

$$\varepsilon = \pi E/l_1; \quad \eta = \pi H/l_2.$$

Решение системы уравнений (3.34) с граничными условиями (3.36) имеет вид

$$\vartheta(x', y') = c_1 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{th} \Gamma_{mn} h_K + s_1 \operatorname{th} \Gamma_{mn} h_{\Pi}}{mn \Gamma_{mn} (s_1 + \operatorname{th} \Gamma_{mn} h_K \operatorname{th} \Gamma_{mn} h_{\Pi})} \sin m\delta'_1 \sin n\delta'_2 \sin n' \times$$

$$\times \sin ny' \sin mx \sin \eta. \quad (3.38)$$

При практическом использовании выражений (3.37) и (3.38) возникают затруднения, так как расчет двойных тригонометрических рядов с малой сходимостью очень трудоемок.

Для упрощения расчетных соотношений в соответствии с правилами решения уравнения теплопроводности в симметричных областях перейдем от задачи по определению температурного поля в параллелепипеде к задаче по определению температурного поля в пластине. Температурное поле в пластине, эквивалентное температурному полю в параллелепипеде, создается при граничных условиях (3.35) совместным действием источников (рис. 3.16, б), а при граничных условиях (3.36) — совместным действием стоков и источников (рис. 3.16, а), расположенных симметрично относительно границ параллелепипеда и зеркальных отражений этих границ.

Выбрав в качестве исходного выражение (3.37), произведя в нем замену координат $x_0 = x' - 0,5l$; $y_0 = y' - 0,5l$ и положив $\varepsilon = \eta = 0,5l$, получим

$$\vartheta(x_0, y_0) = \frac{c_1}{8} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{th} 2\Gamma_{mn} h_K + s_1 \operatorname{th} 2\Gamma_{mn} h_{\Pi}}{mn \Gamma_{mn} (s_1 + \operatorname{th} 2\Gamma_{mn} h_K \operatorname{th} \Gamma_{mn} h_{\Pi})} \sin 2m\delta'_1 \sin 2n\delta'_2 \times$$

$$\times \cos 2mx_0 \cos 2ny_0. \quad (3.39)$$

Выражение (3.39) описывает температурное поле на поверхности двухслойного параллелепипеда, создаваемое плоским источником тепла, центр которого совпадает с центром параллелепипеда и началом координат.

Выполнив в (3.39) предельный переход

$$\lim_{\substack{l_1 \rightarrow \infty \\ l_2 \rightarrow \infty}} \vartheta(x_0, y_0) = \frac{c_1}{8} \lim_{\substack{l_1 \rightarrow \infty \\ l_2 \rightarrow \infty}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\operatorname{th} 2\Gamma_{mn} h_K + s_1 \operatorname{th} 2\Gamma_{mn} h_{\Pi}}{mn \Gamma_{mn} (s_1 + \operatorname{th} 2\Gamma_{mn} h_K \operatorname{th} 2\Gamma_{mn} h_{\Pi})} \times$$

$$\times \sin 2\Delta_1 \varphi \sin 2\Delta_2 \varphi \cos 2X_0 \varphi \cos 2Y_0 \varphi =$$

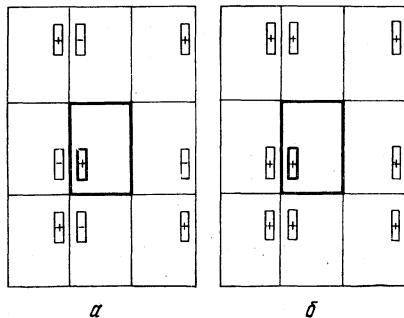


Рис. 3.16. Схематизация ГИС.
Плюс соответствует источнику, минус — стоку тепла.

$$= \frac{c_1}{8} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\operatorname{th} 2\Gamma_{uv} h_{\text{K}} + s_1 \operatorname{th} 2\Gamma_{uv} h_{\text{n}}}{UV \Gamma_{uv} (s_1 + \operatorname{th} 2\Gamma_{uv} h_{\text{K}} \operatorname{th} 2\Gamma_{uv} h_{\text{n}})} \sin 2U\Delta_1 \sin 2V\Delta_2 \cos 2UX_0 \times \\ \times \cos 2VY_0 dU dV, \quad (3.40)$$

где

$$X_0 = x_0 l_1 / \pi = x - 0,5l_1; \quad \varphi = m\pi / l_1; \\ \Gamma_{mn} = \sqrt{\varphi^2 + \psi^2}; \quad Y_0 = y_0 l_2 / \pi = y - 0,5l_2; \\ \psi = n\pi / l_2; \quad \Gamma_{uv} = \sqrt{U^2 + V^2},$$

и произведя в (3.40) замену переменных $u = 2hU$, $v = 2hV$, получим выражение для расчета температурного поля, создаваемого плоским прямоугольным источником тепла на поверхности двухслойной пластины:

$$\vartheta(x, y) = c_2 \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} + s_1 \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}}{uv \gamma_{uv} [s_1 + \operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}]} \times \\ \times \sin u\delta_1 \sin v\delta_2 \cos ux \cos vy dudv, \quad (3.41)$$

где

$$c_2 = c_1 h / 4 = 4Wh / \pi^2 \lambda_{\text{n}}; \quad s_2 = h_{\text{K}} / h; \\ \gamma_{uv} = \sqrt{u^2 + v^2}; \quad \delta_1 = \Delta_1 / h; \quad \delta_2 = \Delta_2 / h; \\ x = X_0 / x; \quad y = Y_0 / h.$$

Выражение (3.41) представим в виде

$$\vartheta(x, y) = r_{\text{T}} W \frac{4a_s}{\pi^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} + s_1 \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}}{uv \gamma_{uv} [s_1 + \operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}]} \times \\ \times \sin u\delta_1 \sin v\delta_2 \cos ux \cos vy dudv, \quad (3.42)$$

где r_{T} — полное термическое сопротивление двухслойной стенки (пластины),

$$r_{\text{T}} = h_{\text{n}} / \lambda_{\text{n}} + h_{\text{K}} / \lambda_{\text{K}} = h / \lambda_{\text{n}} a_s; \quad a_s = s_1 / (s_1 + s_2 - s_1 s_2). \quad (3.43)$$

Определив из (3.42) температуру центра источника $\vartheta_{\text{ц}}$ ($x = 0$, $y = 0$), получим

$$\vartheta_{\text{ц}} = r_{\text{T}} W \frac{4a_s}{\pi^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} + s_1 \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}}{uv \gamma_{uv} [s_1 + \operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}]} \sin u\delta_1 \sin v\delta_2 dudv. \quad (3.44)$$

Обозначим

$$\Upsilon(s_1, s_2, q, r) = \frac{4a_s}{\pi^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} + s_1 \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}}{uv \gamma_{uv} [s_1 + \operatorname{th} s_2 \gamma_{uv} \operatorname{th} (1 - s_2) \gamma_{uv}]} \sin uq \sin vr dudv. \quad (3.45)$$

Тогда (3.37), (3.38) можно записать в виде

$$\vartheta_{\text{ц}} = r_{\text{T}} W \Upsilon(s_1, s_2, \delta_1, \delta_2). \quad (3.46)$$

В частном случае для изотропной пластины $s_1 = 1$; $a_s = 1$; $r_{\text{T}} = r_{\text{T}}^0 = h_{\text{n}} / \lambda_{\text{n}}$ и Υ -функция принимает вид

$$\Upsilon(s_1, s_2, q, r)|_{s_1=1} = \Upsilon^0(q, r) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\operatorname{th} \gamma_{uv} \sin vr}{uv \gamma_{uv}} dudv; \quad (3.47)$$

$$\Upsilon_1(s_1, s_2, q)|_{s_1=1} = \Upsilon^0(q) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\operatorname{th} u \sin uq}{u^2} du. \quad (3.48)$$

Температурное поле на поверхности двухслойной пластины можно приближенно представить как температурное поле изотропной пластины при соответствующем преобразовании масштаба переменных. Используя для этой цели соотношения

$$X^0 = X \sqrt{\lambda/\lambda_x}; \quad Y^0 = Y \sqrt{\lambda/\lambda_y}; \quad h^0 = h \sqrt{\lambda/\lambda_z},$$

где 0 — индекс, относящийся к изотропной пластине; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ — коэффициенты теплопроводности по осям координат; λ — приведенный коэффициент теплопроводности. Примем

$$\lambda = \lambda_z = \frac{h}{(h_n/\lambda_n) + (h_k/\lambda_k)} = \frac{h}{r_t}.$$

Тогда

$$X^0 = X K_L; \quad Y^0 = Y K_L; \quad h^0 = h, \quad (3.49)$$

где

$$K_L = h \left[\sqrt{h_n^2 + h_k^2 + h_n h_k (\lambda_n/\lambda_k + \lambda_k/\lambda_n)} \right]^{-1/2}. \quad (3.50)$$

С учетом (3.48) выражение (3.42) можно представить в виде

$$\vartheta(x, y) \approx \vartheta(x^0, y^0) = \vartheta_m \theta(x^0, y^0) = \frac{\vartheta}{4} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(q_m r_n) \Upsilon^0(K_L |q_m|, K_L |r_n|). \quad (3.51)$$

Из (3.51) следует, что погрешности в расчете безразмерного температурного поля, возникающие при замене двухслойной пластины изотропной, не превышают абсолютной погрешности аппроксимации функции $\Upsilon(q, r)$ функцией $\Upsilon^0(K_L, q, K_L r)$ $|\Delta\vartheta(x, y)| \leq \Delta_r$. При значениях параметров $s_1=0,1-1, s_2=0,5-0,8$, характерном для конструкций типа II-2, погрешность аппроксимации функции $\Upsilon(q, r)$ функцией $\Upsilon^0(K_L, q, K_L r)$ находится в области $[-0,23; 0]$. Для конструкций типа II-3, у которых $s_1=0,1-1, s_2=0,1-0,25, \Delta_r \leq [-0,19, 0]$.

Для конструкций типа II-3 вместо (3.50) рекомендуется использовать экспериментально подобранное выражение

$$K_L = h \left/ \left(h_n + h_k \frac{\lambda_n}{\lambda_k} \right) \right. \quad (3.52)$$

В этом случае $\Delta_r \leq [0; 0,11]$, а для распространенной конструкции ГИС (ситалловая подложка $0,6 \cdot 10^{-3}$ м, эпоксидный клей $0,1 \cdot 10^{-3}$ м, $s_1=0,2; s_2=0,15$) $\Delta_r \leq [0; 0,07]$.

Погрешность аппроксимации Υ -функции Δ_r зависит от значений параметров s_1, s_2, q и r . Оценка среднеквадратичной погрешности аппроксимации σ_r , взятая по 200 точкам при $s_1 \in [0,1; 1], s_2 \in [0,1; 0,25], [0,5; 0,8]$ в практически используемой области изменения переменных $q, r \in [0,4]$, показала, что $\sigma \approx 0,28 \Delta_r$.

Таким образом, на основании проведенной оценки среднеквадратичной погрешности аппроксимации можно сделать вывод о незначительной зависимости качественной картины температурного поля от значений параметров s_1 и s_2 .

На основании анализа температурных полей, создаваемых одиночным источником тепла, примем следующие правила расчета.

1. Назовем зоной влияния элемента, окружающую этот элемент, часть поверхности подложки, за пределами которой перегревы, создаваемые рассматриваемым элементом, не превышают некоторой достаточно малой наперед заданной величины и могут не приниматься во внимание.

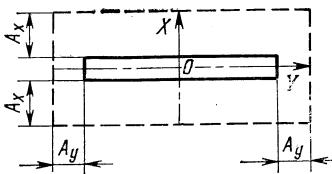


Рис. 3.17. Схема прямоугольной зоны влияния.

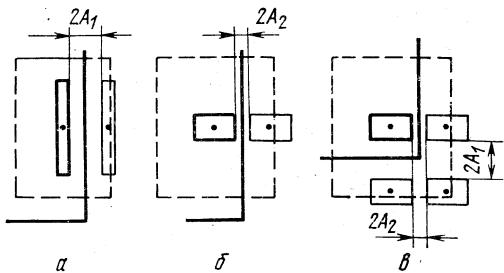


Рис. 3.18. Схемы расположения источников и стоков.

Для упрощения геометрических построений установим прямоугольную форму зон влияния (рис. 3.17).

2. Перегрев тепловыделяющего (i -го) элемента ГИС ϑ'_{ii} , вызванный действием выделяемой в нем мощности, характеризуется температурой в центре элемента

$$\vartheta'_{ii} = \vartheta_{ni} + \vartheta_{ii} = \vartheta_{mi} \Upsilon(K_L \delta_{1i}, K_L \delta_{2i}) + \vartheta_{ii}, \quad (3.53)$$

где ϑ_{ii} — величина, определяемая влиянием размеров подложки l_1 и l_2 на температурное поле источника.

Величина ϑ_{ii} определяется по формулам:

— если $A_1 \leq (A_x - \Delta_1)/2$ (рис. 3.18, а), тогда

$$\vartheta_{ii} = \pm 0,5 \vartheta_{mi} \sum_{m=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{mi}) \Upsilon(|q'_{mi}|, K_L \delta_{2i}), \quad (3.54)$$

где $q'_{mi} = K_L [\delta_{1i} + (-1)^{m+1} (2a_{1i} + 2\delta_{1i})]$;

— если $A_2 \leq (A_y - \Delta_2)/2$ (рис. 3.18, б), тогда

$$\vartheta_{ii} = \pm 0,5 \vartheta_{mi} \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(r'_{ni}) \Upsilon(K_L \delta_{1i}, |r'_{ni}|), \quad (3.55)$$

где $r'_{ni} = K_L [\delta_{2i} + (-1)^{n+1} (2a_{2i} + 2\delta_{2i})]$;

— если $A_1 \leq (A_x - \Delta_1)/2$ и $A_2 \leq (A_y - \Delta_2)/2$ (рис. 3.18, в), тогда

$$\begin{aligned} \vartheta_{ii} = 0,5 \vartheta_{mi} & \left[\pm \sum_{m=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{mi}) \Upsilon(|q'_{mi}|, K_L \delta_{2i}) \pm \right. \\ & \left. \pm \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(r'_{ni}) \Upsilon(K_L \delta_{1i}, |r'_{ni}|) + 0,5 \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{mi} r'_{ni}) \Upsilon(|q'_{mi}|, |r'_{ni}|) \right]; \quad (3.56) \end{aligned}$$

— в остальных случаях $\vartheta_{ii}=0$.

Здесь $K_L=1$ для двухслойной модели ГИС, а для изотропной модели $K_L\neq 1$ и функция Υ заменяется функцией Υ^0 .

В формулах (3.53)–(3.55) плюс соответствует конструкции ГИС типа II-3, а минус — конструкции ГИС типа II-2. Но так как в современных конструкциях ГИС размещение элементов вблизи края подложки не допускается, то величина ϑ_{ii} незначительна и определять ее приходится в исключительных случаях.

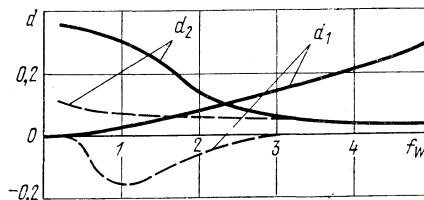
Были рассчитаны температурные поля, создаваемые взаимным действием двух произвольно расположенных источников тепла (элементов ГИС), в практически возможном диапазоне значений определяющих параметров

$$\delta_{xi}, \delta_{yi}=0,05-\infty; K_i, K_j=1-\infty;$$

$$f_w=W_i/W_j=0-\infty; x_{ij}, y_{ij}=0-\infty,$$

где i — индекс элемента, влияющего на j -й элемент; x_{ij}, y_{ij} — безразмерные координаты центра j -го элемента в системе координат i -го элемента.

Рис. 3.19. Зависимости погрешностей определения поля температур от относительной мощности источников.



В результате расчета определены: координаты и значения максимальных безразмерных температур на поверхности j -го элемента θ_{vtj} ; безразмерные температуры в центре j -го элемента θ_{vci} ; безразмерные температуры в ближайшей к центру j -го элемента точке (с координатами x_{kj}, y_{kj}), принадлежащей к области (границе) j -го элемента θ_{vck} ; погрешности $d_1=\theta_{vtj}-\theta_{vci}$ и $d_2=\theta_{vtj}-\theta_{vck}$, возникающие при замене θ_{vtj} на θ_{vci} и θ_{vck} . Установлено, что θ_{vtj} находится при $f_w \leq 1$ вблизи центра j -го элемента; при $f_w \geq 3$ — вблизи точки с координатами x_{kj}, y_{kj} ; при $1 < f_w < 3$ — вблизи прямой, соединяющей центр j -го элемента с точкой (x_{kj}, y_{kj}) .

Зависимости $d_1=f(f_w)$ и $d_2=f(f_w)$ приведены на рис. 3.19. Здесь же пунктиром показаны максимальные погрешности (обоих знаков), возникающие при использовании выражения

$$\theta_{vci} \approx \theta_{vck} + 0,88\theta_{vci}. \quad (3.57)$$

Из рисунка видно, что при $0 \leq f_w < 2$ величина d_1 относительно невелика, а при $f_w \geq 2$ лучшие результаты дает расчет по формуле (3.57). Погрешности в определении взаимовлияния зависят от большого числа переменных ($\delta_{xi}, \delta_{yi}, K_i, K_j, x_{ij}, y_{ij}$) и достигают своих максимальных значений в сравнительно узкой области (рис. 3.19). Оценка среднеквадратичной погрешности, взятая по 200 точкам, составляет 0,015 в области $0 \leq f_w < 2$ и 0,026 в области $2 \leq f_w \leq 5$. При $f_w > 5$ погрешности расчета по формуле (3.57) малы.

В заключение оговорим правила определения зон влияния теплоизделяющих элементов:

1. Для каждого i -го тепловыделяющего элемента определяются перегревы ϑ_{ij} , создаваемые им на остальных j -х элементах ГИС:

— центр j -го элемента входит в зону влияния i -го элемента и $f_w < 2$, тогда

$$\vartheta_{ij} = 0,25\vartheta_{mi} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(q_{mi}r_{ni}) \Upsilon(|q_{mi}|, |r_{ni}|), \quad (3.58)$$

где $q_{mi} = K_L [\delta_{1i} + (-1)^{m+1} |x_{ij}|]$; $r_{ni} = K_L [\delta_{2i} + (-1)^{n+1} |y_{ij}|]$;

— j -й элемент входит в зону влияния i -го элемента и $f_w \geq 2$, тогда

$$\vartheta_{ij} = 0,25\vartheta_{mi} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(q_{mi}r_{ni}) \Upsilon(|q_{mi}|, |r_{ni}|) - 0,12\vartheta_{ui}, \quad (3.59)$$

где $q_{mi} = K_L [\delta_{1i} + (-1)^{m+1} |x_{kj}|]$; $r_{ni} = K_L [\delta_{2i} + (-1)^{n+1} |y_{kj}|]$;

— в остальных случаях $\vartheta_{ij} = 0$.

Здесь $K_L = 1$ для двухслойной модели ГИС, для изотропной модели $K_L \neq 1$.

2. Для каждого j -го элемента ГИС определяется перегрев ϑ_{bj} , вызванный действием остальных элементов ГИС:

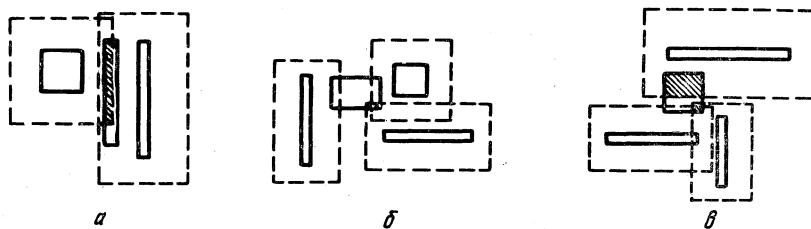


Рис. 3.20. Варианты наложения зон влияния. Заштрихованы зоны влияния группы элементов.

— центр j -го элемента входит в одну или несколько зон влияния группы i -х элементов, у которых $f_w < 2$ (рис. 3.20, а), или часть j -го элемента входит в зону влияния группы i -х элементов, у которых $f_w > 2$ (рис. 3.20, б), тогда за величину ϑ_{bj} принимается сумма ϑ_{ij} :

$$\vartheta_{bj} = \sum_{k=1}^m \vartheta_{ikj}, \quad (3.60)$$

где i_k — индекс влияющего элемента; m — количество влияющих элементов;

— различные части j -го элемента входят в зоны влияния нескольких групп i -х элементов (рис. 3.20, в), тогда для каждой части i -го элемента, входящей в зону влияния одной группы i -х элементов, определяется величина ϑ_{bj} по формуле (3.57) и наибольшее из этих значений принимается за величину ϑ_{bj} :

$$\vartheta_{bj} = \max \{\vartheta_{bj1}, \dots, \vartheta_{bjn}\}, \quad (3.61)$$

где n — количество зон влияния групп элементов;

— в остальных случаях $\vartheta_{bj} = 0$.

На основе предложенных правил расчета теплового режима ГИС составлена методика. Расчет тепловых режимов ГИС по этой методике производится в следующем порядке.

1. Определяются величины r_t и K_L :

— для конструкций ГИС (типа II-1), у которых подложка крепится к корпусу (основанию) методом стеклоспая или пайкой, $r_t = h_p/\lambda_p$, $K_L = 1$;

— для конструкций ГИС типа II-2 r_t из (3.43), K_L — из (3.50);

— для конструкций ГИС типа II-3, у которых подложка приклеивается к корпусу (основанию) r_t из (3.43), K_L — из (3.52).

2. Для каждого тепловыделяющего (i -го) элемента определяются величины

$$\delta_{1i} = l_{xi}/2h; \delta_{2i} = l_{yi}/2h;$$

$$K_W = W_i/W_{\max}; \vartheta_{mi} = r_t W_i,$$

где l_{xi} , l_{yi} — ширина и длина i -го элемента.

3. На топологическом чертеже в соответствии с рис. 3.17 строятся зоны влияния. Величины A_{xi} , A_{yi} определяются по формулам $A_{xi} = a_{xi}^0 h/K_L$, $A_{yi} = a_{yi}^0 h/K_L$, где a_{xi}^0 , a_{yi}^0 находятся по графику, приведенному на рис. 3.21.

4. Для каждого тепловыделяющего элемента по формуле (3.53) определяются перегревы ϑ'_i . Значения функции r^0 определяются по графикам, приведенным на рис. 3.22.

5. Для каждого тепловыделяющего элемента по формулам (3.58), (3.59) определяются перегревы ϑ_{ij} , создаваемые им на остальных j -х элементах ГИС.

6. Для каждого j -го элемента по формуле (3.60) определяется величина ϑ_{bj} .

7. Определяются температуры элементов ГИС T_j по формулам:

— для пленочных элементов

$$T_j = \vartheta'_i + \vartheta_{bj} + T_k; \quad (3.62)$$

— для навесных элементов

$$T_j = \vartheta'_i + \vartheta_{bj} + R_{t \text{ ви}} P_j + T_k. \quad (3.63)$$

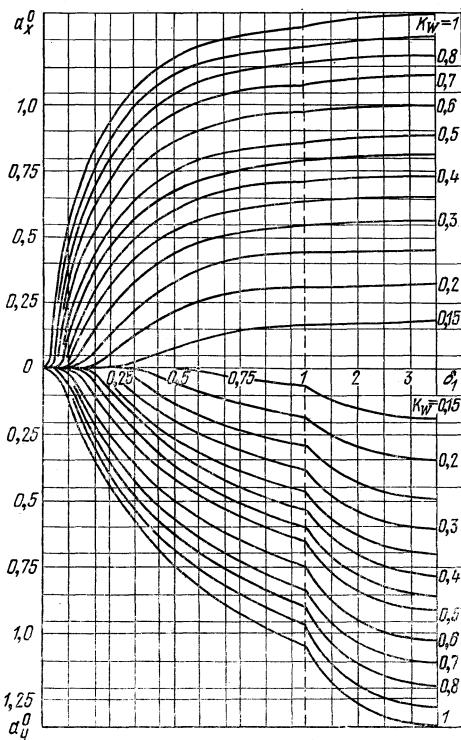
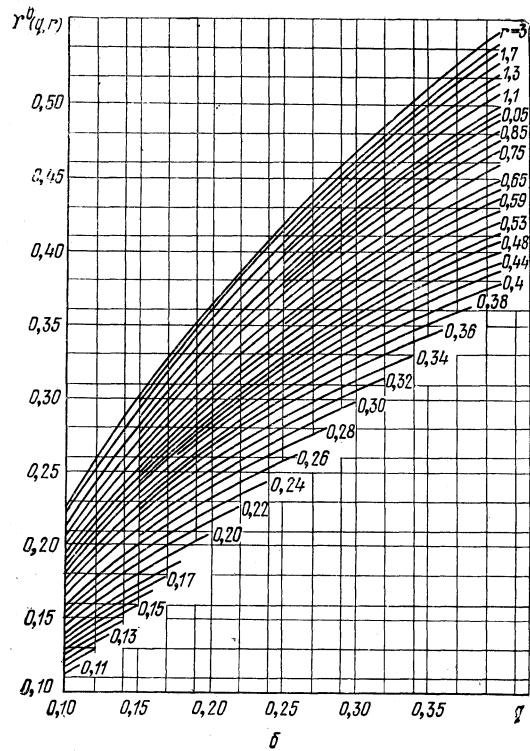
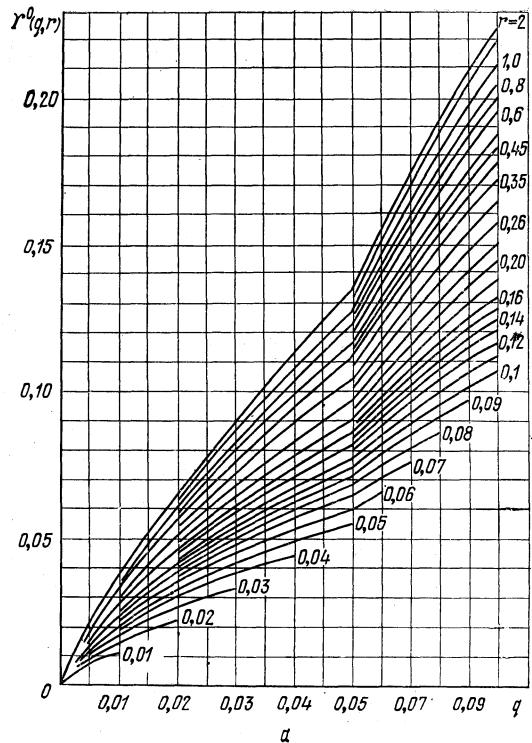


Рис. 3.21. Зависимость коэффициентов зон влияния от расположения и относительной мощности источников.

Пример. Рассчитаем тепловой режим микросхемы по указанной методике.

Исходные данные: конструкция металлокстеклянная; толщина подложки $h_p = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м; коэффициент теплопроводности материала подложки $\lambda_p = 15$ Вт/м·К;



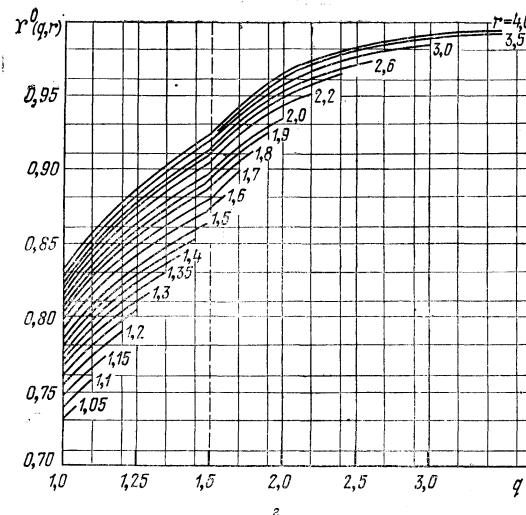
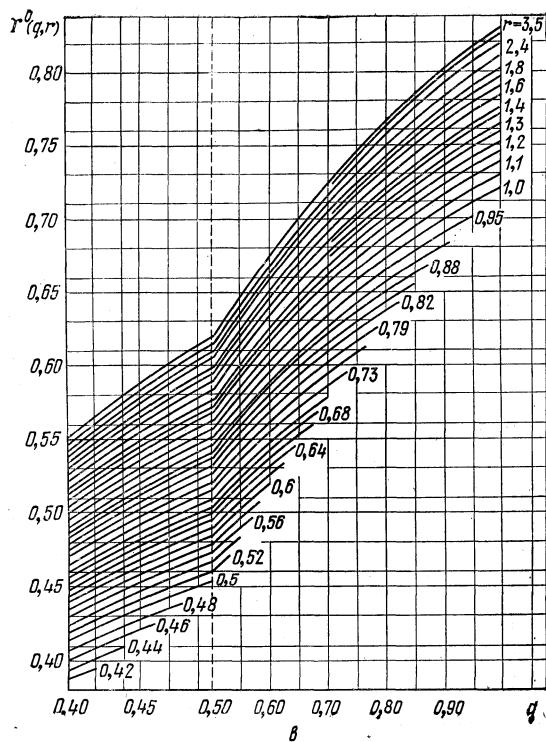


Рис. 3.22. Зависимость Y от q и r :
 а) $q=0-0,1$; б) $q=0,1-0,4$; в) $q=0,4-1,0$; г) $q=1,0-4,0$.

толщина слоя клея $h_k = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; коэффициент теплопроводности клея $\lambda_k = 0,3$ Вт/м·К; внутреннее тепловое сопротивление навесного элемента $R_{t, vi} = 800$ К/Вт. Топологический чертеж микросхемы приведен на рис. 3.23; геометрические размеры элементов и мощности, рассеиваемые ими, приведены в табл. 3.9.

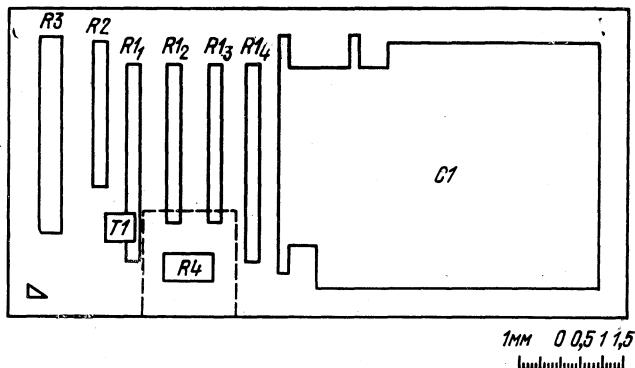


Рис. 3.23. Топологический чертеж микросхемы.

1. Определяются величины r_t и K_L по формулам (3.43) и (3.52)

$$r_t = \frac{0,6 \cdot 10^{-3}}{1,5} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт},$$

$$K_L = \frac{0,7}{0,6 + 0,1(1,5, 0,3)} = 0,636.$$

Таблица 3.9

Параметры микросхемы

Элементы	$T1$	$R1_1$	$R1_2$	$R1_3$	$R1_4$	$R2$	$R3$	$R4$	$C1$
$l_x \cdot 10^3$, м	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	6,5
$l_y \cdot 10^3$, м	0,7	5	4	4	5	3,7	5	1,2	7
$P \cdot 10^3$, Вт	2,7		0			0,18	2	31,6	0
$W \cdot 10^{-4}$ Вт/м ²	0,55		0			0,02	0,08	3,76	0

2. Производится расчет по пп. 2, 3, 4 методики (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Промежуточные результаты расчета теплового режима микросхемы

Элементы ГИС	Номер пункта по методике						
	2				3		4
	δ_1	δ_2	$K_{\text{ш}}$	ϑ_m , К	$A_x \cdot 10^3$, м	$A_y \cdot 10^3$, м	ϑ_t , К
$T1$	0,50	0,50	0,15	4	0,02	0,02	1,4
$R2$	0,21	2,64	0,004	0,12	0	0	0
$R3$	0,36	3,57	0,02	0,6	0	0	0,2
$R4$	0,50	0,86	1	27,4	1,1	0,55	10,6

3. На топологическом чертеже по вычисленным значениям A_x и A_y строятся зоны влияния для тепловыделяющих элементов.

В нашем случае ненулевую зону влияния практически имеет только элемент $R4$.

4. Определяются перегревы ϑ_{ij} , создаваемые $R4$ на элементах микросхемы, входящих в его зону влияния, по формуле (3.58). Результаты расчетов приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Результаты расчета промежуточных перегревов

i -й элемент	j -й элемент	f_W	$X_K \cdot 10^3$, м	$Y_K \cdot 10^3$, м	ϑ_{ij} , К
$T1$	$R1_1$	>2	0,15	0	1,2
	$R1_2$	>2	1,15	0,2	1,1
	$R1_3$	>2	1,15	0,5	1

5. Определяются температуры элементов ГИС:

$$T_{T1} = T_k + 1,4 + 0,0027 \cdot 800 = T_k + 3,6 \text{ К};$$

$$T_{R1_1} = T_k + 1,2 \text{ К}; T_{R1_2} = T_k + 1,1 \text{ К};$$

$$T_{R1_3} = T_k + 1 \text{ К}; T_{R3} = T_k + 0,2 \text{ К};$$

$$T_{R4} = T_k + 10,6 \text{ К}; T_{R1_4} = T_{R2} = T_{c1} = T_k.$$

Результаты расчета по точной методике отличаются от полученных результатов на величину не более 10%.

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАГРУЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА

В техническом задании на конструирование РЭА обычно задаются: принципиальная электрическая схема, электрические и другие параметры элементов, эксплуатационные требования. Разработчик, пользуясь этими исходными данными, должен выбрать конкретные типы элементов. При этом нередко оказывается, что различные типы элементов отвечают всем или большинству требований технического задания и разработчику необходима дополнительная система правил для выбора конкретного типа элемента. Кроме того, однотипные элементы могут иметь различную номинальную мощность (конечно, большую заданной), т. е. работать с различными коэффициентами нагрузки. С такой ситуацией сталкивается конструктор при выборе дискретных элементов (резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов малой и средней мощности, трансформаторов, дросселей и т. п.), микроминиатюрных элементов. Аналогичная задача имеет место при выборе типа радиатора для полупроводниковых приборов средней и большой мощности, так как номинальная мощность полупроводникового прибора, а следовательно, и коэффициент нагрузки требуют применения определенного типа радиатора.

Различные типы элементов имеют различные объем, массу, стоимость, показатели надежности. Внутри ряда однотипных элементов изменение коэффициента нагрузки также изменяет эти характеристики: с уменьшением коэффициента нагрузки увеличиваются объем, масса, стоимость элемента и его надежность. Если ясно сформулировать цель

при выборе элементов РЭА, то задача выбора типов и коэффициентов нагрузки элементов становится однозначной. В зависимости от назначения РЭА и основных требований, изложенных в ТЗ, цель выбора может быть сформулирована по-разному, например: при заданных массе (объеме) и стоимости РЭА выбрать ее элементы так, чтобы обеспечить максимальную надежность; при заданной надежности РЭА выбрать ее элементы так, чтобы обеспечить минимальный объем (массу).

Может оказаться, что задача выбора типов и коэффициентов нагрузки элементов не имеет смысла. Вот два примера: имеется только один элемент, подходящий по техническим параметрам для данного РЭА; масса (объем), стоимость или надежность элементов не соизмерима с аналогичными параметрами других частей РЭА (корпусом, платой, электромеханическим устройством и т. п.).

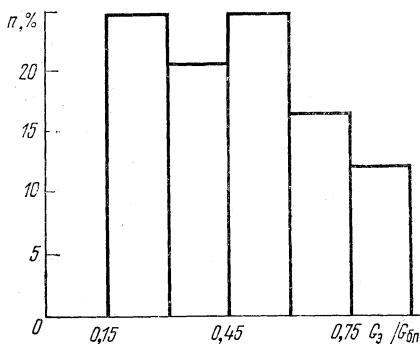


Рис. 3.24. Гистограмма распределения относительной массы элементов в блоках.

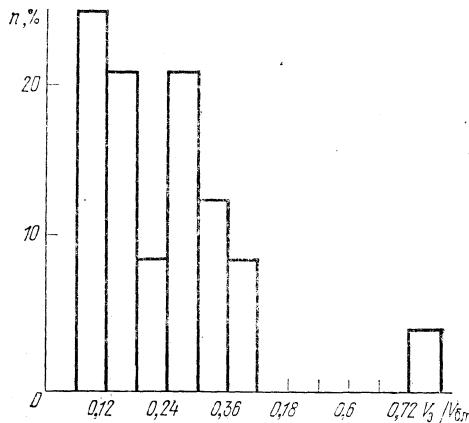


Рис. 3.25. Гистограмма распределения относительного объема элементов в блоках.

Тот факт, что выбор типов и коэффициентов нагрузки элементов в нашей постановке является задачей теплофизического конструирования, требует дополнительных разъяснений. Из зависимостей интенсивности отказов от температуры (см. § 1.3) следует, что различные типы элементов имеют различные интенсивности отказов при изменении температуры. У однотипных элементов при уменьшении коэффициента нагрузки снижается перепад температур между корпусом и критической зоной, уменьшаются температура критической зоны и интенсивность отказов элементов. Таким образом, выбор типов и коэффициентов нагрузки элементов связан с созданием оптимального температурного поля в критических зонах элементов, т. е. оптимального в смысле заданной целевой функции теплового режима РЭА. Напомним, что обычно целевой функцией называют математическую формулировку целевой задачи.

Наиболее характерными постановками задачи при выборе элементов РЭА являются следующие [47]: выбрать типы и коэффициенты нагрузки элементов, обеспечивающие максимальную надежность РЭА при заданной массе (объеме); выбрать типы и коэффициенты нагрузки элементов, обеспечивающие минимальную массу (объем) РЭА при задан-

ной ее надежности. В дальнейшем будем обсуждать эти две постановки задачи.

Как уже упоминалось, решение задач выбора элементов имеет смысл только в том случае, если масса (объем) элементов составляет значительную часть от общей массы (объема) РЭА. При малой массе (объеме) элементов надежность РЭА может быть повышена за счет значительного уменьшения коэффициентов нагрузки и, следовательно, увеличения массы (объема) элементов без существенного увеличения массы (объема) РЭА.

На рис. 3.24 и 3.25 приведены гистограммы, построенные в результате обследования большого количества охлаждаемых воздухом блоков РЭА различного функционального назначения, с различными условиями использования. По оси абсцисс на этих рисунках указаны отношения массы (объема) элементов к общей массе (объему) РЭА, а по оси ординат — количество блоков (в процентах от общего количества), имеющих заданные значения отношения массы (объема) элементов к массе (объему) блока. Анализ приведенных на рис. 3.24 и 3.25 гистограмм показывает, что во многих РЭА масса и объем элементов составляют существенную часть от массы и объема блока (в 50% случаев масса элементов составляет более половины массы, а объем более трети объема всего блока). Следовательно, поставленные выше задачи выбора типов и коэффициентов нагрузки элементов для большинства конструкций РЭА имеют смысл.

Рассмотрим задачу выбора типа и коэффициентов нагрузки элементов для обеспечения максимальной надежности РЭА при заданных массе (объеме) и стоимости. При другой целевой функции порядок дальнейших рассуждений почти не меняется. Пусть РЭА состоит из n элементов, каждому из которых присвоен i -й номер, $i=1, 2, \dots, n$. Для каждого i -го элемента могут быть использованы N_i типов элементов, одинаковых по электрическим характеристикам; каждому из этих типов присвоен j -й номер, т. е. $j(i)=1, 2, \dots, N_i$. Для i -го элемента j -го типа можно применить m_{ij} элементов с различными коэффициентами нагрузки, каждому из них присвоен k -й номер: $k(ij)=1, 2, \dots, m_{ij}$. Для каждого элемента известны значения массы, объема, стоимости и показатель надежности. Тогда задача выбора типа и коэффициентов нагрузки элементов математически записывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n g_{ijk} \leq G, \quad \sum_{i=1}^n \vartheta_{ijk} \leq V, \quad \sum_{i=1}^n c_{ijk} \leq C, \quad (3.64)$$

$$F = [\varphi(i, j, k)] \rightarrow \max, \quad (3.65)$$

где g_{ijk} , ϑ_{ijk} , c_{ijk} — масса, объем и стоимость i -го элемента j -го типа с k -м коэффициентом нагрузки; G , V , C — заданные вес, объем и стоимость РЭА; $\varphi(i, j, k)$ — показатель надежности; $F[\varphi(i, j, k)]$ — функция, определяющая надежность РЭА через показатели надежности ее элементов. Следовательно, при соблюдении неравенств (3.64) из большого количества вариантов необходимо выбрать тот, при котором функция (3.65) имеет максимальное значение.

С учетом требований практически задача выбора элементов может усложняться либо упрощаться. Например, число ограничений (3.64) может увеличиваться или уменьшаться. Целевая функция (3.65) может

учитывать сложные показатели надежности, например функциональную надежность. Если пользоваться простыми показателями надежности (см. § 1.3), тогда вместо (3.65) следует записать

$$\varphi(i, j, k) = \lambda_{ijk}; \quad F[\varphi(i, j, k)] = \sum_{i=1}^n \lambda_{ijk} \rightarrow \min. \quad (3.66)$$

Выбор элементов может быть усложнен объединением задач теплوفизического и схемотехнического конструирования. Так, совместно с задачей выбора типов и коэффициентов нагрузки элементов могут решаться задачи резервирования элементов. Различные варианты постановки таких задач освещены в [47—50].

При решении задачи с учетом (3.64) и (3.65) количество вариантов выбора элементов РЭА определяется числом $\prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} m_{ij}$. Это число очень велико для РЭА, и решение задачи путем перебора всех вариантов обычно не под силу даже современным ЭВМ.

Для решения подобных задач оптимизации в настоящее время широко используются методы неклассического вариационного исчисления (принцип максимума, динамическое программирование, целочисленное программирование, метод статистических испытаний, градиентные методы и т. п.). Применение этих методов позволяет решить задачу выбора элементов на ЭВМ. Различные варианты применения этих методов для решения задачи выбора элементов РЭА, а также алгоритмы ЭВМ описаны в [47—50]. Но даже и в таком виде решение задачи выбора элементов вызывает большие трудности. Это связано с необходимостью подготовки больших массивов исходных данных для ЭВМ и хранением в памяти ЭВМ большого количества справочных данных по элементам РЭА. Поэтому для практического применения в задачу выбора типов и коэффициентов нагрузки элементов РЭА вводят ряд упрощений, которые несколько снижают точность полученных результатов, но значительно облегчают решение задачи. Эти упрощения оправдываются еще и тем, что характеристики надежности элементов имеют необходимую точность и, следовательно, можно не стремиться к большой точности.

Обсудим основные упрощения, которые вводятся в задачу выбора элементов РЭА. В качестве показателей надежности элементов РЭА используется интенсивность их отказов, а целевая функция записывается в виде (3.66). Из ограничений (3.64) используется только одно (по массе или объему РЭА). При этом имеется в виду, что учет ограничения по массе РЭА в какой-то мере учитывает и ограничения по объему и стоимости. Задача оптимального выбора элементов РЭА сводится только к выбору коэффициентов нагрузки элементов. Типы элементов выбираются конструктором по техническим соображениям. Это оправдывается тем, что в настоящее время номенклатура типов элементов не очень велика.

Для облегчения решения задача выбора коэффициентов нагрузки разбивается на две: задачу оптимального распределения ресурсов между различными группами элементов и задачу определения оптимальных коэффициентов нагрузки элементов данной группы. Поскольку ресурсом в нашей задаче является заданная общая масса РЭА, то задача распределения ресурсов состоит в оптимальном распределении массы между элементами различных групп. Под элементами одной группы

будем понимать элементы, имеющие одинаковые зависимости массы от номинальной мощности $g_i = f(P_n)$ и интенсивности отказов от температуры $\lambda_i = f(t)$. Это значит, например, что несколько различных типов резисторов могут быть объединены в одну группу в нашей задаче, если они конструктивно похожи и зависимости $g_i = f(P_n)$ и $\lambda_i = f(t)$ у них одинаковые. Температура элементов считается равной некоторой средней расчетной или заданной в ТЗ температуре РЭА, не зависящей от выбранного коэффициента нагрузки. Это допущение может быть оправдано малой точностью каталожных данных по изменению интенсивности отказов элемента от температуры. Кроме того, в первом приближении можно предположить, что выбранные оптимальные коэффициенты нагрузки элементов мало меняются при небольших изменениях температуры элементов. Остальные упрощения введем в процессе решения.

Первая задача, связанная с оптимальным распределением массы РЭА между группами элементов, формулируется следующим образом: необходимо заданную в ТЗ общую массу РЭА оптимально распределить между группами элементов РЭА так, чтобы интенсивность отказов РЭА была минимальной.

В качестве исходных данных для решения этой задачи принимаются:

Мощности рассеивания каждого элемента P_{ij} (для конденсаторов рабочее напряжение) и число элементов РЭА n , разбитых на r групп по n_j элементов в каждой группе:

$$n = \sum_{i=1}^r n_j, \quad P = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} P_{ij};$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, r$ — номер группы элементов; $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$ — номер элемента в группе.

Законы изменения интенсивности отказов и массы элементов в группе

$$\lambda_{ij} = B \exp(s_j K_{ij}) \approx e_j + c_j K_{ij}, \quad G_{ij} = (a_j P_{ij} / K_{ij}) + d_j,$$

где a_j , c_j , d_j и e_j — постоянные коэффициенты внутри каждой группы элементов; K_{ij} — коэффициент нагрузки i -го элемента j -й группы. Следовательно, общие интенсивность отказов и масса РЭА определяются по формулам

$$\lambda = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} (e_j + c_j K_{ij}), \quad (3.67)$$

$$G = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}} + d_j \right), \quad (3.68)$$

а масса каждой группы элементов РЭА

$$G_j = \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}} + d_j \right). \quad (3.69)$$

Общая масса n элементов РЭА

$$G = \sum_{j=1}^r G_j = \text{const.}$$

Математическая задача распределения массы между группами элементов РЭА формулируется следующим образом: заданы P_{ij} , n_i , n_j , G : определить массу групп элементов G_j так, чтобы интенсивность отказов РЭА λ была минимальной. Единственными переменными, которые влияют на массу элементов каждой группы и которые мы можем изменять в нашей задаче, являются коэффициенты нагрузки K_{ij} . Следовательно, оптимальное распределение массы между группами элементов РЭА можно получить за счет изменения коэффициентов нагрузки.

Для решения этой задачи воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа и запишем функцию Лагранжа в виде

$$\Phi = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} (e_i + c_j K_{ij}) + \varphi \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}} + d_i \right), \quad (3.70)$$

где φ — неопределенный множитель Лагранжа. Возьмем производные функции Лагранжа по переменным K_{ij} , получим n уравнений вида

$$\frac{\partial \Phi}{\partial K_{ij}} = c_j - \varphi \frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n_j, \quad j = 1, 2, \dots, r.$$

Приравнивая эти n уравнений нулю, после умножения обеих частей уравнения на K_{ij} получим $c_j K_{ij} = \varphi a_i P_{ij} / K_{ij}$ и далее, складывая почленно левые и правые части,

$$\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij} = \varphi \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}}. \quad (3.71)$$

Из выражения (3.68) следует

$$\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}} = G - \sum_{j=1}^r n_j d_j = G_n = \text{const.} \quad (3.72)$$

Подставляя (3.71) в (3.70), находим неопределенный множитель Лагранжа

$$\varphi = \frac{1}{G_n} \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij}, \quad (3.73)$$

и далее из (3.70) и (3.73)

$$K_{ij} = \sqrt{\frac{a_i P_{ij}}{c_j G_n}} \sqrt{\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij}}. \quad (3.74)$$

Если в двойную сумму $\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij}$ подставить значение K_{ij} из (3.74), то

$$\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij} = \sqrt{\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij}} \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j \sqrt{\frac{a_i P_{ij}}{c_j G_n}}$$

или

$$\sqrt{\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij}} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{\frac{a_i c_j P_{ij}}{G_n}}. \quad (3.75)$$

После подстановки (3.75) в (3.74) получим

$$K_{ij} = \frac{D}{G_n} \sqrt{\frac{a_i P_{ij}}{c_j}}, \quad (3.76)$$

где

$$D = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{a_i c_j P_{ij}}. \quad (3.77)$$

Массы элементов j -й группы РЭА можно получить после подстановки (3.76) и (3.77) в (3.69):

$$G_j = \frac{G_n}{D} \sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{a_i c_j P_{ij}} + n_j d_j. \quad (3.78)$$

Определенные по формуле (3.78) массы для $1, 2, \dots, j$ -й групп элементов и являются оптимальными массами групп элементов РЭА, т. е. являются решением первой задачи.

Вторая задача, связанная с определением оптимальных значений коэффициентов нагрузки внутри каждой группы элементов РЭА, решается для каждой группы элементов и формулируется следующим образом: при заданной общей массе элементов данной группы определить оптимальные значения коэффициентов нагрузки элементов так, чтобы интенсивность отказов группы элементов была минимальной. Исходные данные для решения второй задачи принимаются такие же, как и для первой задачи; массы групп элементов, полученные при решении первой задачи, также являются исходными данными для решения второй задачи. Таким образом, заданы P_{ij} , n_j , G_j ; необходимо определить коэффициенты нагрузки K_{ij} так, чтобы интенсивность отказов каждой группы элементов λ_j была минимальной. Поскольку решение второй задачи ведется для каждой группы элементов отдельно, для интенсивности отказов группы элементов справедливы

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^{n_j} B_j \exp(s_j K_{ij}) \quad (3.79)$$

или приближенно

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^{n_j} (e_i + c_j K_{ij}). \quad (3.80)$$

Для решения второй задачи воспользуемся тем же методом неопределенных множителей Лагранжа и запишем функцию Лагранжа для j -й группы элементов с использованием более точной формулы (3.79) и формулы для веса элементов одной группы (3.69)

$$\Phi_j = B_j \sum_{i=1}^{n_j} \exp(s_j K_{ij}) + \varphi_j \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}} + d_j \right). \quad (3.81)$$

Частные производные (3.81)

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial K_{ij}} = B_j s_j \exp(s_j K_{ij}) - \varphi_j \frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n_j. \quad (3.82)$$

Приравнивая (3.82) нулю, получаем

$$B_j s_j K_{ij} \exp(s_j K_{ij}) = \varphi_j \frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}}.$$

Учитывая равенство (3.69)

$$\sum_{i=1}^{n_j} \frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}} = G_j - n_j d_j = G_{jn} \quad (3.83)$$

и складывая почленно левые и правые части n_j уравнений (3.83), получаем

$$\varphi_j G_{jn} = B_j s_j \sum_{i=1}^{n_j} K_{ij} \exp(s_j K_{ij}); \quad \varphi_j = \frac{B_j s_j \sum_{i=1}^{n_j} K_{ij} \exp(s_j K_{ij})}{G_{jn}}. \quad (3.84)$$

После подстановки (3.84) в (3.83) получим n_j уравнений для определения оптимальных коэффициентов нагрузки n_j элементов j -й группы:

$$P_{ij} = \frac{G_{jn} K_{ij} \exp(s_j K_{ij})}{a_j \sum_{i=1}^{n_j} K_{ij} \exp(s_j K_{ij})}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_j. \quad (3.85)$$

Совместное решение n_j трансцендентных уравнений (3.85) предстаёт известную трудность, особенно при больших значениях n_j . Поэтому представляет интерес рассмотреть, как выглядит решение (3.85) при использовании для функции Лангранжа упрощенной формулы (3.80). В этом случае функция Лагранжа записывается в виде

$$\Phi_j = \sum_{i=1}^{n_j} (e_i + c_i K_{ij}) + \varphi_j \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}} + d_i \right),$$

и далее, повторяя те же выкладки, которые мы привели при выводе выражений (3.70) — (3.77), получаем

$$K_{ij} = \frac{D_j}{G_{jn}} \sqrt{\frac{a_j P_{ij}}{c_j}},$$

$$\text{где } D_j = \sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{a_j c_j P_{ij}}.$$

В другом виде

$$K_{ij} = \frac{a_j}{G_{jn}} \sqrt{P_{ij}} \sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{P_{ij}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_j. \quad (3.86)$$

Формула (3.86) проще, чем (3.85), но менее точная.

Таким образом, с помощью (3.78) и (3.85), (3.86) можно определить оптимальные значения коэффициентов нагрузки элементов РЭА. Однако практическое пользование этими формулами связано с двумя существенными затруднениями. Во-первых, они сложны, и даже применение ЭВМ для решения трансцендентных уравнений (3.85) при больших n_j очень громоздко. При большом количестве элементов РЭА n (часто это сотни и тысячи) подготовка исходных данных для ЭВМ за-

нимает много времени. Во-вторых, значения коэффициентов нагрузки, определенные из (3.85), могут иметь любые значения от 0 до 1 и значительно отличаться от коэффициентов нагрузки, которые можно получить для дискретного ряда элементов данного типа. Дать рекомендации конструктору, в каких случаях необходимо брать ближайшее мень-

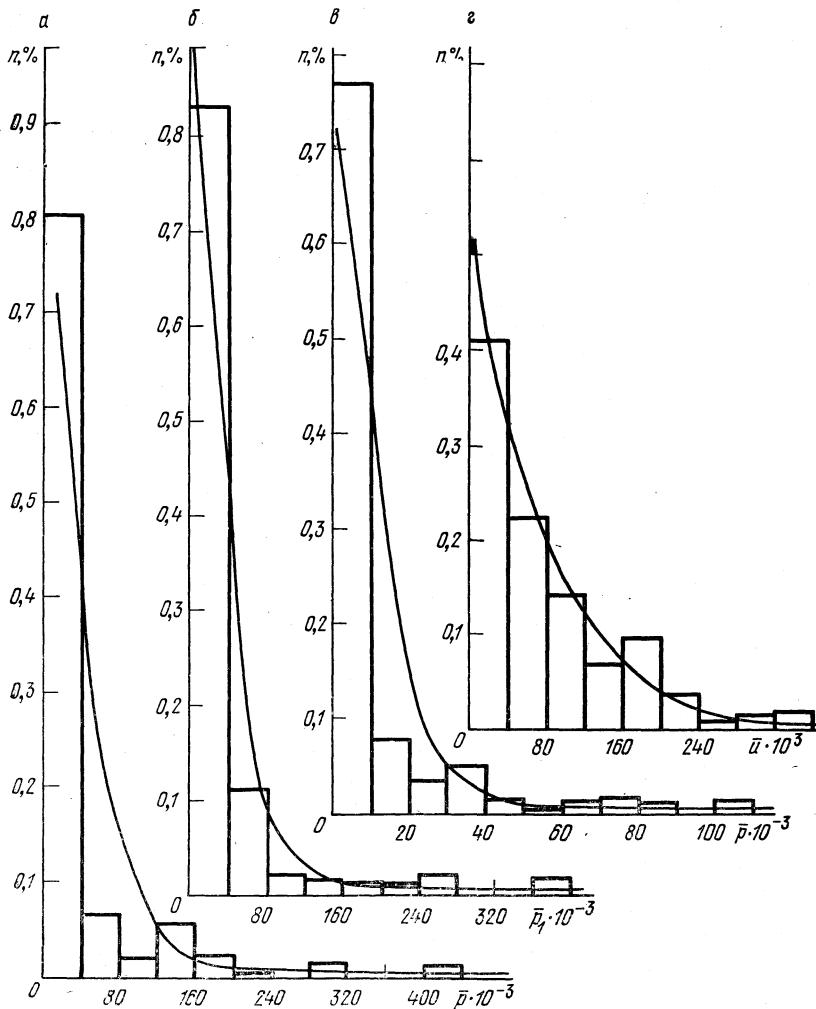


Рис. 3.26. Гистограммы распределения мощности элементов РЭА.

шее или большее значение коэффициента нагрузки по полученным решениям задачи, очень трудно. Если это делать произвольно, то полученные коэффициенты нагрузки могут значительно отличаться от оптимальных.

Учитывая сказанное, целесообразно от детерминированного решения перейти к вероятностному. Это, как увидим дальше, позволит преодолеть трудности, возникающие при детерминированном решении задачи. Идея вероятностного подхода к решению задачи определения оптимальных коэффициентов нагрузки элементов РЭА состоит в том,

что вместо мощности рассеивания всех элементов РЭА задается распределение ее вероятности, а решение задачи получается не в виде дискретных значений коэффициентов нагрузки, а в виде распределения их вероятностей.

Для анализа распределения вероятности мощности рассеивания у различных групп элементов проведен статистический анализ большого числа реальных блоков РЭА с воздушным охлаждением. По результатам обработки этих статистических данных на рис. 3.26 приведены гистограммы распределения относительной мощности для резисторов (рис. 3.26,а), конденсаторов (рис. 3.26,г, здесь вместо относительных мощностей даны относительные рабочие напряжения), полупроводниковых диодов (рис. 3.26,б) и транзисторов (рис. 3.26,в). По оси ординат на рис. 3.26 приведены количества элементов в долях от общего количества, по оси абсцисс — мощность в долях от общей мощности. Анализ приведенных на рис. 3.26 гистограмм показывает, что для рассмотренных элементов РЭА закон распределения мощности рассеивания близок к экспоненциальному. Для сравнения теоретическое экспоненциальное распределение показано на рис. 3.26 непрерывной линией. На основании этого в дальнейших расчетах принимается гипотеза об экспоненциальном законе распределения мощностей рассеивания элементов каждой группы в РЭА, для которого справедливы следующие соотношения:

дифференциальная функция распределения

$$f_j(P) = b_j e^{-b_j P} \text{ при } P > 0; \quad (3.87)$$

интегральная функция распределения

$$F_j(P) = 1 - e^{-b_j P} \text{ при } P > 0; \quad (3.88)$$

математическое ожидание

$$M_j(P) = 1/b_j; \quad (3.89)$$

дисперсия и среднеквадратичное отклонение

$$D_j = \sigma^2_j = 1/b_j^2. \quad (3.90)$$

Оценка математического ожидания (среднее значение) по определению равна

$$M_j(P) \approx \frac{\sum_{i=1}^{n_j} P_{ij}}{n_j} = \bar{P}_j = \frac{P_j}{n_j} \approx \frac{1}{b_j},$$

а оценка дисперсии

$$M [P - M_j(P)]^2 \approx \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (P_{ij} - \bar{P}_j)^2.$$

При вероятностном подходе к решению задачи об оптимальном выборе коэффициентов нагрузки элементов РЭА в исходных данных вместо мощностей рассеивания P_{ij} задаются мощности рассеивания каждой группы элементов P_j и их распределения в виде (3.87), а решение задачи ищется в виде дифференциальной функции распределения коэффициентов нагрузки элементов данной группы $f^{(n)}_j$.

Рассмотрим вероятностный подход к решению первой задачи о распределении заданной массы РЭА между отдельными группами элементов. Переайдем в уравнении

(3.78) от дискретных к непрерывным функциям и заменим суммирование интегрированием. Можно записать

$$\sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{P_{ij}} = \sum_{i=1}^{n_j} f(P_{ij}) \Delta P_{ij} n_j \sqrt{P_{ij}} = n_j \int_0^{\infty} \sqrt{P} f_j(P) dP \text{ при } \Delta P_{ij} \rightarrow 0. \quad (3.91)$$

Подставив значения (3.87) в (3.91) и решив интеграл, получим

$$n_j \int_0^{\infty} \sqrt{P} b_j e^{-b_j P} dP = \frac{n_j}{2} \sqrt{\frac{\pi}{b_j}}.$$

Подставляя в это решение значение b_j из формул математического ожидания, находим

$$\sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{P_{ij}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{n_j P_j}. \quad (3.92)$$

Подставив (3.92) в (3.77) и (3.78), получим окончательную формулу для определения оптимальной массы каждой группы элементов РЭА

$$G_j = G_n \frac{\sqrt{a_j c_j n_j P_j}}{\sum_{j=1}^r \sqrt{a_j c_j n_j P_j}} + n_j d_j. \quad (3.93)$$

Формула (3.93) проще формулы (3.78), так как в ней суммирование ведется по числу групп, а не по числу элементов ($r \ll n$).

Покажем особенности применения вероятностного подхода к решению второй задачи — определения оптимальных коэффициентов нагрузки элементов РЭА для каждой группы. Исходные данные для этой задачи те же, что и для первой. По тем же правилам, по которым мы получили (3.91), перейдем в формуле (3.85) от дискретных величин к непрерывным и заменим суммирование интегрированием

$$P = \frac{G_j n_j K^2 \exp(s_j K)}{a_j n_j \int_0^{\infty} K \exp(s_j K) f_j(K) dK}. \quad (3.94)$$

Прежде чем проводить дальнейшие преобразования с (3.94), докажем одно вспомогательное положение, которое можно сформулировать следующим образом: для элементов РЭА одной группы при оптимальных коэффициентах нагрузки элементы с большей рассеиваемой мощностью имеют большие коэффициенты нагрузки:

$$\text{если } P_{1j} > P_{2j}, \text{ то } K_{1j} > K_{2j}. \quad (3.95)$$

Для доказательства этого запишем (3.85) для $i=1$ и $i=2$ и возьмем их отношение

$$\frac{P_{1j}}{P_{2j}} = \frac{K_{1j}^2 \exp\{s_j (K_{1j} - K_{2j})\}}{K_{2j}^2}.$$

Из этого отношения непосредственно следует (3.95), т. е. сформулированное нами выше положение доказано. Из (3.95) также следует, что если некоторому элементу с рассеиваемой мощностью P соответствует оптимальный коэффициент нагрузки K , то число элементов, имеющих мощность рассеивания не выше P , должно быть равно

числу элементов, имеющих коэффициент нагрузки не выше K :

$$\int_0^P f_j(P) dP = \int_0^K f_j(K) dK. \quad (3.96)$$

Подставляя в (3.96) значения из (3.87) и находя левый интеграл, получаем

$$P = -\frac{1}{b_f} \ln \left(1 - \int_0^K f_f(K) dK \right). \quad (3.97)$$

Решая совместно (3.94) и (3.97), найдем

$$\int_0^K f_j(K) dK = 1 - \exp \left[- \frac{b_j G_{j,n} K^2 \exp(s_j K)}{a_j n_j \int_0^K K \exp(s_j K) f_j(K) dK} \right]. \quad (3,98)$$

Дифференцируя обе части (3.98) по переменной K , получаем

$$f_j(K) = \frac{b_j G_{jn}}{a_j n_j y_j} K e^{s_j K} (2 + s_j K) \exp \left[- \frac{b_j G_{jn} K e^{s_j K}}{a_j n_j y_j} \right], \quad (3.99)$$

$$\text{где } y_j = \int_0^\infty K e^{sjK} f_j(K) dK.$$

Учитывая, что $P_j = n_j/b_j$ и вводя обозначение $A_j = G_{jn}/a_j P_j$, перепишем (3.99) в виде

$$f_j(K) = \frac{A_j}{y_j} K e^{s_j K} (2 + s_j K) \exp \left[-\frac{A_j}{y_j} K^2 e^{s_j K} \right]. \quad (3.100)$$

Выражения (3.98) и (3.100) и есть интегральный и дифференциальный законы распределения оптимальных коэффициентов нагрузки РЭА, т. е. являются решением второй задачи.

В соответствии с постановкой задачи пользоваться этими решениями необходимо в следующей последовательности. Разрешенный нормативными документами для элементов данной группы диапазон изменения коэффициентов нагрузки разбивают на m_j одинаковых интервалов:

где $l = 1, 2, 3, \dots, m_j$ — номер интервала; $K_j(1), K_j(m+1)$ — соответственно минимальный и максимальный коэффициенты нагрузки, разрешенные нормативными документами для элементов данной группы;

$$K_j(2) = K_j(1) + \frac{K_j(m+1) - K_j(1)}{m_j},$$

$$K_j(3) = K_j(2) + \frac{K_j(m+1) - K_j(1)}{m_j},$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$K_j(l) = K_j(l-1) + \frac{K_j(m+1) - K_j(1)}{m_j}.$$

Число элементов данной группы, коэффициенты нагрузки которых должны лежать в каждом интервале (3.101), определяют из закона распределения (3.100) по формулам

$$n_{jl} = n_j \int_{K_j(l)}^{K_j(l+1)} f_j(K) dK \text{ для } l = 2, 3, \dots, m_j - 1, \quad (3.102)$$

$$n_{j1} = n_j \int_0^{K_j(2)} f_j(K) dK, \quad n_{jm} = n_j \int_{K_j(m)}^{\infty} f_j(K) dK.$$

Естественно, что $\sum_{l=1}^m n_{jl} = n_j$. Все элементы данной группы располагают в порядке возрастания мощности рассеивания и в этом порядке присваивают им номера, $l = 1, 2, 3, \dots, n_j$, т. е. $P_{1j} < P_{2j} < P_{3j} < \dots < P_{n_j j}$.

После этого определяют номера элементов, коэффициенты нагрузки которых должны лежать в l -м интервале по следующему правилу: элементы с номерами 1, 2, 3, ..., n_{j1} должны быть выбраны с коэффициентами нагрузки, лежащими в 1-м интервале, т. е. от $K_j(1)$ до $K_j(2)$; элементы с номерами $n_{j1} + 1, n_{j1} + 2, \dots, n_{j1} + n_{j2}$ — во 2-м интервале; элементы с номерами $\left[\sum_{z=1}^{l-1} n_{jz} \right] + 1, \left[\sum_{z=l}^{l-1} n_{jz} \right] + 2, \dots, \sum_{z=l}^l n_{jz}$ — в l -м интервале; элементы с номерами $\left[\sum_{l=1}^{m-1} n_{jl} \right] + 1, \left[\sum_{l=1}^{m-1} n_{jl} \right] + 2, \dots, \sum_{l=1}^m n_{jl}$ — в m -м интервале.

Процедуры присвоения номеров группам и элементам соответствуют ранее нами доказанным неравенствам (3.95). Наконец, по каталогу для каждого i -го элемента j -й группы подбирают конкретный элемент РЭА так, чтобы его коэффициент нагрузки лежал в выбранном по (3.98) интервале. По-видимому, это нетрудно сделать, так как интервалы коэффициентов нагрузки достаточно велики, в противном случае нужно интервалы увеличить, т. е. уменьшить число интервалов m_j .

Зависимость (3.100) представляет собой сложные интегральные уравнения, численное решение их возможно только с помощью ЭВМ. Для облегчения пользования этими формулами их значение для наиболее часто встречающихся на практике случаев необходимо табулировать при помощи ЭВМ, что мы и сделаем в конце этого параграфа. В остальных случаях необходимо непосредственно пользоваться формулами (3.100), (3.102), но упростить их настолько, чтобы они были пригодны для практических расчетов без значительного уменьшения точности. В результате совместного решения уравнений (3.100) и (3.102) на

ЭВМ при $1,1 \leq A \leq 20$, $0,1 \leq s_j \leq 5$ получены коэффициенты уравнения (3.100). В результате аппроксимации этих значений выражение для определения величины y в (3.100) выглядит так:

$$y_j = \frac{0,791}{A_j} \exp \left(0,975 \frac{s_j}{A_j} \right). \quad (3.103)$$

Погрешность этого выражения в указанном выше интервале не превышает 1%, а совместное решение (3.102) и (3.103) уже не представляет большого труда.

После подстановки (3.100) и (3.103) в (3.102) и решения интеграла получим

$$\begin{aligned} \frac{n_{j1}}{n_j} &= 1 - \exp \left\{ -\frac{A_j}{y_j} K_{j1}^2 (2) \exp [s_j K_{j1} (2)] \right\}, \\ \frac{n_{jl}}{n_j} &= \exp \left\{ -\frac{A_j}{y_j} K_{jl}^2 (l+1) \exp [s_j K_{jl} (l+1)] \right\} + \\ &+ \exp \left\{ -\frac{A_j}{y_j} K_{jl}^2 (l) \exp [s_j K_{jl} (l)] \right\} \text{ для } l = 2, 3, \dots, (m_j - 1), \\ \frac{n_{jm}}{n_j} &= \exp \left\{ -\frac{A_j}{y_j} K_{jm}^2 (m) \exp [s_j K_{jm} (m)] \right\}. \end{aligned} \quad (3.104)$$

Можно предложить другой метод упрощения (3.100) и (3.102). Дифференциальная функция распределения оптимальных коэффициентов нагрузки (3.100) имеет вид плотности распределения типа Вейбулла. Это нетрудно установить, если заметить, что множитель у экспоненты в (3.100) есть производная показателя степени, взятого с обратным знаком:

$$\frac{d}{dK} \left(\frac{A_j}{y_j} K^2 e^{s_j K} \right) = \frac{A_j}{y_j} e^{s_j K} (2 + s_j K).$$

Частными случаями распределения Вейбулла являются распределение Релея

$$f(K) = 2h^2 K e^{-h^2 K^2} \quad (3.105)$$

и экспоненциальное распределение

$$f(k) = U e^{-u k}. \quad (3.106)$$

Поэтому можно предположить, что при некоторых упрощениях в постановке задачи удастся получить дифференциальную функцию распределения оптимальных коэффициентов нагрузки в виде распределений Релея и экспоненциального. Конечно, при этом решение задачи будет менее точным, но более простым. Воспользуемся для решения второй задачи формулой (3.80) для определения интенсивности отказов группы элементов. Тогда, как было показано выше, оптимальные коэффициенты нагрузки определяются выражением (3.86). Выполним в (3.86) те же преобразования, которые ранее мы сделали для более сложного выражения (3.85). Как и в (3.91), перейдем в (3.86) от дискретных величин к непрерывным и заменим операцию суммирования интегрированием

$$K = \frac{a_j n_j}{G_{jn}} V \bar{P} \int_0^\infty V \bar{P} f_j (P) dP. \quad (3.107)$$

Подставим в (3.107) значение из (3.87) и после решения интеграла получим

$$K = -\frac{a_j n_j}{2G_{jn}} \sqrt{P \frac{\pi}{b_j}},$$

откуда

$$P = \frac{4G^2_{jn} b_j}{a_j^2 n_j^2 \pi} K^2. \quad (3.108)$$

Решая совместно (3.97) и (3.108), получаем

$$\int_0^K f_j(K) dK = 1 - \exp\left(-\frac{4G^2_{jn} b_j^2}{a_j^2 n_j^2 \pi} K^2\right).$$

Дифференцируя обе части и вводя значение A_j из (3.100), получаем

$$f_j(K) = 8 \frac{A_j^2}{\pi} K \exp\left(-\frac{4A_j^2}{\pi} K^2\right). \quad (3.109)$$

Уравнение (3.109) есть дифференциальная функция распределения оптимальных коэффициентов нагрузки для группы элементов РЭА при введении в условие второй задачи упрощенной формулы (3.80) для определения интенсивности отказов. Сравнивая (3.109) с (3.105), легко убедиться, что (3.109) есть плотность распределения Релея при

$$h = 2A_j / \sqrt{\pi}. \quad (3.110)$$

Параметр распределения Релея h можно найти из других соображений. Если в условии второй задачи мы потребуем, чтобы распределение оптимальных коэффициентов нагрузки искалось в виде распределения Релея (3.105), то, подставляя в (3.96) (3.87) и (3.105) и решая интегралы в левой и правой частях, получаем

$$1 - e^{-b_j P} = 1 - e^{-h^2 K^2}$$

и далее

$$P = h^2 K^2 / b_j. \quad (3.111)$$

В формуле (3.83) перейдем от дискретных величин к непрерывным и заменим суммирование интегрированием

$$G_{jn} = a_j n_j \int_0^\infty \frac{P}{K} f(K) dK. \quad (3.112)$$

Подставляя (3.111) и (3.105) в (3.112), решаем интеграл и вводим значения A_j из (3.100), получаем $h = 2A_j / \sqrt{\pi}$.

Если задать для оптимального распределения коэффициентов нагрузки элементов РЭА экспоненциальное распределение (3.106), то его параметр можно найти, следуя тем же рассуждениям, которые мы использовали при выводе выражений (3.111) и (3.112).

Подставляя в (3.96), (3.87) и (3.106), решая интеграл в левой и правой частях, получаем

$$P = UK / b_j; \quad (3.113)$$

после подстановки (3.113) и (3.106) в (3.112) $U = A_j$.

Следовательно, если задать для оптимального закона распределения коэффициентов нагрузки экспоненциальный закон, то дифференци-

альная функция распределения коэффициентов нагрузки будет иметь вид

$$f_j(K) = A_j e^{-A_j K}. \quad (3.114)$$

Таким образом, зависимости (3.102) для определения числа элементов данной группы, коэффициенты нагрузки которых лежат в каждом интервале l , при принятых упрощениях сводятся к следующему.

При использовании закона распределения Релея после подстановки (3.109) в (3.102)

$$\begin{aligned} \frac{n_{j1}}{n_j} &= 1 - \exp \left[-\frac{4A_j^2}{\pi} K_{j1}^2(2) \right], \\ \frac{n_{jl}}{n_j} &= \exp \left[-\frac{4A_j^2}{\pi} K_{jl}^2(l+1) \right] - \exp \left[-\frac{4A_j^2}{\pi} K_{jl}^2(l) \right] \text{ для } l = 2, 3, \dots, \\ &\quad (m_j - 1), \\ \frac{n_{jm}}{n_j} &= \exp \left[-\frac{4A_j^2}{\pi} K_{jm}^2(m) \right]. \end{aligned} \quad (3.115)$$

При использовании экспоненциального закона распределения после подстановки (3.114) в (3.102)

$$\begin{aligned} \frac{n_{j1}}{n_j} &= 1 - \exp [-A_j K_j(2)], \\ \frac{n_{jl}}{n_j} &= \exp [-A_j K_j(l+1)] - \exp [-A_j K_j(l)] \text{ для } l = 2, 3, \dots, (m_j - 1), \\ \frac{n_{jm}}{n_j} &= \exp [-A_j K_j(m)]. \end{aligned} \quad (3.116)$$

Таким образом, выражения (3.109) и (3.115) или (3.114) и (3.116) являются упрощенными решениями второй задачи, т. е. задачи об оптимальном выборе коэффициентов нагрузки для группы элементов РЭА. Однако упрощенные формулы позволяют решить вторую задачу с некоторым приближением. Величину этого приближения необходимо определить, после чего можно будет указать область применения упрощенных формул.

Интенсивность отказов для группы элементов РЭА определяется формулой (3.79). Переходя в этой формуле от дискретных величин к непрерывным и заменяя операцию суммирования интегрированием, получаем

$$\lambda_j = B_j n_j \int_0^\infty e^{s_j K} f_j(K) dK. \quad (3.117)$$

После подстановки в (3.117) значений дифференциальной функции распределения коэффициентов нагрузки из (3.100), (3.109) и (3.114), решения интегралов (3.117) и сравнения этих решений, мы можем оценить погрешности, вносимые упрощенными формулами в решение вто-

рой задачи. Интеграл (3.117) был рассчитан на ЭВМ. Относительные ошибки подсчитывались по формулам

$$\frac{\lambda_j^{(1)} - \lambda_j}{\lambda_j} = \frac{\int_0^{\infty} e^{s_j K} f_j^{(1)}(K) dK - \int_0^{\infty} e^{s_j K} f_j(K) dK}{\int_0^{\infty} e^{s_j K} f_j(K) dK}, \quad (3.118)$$

$$\frac{\lambda_j^{(2)} - \lambda_j}{\lambda_j} = \frac{\int_0^{\infty} e^{s_j K} f_j^{(2)}(K) dK - \int_0^{\infty} e^{s_j K} f_j(K) dK}{\int_0^{\infty} e^{s_j K} f_j(K) dK}, \quad (3.119)$$

где λ_j — интенсивность отказов группы элементов РЭА при распределении коэффициентов нагрузки f по формуле (3.100); $\lambda_j^{(1)}$ — то же, но с распределением нагрузки по формуле (3.109); $\lambda_j^{(2)}$ — то же, но с распределением нагрузки по формуле (3.114). Расчеты на ЭВМ проводились для значений

$$1,1 \leq A_j \leq 20; \quad 0,1 \leq s_j \leq 5. \quad (3.120)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.12, причем верхняя строчка цифр соответствует (3.118), нижняя — (3.119); нули в табл. 3.12 соответствуют относительной ошибке, меньшей 0,01. Если принять, что относительная ошибка при пользовании упрощенными формулами не должна быть выше 0,05, то можно указать области применения упрощенных формул.

Таким образом, применение вероятностного подхода при решении второй задачи позволяет устранить указанные выше недостатки других способов решения.

Подготовка исходных данных для решения задачи выбора оптимальных коэффициентов нагрузки элементов РЭА имеет ряд особенностей и требует специального пояснения.

Во-первых, следует отметить, что на современном этапе развития элементной базы РЭА оптимальный выбор коэффициентов нагрузки можно осуществить только для четырех основных видов элементов: резисторов, конденсаторов, полупроводниковых диодов и транзисторов. Для этих элементов имеется широкая номенклатура изделий, позволяющая при близких электрических и других характеристиках варьировать их коэффициенты нагрузки в широких пределах. Поэтому в дальнейшем изложении подготовка исходных данных и решение задачи проиллюстрированы только для этих элементов РЭА. Однако тенденция развития элементной базы РЭА позволяет надеяться, что в ближайшем будущем номенклатура изделий будет расширена, что позволит увеличить перечень видов элементов, для которых может ставиться и решаться задача определения оптимальных коэффициентов нагрузки. По-видимому, подобные задачи в скором будущем можно будет решать и для микрэлектронных элементов.

В этом параграфе содержатся все необходимые сведения для расширения области применения задачи определения оптимальных коэффициентов нагрузки на новые элементы.

Таблица 3.12

Результаты расчетов по формулам (3.118), (3.119)

<i>A</i>	<i>S</i>	0,1	0,7	0,8	0,9	1,3	1,6	2,0	2,3	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	3,2	3,3	3,6	4,3	5,0		
1,1	0,023	0	0,622	1,000	1,76	0,01	0,02	0,05	0,08	0,16	0,17	0,29	0,32	0,4	0,47	0,53	0,73	0,82	1,12	2,4	5,0
1,5	0,016	0	0,18	0,55	0,521	2,6	0,01	0,02	0,03	0,06	0,1	0,11	0,13	0,2	0,17	0,2	0,27	0,29	0,37	0,69	1,21
2,0	0,012	0	0,16	0,27	0,26	0,634	1,56	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,11	0,12	0,16	0,27	0,44
2,5	0,069	0	0,11	0,14	0,165	0,357	0,633	1,56	4,74	10,9	0,02	0,026	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	0,08	1,14	0,22	
3,0	0	0	0,08	0,10	0,12	0,238	0,38	0,723	1,255	1,556	1,98	3,68	5,81	12,23							
3,5	0	0	0,06	0,05	0,099	0,175	0,266	0,455	0,690	0,753	0,928	1,292	1,556	1,907	4,391	6,88					
4,0	0	0	0,05	0,064	0,076	0,136	0,201	0,326	0,455	0,511	0,577	0,798	0,859	0,985	1,556	1,858	3,679				
4,5	0	0	0,045	0,054	0,064	0,095	0,160	0,248	0,337	0,374	0,415	0,511	0,580	0,647	0,913	1,031	1,556	1,922			
5,0	0	0	0,039	0,047	0,056	0,094	0,134	0,202	0,266	0,292	0,321	0,386	0,431	0,465	0,633	0,699	0,957	2,462			
5,5	0	0	0,035	0,030	0,049	0,082	0,113	0,167	0,219	0,238	0,259	0,307	0,34	0,364	0,478	0,521	0,681	1,380	4,106		
6,0	0	0,029	0,029	0,043	0,073	0,100	0,143	0,184	0,201	0,217	0,254	0,275	0,296	0,374	0,411	0,521	0,928	1,977			
6,5	0	0,025	0,028	0,039	0,064	0,086	0,124	0,159	0,172	0,187	0,215	0,237	0,249	0,309	0,337	0,419	0,689	9,275			
7,0	0	0,024	0,027	0,036	0,058	0,078	0,111	0,140	0,151	0,162	0,187	0,201	0,214	0,263	0,286	0,348	0,548	0,928			
7,5	0	0,023	0,026	0,032	0,053	0,070	0,100	0,123	0,134	0,143	0,169	0,176	0,187	0,228	0,245	0,351	0,451	0,723			
8,0	0	0,022	0,025	0,030	0,048	0,064	0,089	0,112	0,119	0,128	0,146	0,156	0,166	0,201	0,213	0,258	0,381	0,568			
8,5	0	0,021	0,024	0,027	0,044	0,059	0,081	0,101	0,108	0,116	0,132	0,139	0,150	0,178	0,189	0,227	0,329	0,493			
9,0	0	0,019	0,023	0,025	0,041	0,054	0,075	0,092	0,100	0,106	0,119	0,127	0,134	0,160	0,170	0,203	0,289	0,423			
9,5	0	0,018	0,021	0,025	0,038	0,050	0,070	0,084	0,091	0,097	0,109	0,116	0,123	0,145	0,153	0,180	0,257	0,369			
10	0	0,017	0,02	0,023	0,036	0,047	0,054	0,079	0,084	0,089	0,101	0,107	0,113	0,134	0,140	0,163	0,230	0,326			
20	0	0,007	0,009	0,010	0,016	0,020	0,045	0,031	0,032	0,034	0,037	0,040	0,041	0,047	0,049	0,056	0,071	0,089			

В основе решения обеих задач по определению оптимальных коэффициентов нагрузки элементов РЭА принята разбивка элементов на группы. Мы уже упоминали, что элементами одной группы могут быть элементы различных типов, но одного вида (т. е. резисторы разных типов, конденсаторы разных типов и т. п.), для которых зависимости массы от номинальной мощности и интенсивности отказов от температуры одинаковы. Здесь имеется в виду, что численные значения коэффициентов пропорциональности a_j , s_j или c_j в этих зависимостях примерно одинаковы. Для удобства перепишем эти формулы:

$$\lambda_{ji} = B \exp(s_j K_{ij}) \approx e_j + c_j K_{ij}, \quad (3.121)$$

$$G_{ij} = \frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}} + d_j. \quad (3.122)$$

Разбивка элементов РЭА на группы по показателям надежности приведена в табл. 1.1. Формулу (3.106) можно переписать в виде

$$\lambda_{ji} / \lambda_{ji0} = \exp(U_j + v_j t_{\infty} + w_j K_{ij}). \quad (3.123)$$

Сравнивая (3.121) с (3.123), легко установить соответствие коэффициентов для каждой группы элементов:

$$\begin{aligned} B_j &= \lambda_{ji0} \exp(U_j + v_j t_{\infty}) = e_j = D_j e^{v_j t_{\infty}}, \\ s_j &= w_j; \quad c_j = B_j s_j. \end{aligned} \quad (3.124)$$

Для определения коэффициентов необходимо аппроксимировать каталожные данные по каждому виду элементов. Аппроксимация каталожных данных выполняется методом наименьших квадратов. Пусть в каталоге для некоторого вида элементов приведено n_j номинальных мощностей и масс для различных модификаций, т. е.

$$P_{hi1}, P_{hi2}, \dots, P_{hi n_j}; \quad G_{hi1}, G_{hi2}, \dots, G_{hi n_j}. \quad (3.125)$$

Определим для значений (3.125) уравнение линейной регрессии

$$G_{ji} = a_j P_{hi j} + d_j, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_j, \quad (3.126)$$

чтобы выражение

$$I = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (G_{hi} - a_j P_{hi j} - d_j)^2 \rightarrow \min. \quad (3.127)$$

Для определения коэффициентов в (3.126) необходимо взять частные производные от (3.125) по коэффициентам a_j , d_j и приравнять их нулю:

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = -\frac{2}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} P_{hi j} (G_{hi} - a_j P_{hi j} - d_j) = 0, \quad (3.128)$$

$$\frac{\partial I}{\partial d_j} = -\frac{2}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (G_{hi} - a_j P_{hi j} - d_j) = 0.$$

После несложных преобразований из (3.128) получим два уравнения для определения коэффициентов в (3.126):

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} G_{hi} - \frac{a_j}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} P_{hi} = d_j, \\ \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} P_{hi} G_{hi} - \frac{d}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} P_{hi} - \frac{a_j}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} P_{2hi} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.129)$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \bar{G} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} G_{hi}, \quad \bar{P}_{hi} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} P_{hi}, \\ \bar{\sigma^2}_g = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} G_{hi}^2 - \bar{G}^2_{hi}, \\ \bar{\sigma^2}_p = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} P_{hi}^2 - \bar{P}_{hi}^2, \\ \bar{\rho}_{gp} = \frac{1}{n_j} \frac{\sum_{i=1}^{n_j} G_{hi} P_{hi} - \bar{G}_{hi} \bar{P}_{hi}}{\bar{\sigma}_g \bar{\sigma}_p}, \end{aligned} \quad (3.130)$$

где \bar{G}_{hi} , \bar{P}_{hi} — оценки математических ожиданий величин G_{hi} и P_{hi} соответственно; $\bar{\sigma^2}_g$, $\bar{\sigma^2}_p$ — оценки дисперсии величин G_{hi} и P_{hi} соответственно; $\bar{\rho}_{gp}$ — оценка коэффициента корреляции величин G_{hi} и P_{hi} .

Решая совместно (3.129) и вводя обозначения (3.130), определяем значения коэффициентов в выражении (3.126)

$$a_j = \bar{\rho}_{gp} \frac{\bar{\sigma}_g}{\bar{\sigma}_p}; \quad d_j = \bar{G}_{hi} - \bar{\rho}_{gp} \frac{\bar{\sigma}_g}{\bar{\sigma}_p} \bar{P}_{hi}. \quad (3.131)$$

В результате расчетов по (3.125), (3.131) определены коэффициенты линейной регрессии для различных типов элементов. Элементы, имеющие примерно одинаковые коэффициенты a_j , в формуле (3.122) объединены в одну группу. В табл. 3.13 по результатам этих расчетов дана разбивка элементов РЭА на группы и значения коэффициентов в формулах (3.121) и (3.126). Для элементов, не приведенных в табл. 3.13, необходимо выполнить операции по (3.124) и (3.131).

Для облегчения проведения операций по выбору оптимальных коэффициентов нагрузки элементов РЭА изложим методику расчета.

1. Задаем исходные данные: вес РЭА, количество элементов, мощность рассеивания (для конденсаторов — рабочее напряжение) и тип каждого элемента, среднюю температуру окружающей элементы РЭА

Таблица 3.13

Разбивка элементов на группы

Номер группы	Наименование группы элементов	a_j	d_j	D_j	v_j	s_j
1	Резисторы: металлопленочные (кроме типов С2-8, С2-13, С2-14, С2-15) металлопленочные типы:	2,4	—	0,02	0,022	2,35
2	С2-8	9,0	—1,0	0,0157	0,022	2,35
3	С2-13	7,0	3,0	0,0157	0,022	2,35
4	С2-14	4,5	1,0	0,0157	0,022	2,35
5	С2-15	6,0	2,0	0,0157	0,022	2,35
6	металлоокисные	1,4	—	0,146	0,022	2,35
7	углеродистые	7,2	—	0,042	0,022	2,35
8	объемные постоянные	2,3	—	0,86	0,013	0,76
9	проводочные постоянные (кроме типов ПКБ) проводочные постоянные типы:	2,4	1,6	0,079	0,022	2,35
10	ПКБ-І	8,0	—	0,105	0,022	2,35
11	ПКБ-ІІ	20,0	—3,0	0,105	0,022	2,35
12	проводочные переменные (кроме типов ППБ)	2,2	1,0	0,17	0,08	2,8
13	проводочные переменные типа ППБ	7,0	18,0	0,17	0,08	2,8
14	переменные непроводочные типа СПОС Конденсаторы бумажные и металлобумажные типы:	28,0	—	0,42	0,022	2,35
15	БГТ, КГБ, ОКБГ,	0,20C	27C + 28,0	0,09	0,02	2,62
16	КБГ-ІІ	0,61C	—543,5C—1079,3	0,04	0,02	2,62
17	ОКБП-Ф	0,6C	—68,4C + 96,9	0,05	0,02	2,62
18	К4ОП-3, К4ОУ-9, К42У-2,	0,17C	17,7C + 2,3	0,035	0,02	2,62
19	МБГ	0,1C	27,0	0,1	0,02	2,62
20	МБГО	0,03C	1,8C—0,6	0,03	0,02	2,62
21	МБГТ	0,1C	24,9C + 5,3	0,01	0,02	2,62
22	МБГ4	0,4C	—61,7C—23,0	0,01	0,02	2,62
23	МБМ	0,1C	10,5C—0,9	0,02	0,02	2,62
24	К3 Конденсаторы других типов	0,45C	74,1C + 44,0	0,05	0,02	2,62
25	ФГТ-І	0,4C	35C—17,0	0,05	0,02	2,62
26	К72П-6	2C	784C—3,7	0,06	0,02	2,62
27	К73П-2	0,13C	28,9C—6,7	0,01	0,02	2,62
28	ПКГТ	0,86C	—1028C—471,0	0,09	0,02	2,62
29	ПКГИ	10C	54288C + 297,0	0,1	0,02	2,62
30	К75П-4	0,5C	—11,5C + 5,0	0,06	9,02	2,62
31	К75-10	0,9C	—89,5C—34,0	0,06	0,02	2,62
32	К75-12	0,2C	61C + 15,3	0,06	0,02	2,62
33	Конденсаторы электролитические типа ЭТ Конденсаторы электролитические (кроме ЭТ):	0,0024C	0,05C—3,1	0,03	0,02	2,62
34	К3-М	0,0043C	—	0,049	0,02	0,042
35	КЭ-ОМ	0,031C	—0,02C—0,85	0,049	0,02	0,042
36	ЭГЦ	0,015C	0,004C + 9,3	0,13	0,02	0,042

Продолжение табл. 3.13

Номер группы	Наименование группы элементов	a_j	d_j	D_j	v_j	s_j
37	ЭМ, КБ31-А	$0,01C+1,0$	$0,1C+1,0$	0,06	0,02	0,042
38	К50-3	$0,0032C$	$0,17C+14,5$	0,045	0,02	0,042
39	К50-3Б Полупроводниковые диоды германиевые выпрямительные	$0,002C$	$0,15C+5,0$	0,045	0,02	0,042
40	импульсные	4,3	2,0	0,027	0,05	2,52
41	Полупроводниковые диоды кремниевые выпрямительные	4,0	0,4	0,031	0,05	2,52
42	импульсные	4,3	2,0	0,084	0,025	3,28
43	переключающие	4,0	0,4	0,017	0,025	3,28
44	управ- ляемые Транзисторы:	3,1	22,0	0,1	0,025	3,28
45	германиевые	3,6	28,6	0,2	0,02	2,1
46	кремниевые	3,6	28,6	0,089	0,012	3,22

среды, допустимые по директивным материалам значения минимального и максимального коэффициента нагрузки для каждого типа элементов.

2. Определяем по каталогу, для каких типов элементов имеется широкая номенклатура с различными коэффициентами нагрузки.

3. Для остальных элементов выбираем по каталогу конкретные типы и подсчитываем их массу. Ориентировочно определяем массу механических конструкций, плат, разъемов и т. п.

4. Из общей массы РЭА вычитаем массы, вычисленные в п. 3, и полученную массу считаем заданной для элементов по п. 2. Если масса элементов по п. 2 составляет значительную часть от общей массы РЭА, то задача оптимального выбора коэффициентов нагрузки имеет смысл.

5. В соответствии с табл. 3.13 разбиваем элементы на группы, присваиваем каждой группе номер $j=1, 2, 3, \dots, r$. Внутри каждой группы располагаем элементы по нарастанию мощности и присваиваем им номер $i=1, 2, 3, \dots, n_j$. Первый номер имеет элемент с минимальной мощностью. Подсчитываем мощность, рассеиваемую каждой группой, $P_1, P_2, P_3, \dots, P_r$.

6. По формуле (3.72) определяем переменную составляющую массы элементов РЭА G_n . Значения коэффициентов d_j приведены в табл. 3.13.

7. По формуле (3.93) определяем массу каждой группы элементов $G_1, G_2, G_3, \dots, G_r$ и по формуле (3.83) их переменные составляющие $G_{1\pi}, G_{2\pi}, G_{3\pi}, \dots, G_{r\pi}$. Значения коэффициентов v_j, a_j, s_j, D_j приведены в табл. 3.13. Коэффициент c_j определяется по формуле (3.124).

8. Для каждой группы элементов выбираем число интервалов коэффициентов нагрузки $m_1, m_2, m_3, \dots, m_j$ и разбиваем группы на интервалы в соответствии с (3.101).

9. По формулам (3.100) и (3.102) определяем число элементов каждой группы, которые должны лежать в каждом интервале $n_{jl}, j=1, 2, 3, \dots, r; l=1, 2, 3, \dots, m_j$.

Таблица 3.14

Значения n_{jl}/n_j по формуле (3.102)

K	$0 \leq K < 0,1$	$0,1 \leq K < 0,2$	$0,2 \leq K < 0,3$	$0,3 \leq K < 0,4$	$0,4 \leq K < 0,5$	$0,5 \leq K < 0,6$	$0,6 \leq K < 0,7$	$0,7 \leq K < 0,8$	$0,8 \leq K < 0,9$	$0,9 \leq K < 1,0$
A										
$s = 0,76$										
1,1	0,01	0,0292	0,0469	0,0702	0,0954	0,1107	0,1207	0,1223	0,1109	0,2837
1,5	0,0198	0,0571	0,1044	0,1348	0,1568	0,1594	0,1357	0,1047	0,06569	0,06061
2	0,0392	0,1087	0,1818	0,2026	0,1924	0,1426	0,08036	0,03734	0,01165	0,00335
2,5	0,0582	0,1784	0,2517	0,239	0,1627	0,08091	0,02694	0,006538	0,0008	0
3	0,0861	0,2232	0,2841	0,2275	0,12517	0,04388	0,00869	0,001277	0	0
3,5	0,1306	0,3035	0,3206	0,1734	0,05582	0,009303	0,00072	0	0	0
4	0,1647	0,3769	0,3103	0,12211	0,02396	0,00195	0	0	0	0
4,5	0,2134	0,426	0,27602	0,07548	0,08765	0	0	0	0	0
5	0,2592	0,4628	0,2334	0,04186	0,002695	0	0	0	0	0
5,5	0,3023	0,4873	0,18773	0,021623	0,000743	0	0	0	0	0
6	0,356	0,4914	0,14255	0,009899	0	0	0	0	0	0
6,5	0,4114	0,4833	0,09921	0,004065	0	0	0	0	0	0
7	0,4566	0,46913	0,072434	0,001831	0	0	0	0	0	0
7,5	0,5084	0,44328	0,047709	0	0	0	0	0	0	0
8	0,5551	0,41378	0,03062	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,5852	0,39152	0,023179	0	0	0	0	0	0	0
9	0,643	0,34472	0,012259	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,6834	0,30915	0,007445	0	0	0	0	0	0	0
10	0,722	0,27391	0,00409	0	0	0	0	0	0	0
20	0,99501	0,00499	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 2,1$										
1,1	0,003	0,01	0,0292	0,0469	0,0702	0,1029	0,1403	0,1601	0,1624	0,2785
1,5	0,01	0,0292	0,0739	0,1235	0,1689	0,196	0,1841	0,13149	0,06246	0,02045
2	0,0198	0,0844	0,1624	0,2268	0,2341	0,17324	0,07861	0,018814	0,001781	0,00005
2,5	0,0392	0,1502	0,2563	0,279	0,19239	0,07063	0,011669	0	0	0
3	0,0676	0,2277	0,3256	0,2614	0,10113	0,015894	0	0	0	0
3,5	0,0952	0,3103	0,3599	0,19301	0,39347	0	0,002225	0	0	0
4	0,1393	0,3836	0,3484	0,11759	0,010943	0	0	0	0	0
4,5	0,1813	0,4434	0,31008	0,062741	0,00247	0	0	0	0	0
5	0,2289	0,4931	0,24928	0,02831	0	0	0	0	0	0
5,5	0,2811	0,519	0,18879	0,011055	0	0	0	0	0	0
6	0,3297	0,5308	0,13541	0,004085	0	0	0	0	0	0
6,5	0,3812	0,52438	0,092917	0	0	0	0	0	0	0
7	0,4345	0,50589	0,0592	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0,4883	0,47407	0,03518	0	0	0	0	0	0	0
8	0,537	0,44063	0,022345	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,5893	0,2879	0,012275	0	0	0	0	0	0	0
9	0,6321	0,36045	0,007449	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,677	0,3193	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,7192	0,278964	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,9953	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 2,35$										
1,1	0,0026	0,0074	0,0292	0,0377	0,071	0,0963	0,137	0,1695	0,174	0,2753
1,5	0,0078	0,0314	0,065	0,117	0,1723	0,201	0,1924	0,13583	0,005927	0,015
2	0,0198	0,0754	0,1565	0,2314	0,2471	0,17632	0,07691	0,015456	0,001095	0
2,5	0,0392	0,1255	0,2348	0,287	0,2122	0,0863	0,014175	0	0	0
3	0,0676	0,2206	0,3289	0,2699	0,09943	0,01316	0	0	0	0
3,5	0,0952	0,3103	0,3623	0,19532	0,0355	0	0	0	0	0
4	0,1393	0,3788	0,3557	0,1171	0,009	0	0	0	0	0
4,5	0,1813	0,4471	0,3102	0,05958	0,00184	0	0	0	0	0
5	0,2212	0,5018	0,2512	0,02605	0	0	0	0	0	0
5,5	0,2739	0,5262	0,1899	0,01	0	0	0	0	0	0
6	0,3297	0,537	0,1316	0,004	0	0	0	0	0	0
6,5	0,3874	0,5263	0,0853	0,001	0	0	0	0	0	0
7	0,4345	0,5088	0,0564	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0,4934	0,47421	0,032329	0	0	0	0	0	0	0
8	0,5416	0,43836	0,020025	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,5893	0,39959	0,011108	0	0	0	0	0	0	0
9	0,6358	0,3581	0,0061	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,6634	0,31357	0,003	0	0	0	0	0	0	0
10	0,7559	0,243275	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,99607	0,00303	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 2,52$										
1,1	0	0,01	0,0196	0,038	0,0717	0,0973	0,1446	0,1739	0,1751	0,2698
1,5	0	0,0392	0,065	0,117	0,1723	0,208	0,1966	0,13536	0,05426	0,01228
2	0,01	0,0576	0,1218	0,1918	0,2359	0,2143	0,124	0,03961	0	0
2,5	0,0392	0,1421	0,2588	0,2901	0,19772	0,0646	0	0	0	0
3	0,0582	0,2229	0,3398	0,2705	0,09749	0,010835	0	0	0	0

Продолжение табл. 3.14

K	$0 \leq K < 0,1$	$0,1 \leq K < 0,2$	$0,2 \leq K < 0,3$	$0,3 \leq K < 0,4$	$0,4 \leq K < 0,5$	$0,5 \leq K < 0,6$	$0,6 \leq K < 0,7$	$0,7 \leq K < 0,8$	$0,8 \leq K < 0,9$	$0,9 \leq K < 1,0$
A										
3,5	0,0952	0,3043	0,3751	0,19169	0,032596	0	0	0	0	0
4	0,1306	0,3875	0,3619	0,11177	0,008169	0	0	0	0	0
4,5	0,173	0,4517	0,3186	0,055197	0	0	0	0	0	0
5	0,2212	0,5008	0,25425	0,02355	0	0	0	0	0	0
5,5	0,2739	0,5341	0,18377	0	0	0	0	0	0	0
6	0,3229	0,5431	0,13126	0	0	0	0	0	0	0
6,5	0,375	0,53794	0,086335	0	0	0	0	0	0	0
7	0,4288	0,51507	0,055905	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0,4831	0,48386	0,032995	0	0	0	0	0	0	0
8	0,537	0,44355	0,01944	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,5893	0,40065	0,01	0	0	0	0	0	0	0
9	0,6321	0,36238	0	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,6802	0,31706	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,722	0,27664	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,99697	0,00303	0	0	0	0	0	0	0	0

 $s = 2,62$

1,1	0,0021	0,0079	0,0196	0,038	0,063	0,0983	0,1398	0,1729	0,1831	0,2753
1,5	0,01	0,0196	0,0656	0,1182	0,1678	0,2122	0,2047	0,13603	0,05476	0,01118
2	0,0198	0,0754	0,149	0,2338	0,2495	0,18792	0,0723	0,011455	0,000821	0
2,5	0,0392	0,1338	0,2615	0,2957	0,19985	0,06321	0,00659	0	0	0
3	0,058	0,2229	0,3583	0,2699	0,0796	0,0109	0	0	0	0
3,5	0,095	0,2983	0,3811	0,193	0,0315	0	0	0	0	0
4	0,1306	0,3728	0,3778	0,11135	0,0074	0	0	0	0	0
4,5	0,173	0,4591	0,3123	0,0543	0,00123	0	0	0	0	0
5	0,2212	0,501	0,25836	0,0195	0	0	0	0	0	0
5,5	0,2666	0,5355	0,18967	0	0	0	0	0	0	0
6	0,3229	0,5431	0,1315	0	0	0	0	0	0	0
6,5	0,375	0,5378	0,0864	0	0	0	0	0	0	0
7	0,4288	0,5167	0,0543	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0,4831	0,4845	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,5323	0,4486	0	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,5852	0,4048	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,6358	0,3587	0	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,68	0,317	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,722	0,2766	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

 $s = 2,80$

1,1	0,002	0,008	0,0196	0,0286	0,0637	0,0993	0,1412	0,1792	0,1859	0,2725
1,5	0,01	0,0196	0,0656	0,1103	0,1695	0,2143	0,2088	0,1392	0,0526	0,01005
2	0,0198	0,0663	0,1505	0,2308	0,2628	0,1869	0,0718	0,0107	0	0
2,5	0,0392	0,1338	0,2501	0,3044	0,2053	0,0617	0,0054	—	0	0
3	0,0582	0,2157	0,3432	0,278	0,0963	0,00896	0	0	0	0
3,5	0,0861	0,3074	0,3789	0,1971	0,0298	0	0	0	0	0
4	0,1306	0,3826	0,368	0,11206	0,00671	0	0	0	0	0
4,5	0,1647	0,46	0,3208	0,0535	0	0	0	0	0	0
5	0,2134	0,5086	0,2561	0,02181	0	0	0	0	0	0
5,5	0,267	0,5375	0,1877	0,0082	0	0	0	0	0	0
6	0,316	0,5526	0,129	0,0204	0	0	0	0	0	0
6,5	0,369	0,546	0,085	0,0007	0	0	0	0	0	0
7	0,429	0,519	0,052	0,00015	0	0	0	0	0	0
7,5	0,483	0,486	0,0308	0	0	0	0	0	0	0
8	0,532	0,449	0,018	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,589	0,402	0,009	0	0	0	0	0	0	0
9	0,632	0,363	0,005	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,677	0,321	0,002	0	0	0	0	0	0	0
10	0,719	0,28	0,001	0	0	0	0	0	0	0
20	0,997	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0

 $s = 3,22$

1,1	0,0012	0,0088	0,0098	0,029	0,0554	0,0933	0,1455	0,1893	0,2006	0,2671
1,5	0	0,0296	0,0473	0,1125	0,173	0,2228	0,2247	0,14081	0,04377	0,00552
2	0,01	0,0669	0,1443	0,2409	0,2734	0,1924	0,0646	0,0073	0	0
2,5	0,0296	0,1267	0,0331	0,5435	0,2087	0,0547	0,00366	0,00005	0	0
3	0,0582	0,2084	0,3505	0,2866	0,0896	0,0067	0,00005	0	0	0
3,5	0,0861	0,2951	0,3979	0,1961	0,0244	0,0003	0	0	0	0
4	0,1722	0,3687	0,3858	0,1063	0,0045	0	0	0	0	0
4,5	0,1647	0,4562	0,3313	0,0427	0,0006	0	0	0	0	0
5	0,2055	0,5192	0,257	0,0183	0	0	0	0	0	0
5,5	0,2592	0,549	0,1835	0,0055	0	0	0	0	0	0
6	0,3093	0,5632	0,126	0,0015	0	0	0	0	0	0
6,5	0,3687	0,5532	0,078	0,0003	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 3.14

K	$0 \leq K < 0,1$	$0,1 \leq K < 0,2$	$0,2 \leq K < 0,3$	$0,3 \leq K < 0,4$	$0,4 \leq K < 0,5$	$0,5 \leq K < 0,6$	$0,6 \leq K < 0,7$	$0,7 \leq K < 0,8$	$0,8 \leq K < 0,9$	$0,9 \leq K < 1,0$
A										
7	0,4231	0,5281	0,0487	0,0001	0	0	0	0	0	0
7,5	0,478	0,4941	0,028	0	0	0	0	0	0	0
8	0,5323	0,4511	0	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,581	0,4108	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,6321	0,3638	0	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,6802	0,31796	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,722	0,2771	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,9975	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 3,28$										
1,1	0	0,01	0,0098	0,029	0,0643	0,0924	0,1505	0,1947	0,2027	0,2466
1,5	0	0,0296	0,0473	0,1044	0,1682	0,2231	0,2109	0,1615	0,04892	0,0061
2	0,01	0,0669	0,1365	0,2378	0,279	0,197	0,066	0,0066	0,00014	0
2,5	0,0296	0,1267	0,2492	0,322	0,2129	0,0563	0,0335	0	0	0
3	0,0488	0,2104	0,3342	0,30734	0,0925	0	0	0	0	0
3,5	0,0861	0,2951	0,3922	0,2009	0,0254	0	0	0	0	0
4	0,1219	0,3815	0,3836	0,1085	0,00451	0	0	0	0	0
4,5	0,1563	0,4646	0,3293	0,04918	0,000611	0	0	0	0	0
5	0,2055	0,5165	0,2593	0,01864	0	0	0	0	0	0
5,5	0,2592	0,5488	0,1859	0,061	0	0	0	0	0	0
6	0,3093	0,5632	0,1258	0,00167	0	0	0	0	0	0
6,5	0,3624	0,5579	0,07925	0,00041	0	0	0	0	0	0
7	0,4231	0,5291	0,04775	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0,4727	0,4994	0,0279	0	0	0	0	0	0	0
8	0,5323	0,4527	0,014998	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,5852	0,40735	0,00745	0	0	0	0	0	0	0
9	0,6321	0,3642	0,0037	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,6802	0,31796	0,00184	0	0	0	0	0	0	0
10	0,7247	0,2746	0,0007	0	0	0	0	0	0	0
20	0,9978	0,0022	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 4$										
1,1	0	0	0,01	0,039	0,038	0,08	0,139	0,203	0,229	0,182
1,5	0	0,02	0,038	0,098	0,167	0,245	0,251	0,145	0,034	0,0018
2	0,01	0,048	0,139	0,237	0,301	0,207	0,054	0,003	0	0
2,5	0,03	0,11	0,254	0,339	0,221	0,045	0,0014	0	0	0
3	0,049	0,195	0,357	0,312	0,083	0,0034	0	0	0	0
3,5	0,077	0,285	0,419	0,2	0,017	0	0	0	0	0
4	0,104	0,384	0,407	0,102	0,002	0	0	0	0	0
4,5	0,148	0,465	0,346	0,041	0,0002	0	0	0	0	0
5	0,181	0,549	0,258	0,012	0	0	0	0	0	0
5,5	0,244	0,571	0,181	0,003	0	0	0	0	0	0
6	0,302	0,58	0,117	0,0007	0	0	0	0	0	0
6,5	0,356	0,572	0,072	0,0002	0	0	0	0	0	0
7	0,411	0,546	0,043	0	0	0	0	0	0	0
7,5	0,432	0,513	0,025	0	0	0	0	0	0	0
8	0,528	0,461	0,011	0	0	0	0	0	0	0
8,5	0,573	0,421	0,007	0	0	0	0	0	0	0
9	0,617	0,38	0,003	0	0	0	0	0	0	0
9,5	0,664	0,335	0,002	0	0	0	0	0	0	0
10	0,711	0,289	0,0003	0	0	0	0	0	0	0
20	0,998	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0

Для облегчения расчетов формула (3.102) табулирована. Расчеты выполнены для $A_j=1,1-20$, $s_j=0,76-4,0$ и наиболее часто встречающейся разбивки интервалов по коэффициентам нагрузки через 0,1. Результаты расчетов в виде отношений n_{jl}/n_j приведены в табл. 3.14, нули в таблицах соответствуют очень малым значениям отношений.

10. С помощью правила на стр. 111 определяют интервалы коэффициентов нагрузки для каждого элемента РЭА.

11. По каталогу выбирают элементы РЭА так, чтобы их коэффициенты нагрузки соответствовали п. 10.

Если по каким-либо причинам нельзя воспользоваться табл. 3.13, то необходимо рассчитать значения коэффициентов в формулах (3.121) и (3.122) с помощью (3.125)–(3.131). Если нельзя воспользоваться данными табл. 3.14, то число элементов, лежащих в каждом интервале

n_{jl} , определяют по одной из формул (3.104), (3.115) или (3.116). Области применения каждой из этих формул устанавливаются в соответствии с табл. 3.12.

В заключение следует заметить, что применение описанного в этом параграфе метода определения оптимальных коэффициентов нагрузки элементов к некоторым ранее сконструированным без учета оптимального выбора коэффициентов нагрузки блоков РЭА позволяет уменьшить интенсивность отказов элементов в 1,2—5 раз, а блока РЭА в целом (т. е. с учетом наличия элементов, для которых не применима методика) на 10—60%.

Пример. Необходимо выбрать оптимальные коэффициенты нагрузки для элементов блока РЭА.

1. Исходные данные: масса блока РЭА 8,66 кг, масса радиоэлементов 7,26 кг, масса конструктивных элементов 1,4 кг; мощности рассеивания и типы элементов указаны в п. 2. Количество элементов 341, из них: резисторов 176, конденсаторов 61, трансформаторов 7, дросселей 2, полупроводниковых диодов 41, транзисторов 54. Средняя температура воздуха в блоке $T_c=327$ К (54°C), коэффициенты нагрузки для всех элементов могут быть выбраны в пределах 0—1.

2. Определяем по каталогу типы элементов, для которых имеется широкая номенклатура с различными коэффициентами нагрузки, и устанавливаем, что оптимальному выбору коэффициентов нагрузки подлежат следующие 254 элемента:

159 резисторов с рассеиваемой мощностью (1)	7,29 Вт	23 германиевых транзистора с рассеиваемой мощностью (45)	38 Вт
2 резистора с рассеиваемой мощностью (9)	0,2 Вт	5 кремниевых транзисторов с рассеиваемой мощностью (46)	6,5 Вт
5 резисторов с рассеиваемой мощностью (9)	6 Вт	17 конденсаторов с суммарным напряжением (27)	2142 В
4 резистора с рассеиваемой мощностью (8)	0,002 Вт	2 конденсатора с суммарным напряжением (15)	90 В
19 выпрямительных диодов с рассеиваемой мощностью (42)	0,19 Вт	5 конденсаторов с суммарным напряжением (18)	315 В
13 импульсных диодов с рассеиваемой мощностью (43)	0,004 Вт		

3. Для остальных элементов выбираем по каталогу их типы и определяем их массу — 4,054 кг.

4. Из общей массы элементов РЭА вычитаем массу по п.3

$$G = 7,26 - 4,054 = 3,206 \text{ кг при } n = 254.$$

Эта масса составляет значительную часть от общей массы РЭА, следовательно, оптимальный выбор коэффициентов нагрузки имеет смысл.

5. В п.2 мы уже разбили элементы по группам и привели мощности каждой группы. Номер группы в соответствии с табл. 3.13 проставлен в скобках против каждого наименования в п.2. В соответствии с п.5 методики расчета для 9-й группы номера 1 и 2 присваиваем резисторам типа С5-5, а номера 3—7 — резисторам типа ПЭВ. В остальных группах нумерация может быть произвольная, так как мощности, рассеиваемые элементами, одинаковы.

6. Пользуясь значениями коэффициентов d_j из табл. 3.13, по формуле (3.72) определяем переменную составляющую массы элементов РЭА:

$$G_n = 3,206 - \sum_{j=1}^r n_j d_j = 2,286 \text{ кг.}$$

7. По формуле (3.93) определяем массу каждой группы элементов и по формуле (3.83) — переменную составляющую массы (номера групп соответствуют п.2):

- Группа 1 $G_1 = G_{1n} = 0,391$ кг,
 8 $G_8 = G_{8n} = 0,006$ кг,
 9 $G_9 = 0,15$ кг, $G_{9n} = 0,139$ кг,
 15 $G_{15} = 0,134$ кг, $G_{15n} = 0,054$ кг,
 18 $G_{18} = 0,045$ кг, $G_{18n} = 0,025$ кг,
 27 $G_{27} = 0,220$ кг, $G_{27n} = 0,255$ кг,
 42 $G_{42} = 0,114$ кг, $G_{42n} = 0,076$ кг,
 43 $G_{43} = 0,009$ кг, $G_{43n} = 0,004$ кг,
 45 $G_{45} = 1,841$ кг, $G_{45n} = 1,183$ кг,
 46 $G_{46} = 0,292$ кг, $G_{46n} = 0,149$ кг.

8. В соответствии с данными п.1 и (3.101) для всех групп элементов разбиваем значения коэффициентов нагрузки на 10 интервалов, т. е. 0—0,1; 0,1—0,2 и т. д.

9. По табл. 3.12 определяем число элементов каждой группы, которые должны иметь значения коэффициентов нагрузки в соответствии с выбранными интервалами. Результаты расчетов приведены в табл. 3.15.

10. Правило на стр. 111 в данном случае не используется.

11. По каталогу выбираем элементы так, чтобы их коэффициенты нагрузки соответствовали табл. 3.13.

Таблица 3.15

Результаты расчета оптимальных коэффициентов нагрузки

i-номер группы элементов	A_i	s_i	K_H						
			0—0,1	0,1—0,2	0,2—0,3	0,3—0,4	0,4—0,5	0,5—0,6	0,6—0,7
1	22,3	2,35	159	0	0	0	0	0	0
8	9,35	0,76	1	1	0	0	0	0	0
9	326	2,35	7	0	0	0	0	0	0
15	6	2,62	1	1	0	0	0	0	0
18	14	2,62	4	1	0	0	0	0	0
27	1,8	2,62	1	1	3	4	4	3	1
42	93	3,28	19	0	0	0	0	0	0
43	25	3,28	13	0	0	0	0	0	0
45	8,6	2,1	14	7	2	0	0	0	0
46	6,3	3,22	2	3	0	0	0	0	0

Мы разобрали первую постановку задачи оптимального выбора коэффициентов нагрузки. Рассмотрим, как решается задача при второй постановке, которая, напомним, формулируется следующим образом: выбрать коэффициенты нагрузки элементов, обеспечивающие минимальную массу РЭА при заданной ее надежности. Все допущения и приемы решения, которые мы описали выше, используются и при решении этой задачи. Для решения задачи распределения интенсивности отказов между группами элементов функция Лагранжа записывается в виде

$$\Phi = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}} + d_j \right) + \varphi \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} (e_j + c_j K_{ij}).$$

Частные производные от этой функции приравняем нулю и получим

$$\frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}^2} = \varphi c_j, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_j; \quad r = 1, 2, 3, \dots, r. \quad (3.132)$$

Складывая почленно n уравнений (3.132), найдем неопределенный множитель

$$\varphi = \frac{1}{\lambda_n} \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \frac{a_j P_{ij}}{K_{ij}^2}, \quad (3.133)$$

где

$$\lambda_n = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij}. \quad (3.134)$$

Из (3.132) получим

$$K_{ij} = \sqrt{a_j P_{ij} / \varphi c_j}$$

и, подставляя это выражение в (3.134), имеем

$$\lambda_n = \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{a_j c_j P_{ij}}. \quad (3.135)$$

Перейдем от дискретных к непрерывным величинам

$$\sum_{i=1}^{n_j} \sqrt{a_j c_j P_{ij}} = n_j \sqrt{a_j c_j} \int_0^{\infty} \sqrt{P} b_j e^{-b_j P} dP = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{a_j c_j P_j n_j}. \quad (3.136)$$

После подстановки (3.136) в (3.135)

$$\lambda_n = \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \sum_{j=1}^r \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{a_j c_j P_j n_j}. \quad (3.137)$$

По аналогии с (3.134)

$$\lambda_{jn} = \sum_{i=1}^{n_j} c_j K_{ij} \quad (3.138)$$

и, решая совместно (3.132), (3.136) и (3.138),

$$\lambda_{jn} = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \sqrt{\varphi}} \sqrt{a_j c_j P_j n_j}. \quad (3.139)$$

Разделив почленно (3.139) на (3.137) и прибавив постоянную составляющую, получим

$$\lambda_j = \lambda_n \frac{\sqrt{a_j c_j P_j n_j}}{\sum_{j=1}^r \sqrt{a_j c_j P_j n_j}} + n_j e_j. \quad (3.140)$$

Формула (3.140) служит для оптимального распределения интенсивности отказов между группами элементов. Если сравнить ее с (3.93), то легко обнаружить их идентичность. Для решения задачи определения оптимальных коэффициентов нагрузки элементов функция Лагранжа имеет вид

$$\Phi_i = \sum_{i=1}^r \left(\frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}} + d_i \right) + \varphi_i B_i \sum_{i=1}^r \exp(s_i K_{ij}). \quad (3.141)$$

Приравнивая частные производные (3.141) нулю, получаем

$$\frac{a_i P_{ij}}{K_{ij}^2} = \varphi_i B_i s_i \exp(s_i K_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (3.142)$$

и, складывая почленно r уравнений (3.142), определяем

$$\varphi = \frac{a_j}{s_j \lambda_j} \sum_{i=1}^r \frac{P_{ji}}{K_{ji}^2}, \quad (3.143)$$

$$P_{ji} = \frac{\varphi_j B_j s_j}{a_j} K_{ji}^2 \exp(s_j K_{ji}). \quad (3.144)$$

Используя те же рассуждения, что и при выводе формул (3.96) — (3.100), получаем

$$f_j(K) = M_j K e^{s_j K} (2 + s_j K) \exp(-MK^2 e^{s_j K}), \quad (3.145)$$

$$\lambda_j = n_j B_j \int_0^\infty e^{s_j K} f_j(K) dK. \quad (3.146)$$

Совместное решение этих двух уравнений с двумя неизвестными [M_j и $f_j(K)$] позволит определить дифференциальный закон распределения оптимальных коэффициентов нагрузки. Если сравнить (3.100) с (3.145), то нетрудно убедиться, что закон распределения имеет тот же характер.

В результате решения уравнений (3.145) и (3.146) на ЭВМ можно предложить аппроксимацию

$$M_j = \frac{0,1872 I_j}{D_j^{0,975} \left(\lg \frac{D_j}{0,9286} \right)^2}, \quad (3.147)$$

где $D_j = \lambda_j / B_j n_j$.

Смысъ коэффициента D_j такой же, как и ранее введенного A_j . Действительно, коэффициент A_j показывает отношение заданного для группы элементов веса к минимально возможному, а D_j — отношение заданной интенсивности отказов к минимально возможной. Если воспользоваться приближенной формулой (3.80), можно, как и в предыдущей задаче, получить приближенное значение распределения коэффициентов нагрузки в форме распределения Релея. Не приводя промежуточных выкладок, покажем вид этого распределения:

$$f(K) = \frac{\pi n^2 I_j c^2}{4 \lambda_j^2} K \exp \left(-\frac{\pi n^2 I_j c^2}{8 \lambda_j^2} K^2 \right). \quad (3.148)$$

Формулы (3.145) и (3.146) и упрощенная формула (3.148) позволяют определить дифференциальный закон распределения оптимальных коэффициентов нагрузки для элементов РЭА.

Все остальные операции в этой задаче такие же, как и в предыдущей, и мы их повторять не будем.

3.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МИКРОМИНИАТЮРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Этот вопрос рассмотрим на примере проектирования гибридных интегральных схем (ГИС). Оно предусматривает, во-первых, выбор стандартной (или разработку новой) конструкции и, во-вторых, разработку топологии. Под конструкцией понимается разработка корпуса

ГИС с установленной подложкой. Разработка топологии состоит в определении размещения элементов ГИС внутри корпуса [43—45].

На этапе эскизного проектирования при выборе конструкции топологии еще не известна и поэтому тепловой режим ГИС может быть рассчитан только приближенно. Выбор конструкции производится с учетом зависимости теплового режима от конструктивных и теплофизических параметров ГИС.

Разработка топологии состоит в обеспечении схемотехнических и эксплуатационных требований к ГИС, главнейшими из которых являются требования по надежности и плотности монтажа элементов.

Заданным требованиям по надежности соответствуют ограничения по максимальному допустимым температурам элементов (заданный тепловой режим) ГИС. С другой стороны, минимально возможные температуры элементов ограничены заданной плотностью монтажа. При оптимизации топологии ГИС по одному или группе параметров (например, по плотности монтажа элементов), также должен обеспечиваться заданный тепловой режим. Следовательно, при разработке и оптимизации топологии ГИС необходимо применять методику проектирования топологии с учетом заданного теплового режима.

Максимально возможный перегрев на поверхности подложки можно оценить по формуле $\vartheta_{R \max} = r_t W_{\max}$, где W_{\max} — максимальная плотность тепловыделений на поверхности подложки ГИС.

Соответственно максимально возможный перегрев пленочных резисторов, вызванный действием выделяемой в них мощности,

$$\vartheta_{R \max} = r_t W_{0 \max}, \quad (3.149)$$

где $W_{0 \max}$ — максимальная допустимая удельная мощность рассеяния (поверхностная плотность тепловыделений) пленочных резисторов.

В современных конструкциях ГИС обычно $W_{\max} = W_{0 \max}$, поэтому максимальная допустимая удельная мощность рассеяния пленочных резисторов $W_{0 \max}$ во многом определяет достижимую плотность монтажа элементов ГИС. Величина $W_{0 \max}$ не может быть оговорена заранее и определяется в каждом конкретном случае заданным тепловым режимом, так как она зависит от максимального допустимых температур навесных и пленочных элементов, температуры корпуса (условий охлаждения) ГИС и некоторых других факторов, рассматриваемых ниже.

Максимально допустимые температуры $T_{\max \text{ доп}}$ элементов ГИС определяются из требований по надежности. Обычно ограничивают значения $T_{\max \text{ доп}}$ в пределах: для навесных полупроводниковых бескорпусных элементов $T_{\max \text{ доп}} = 358 \text{ K} (+85^\circ\text{C})$, для пленочных конденсаторов $T_{\max \text{ доп}} = 398 \text{ K} (+125^\circ\text{C})$. Для пленочных резисторов верхний предел $T_{R \max \text{ доп}}$ не оговаривается.

Следовательно, в ГИС наиболее критичны к температурному воздействию (термокритичны) навесные полупроводниковые элементы. Величину максимально возможной температуры навесного (термокритичного) элемента T_{\max} можно оценить следующим образом.

В случае произвольной с точки зрения тепловых режимов топологии ГИС термокритичные элементы могут располагаться в непосредственной близости от других тепловыделяющих элементов:

$$T'_{\max} = T_k + \vartheta_{\max} + P_{\max} R_{\text{твн}}, \quad (3.150)$$

где $P_{\text{н max}}$ — максимальная мощность, рассеиваемая в наиболее нагруженном навесном элементе; $R_{\text{т вн}}$ — внутреннее тепловое сопротивление навесного элемента.

В случае расположения элементов таким образом, что каждый термокритичный элемент находится вне зон влияния других элементов, то

$$T''_{\text{н max}} = T_{\text{k}} + P_{\text{н max}} R_{\text{тн}}, \quad (3.151)$$

где $R_{\text{тн}}$ — тепловое сопротивление между $p-n$ -переходом навесного элемента и корпусом ГИС.

Выражение для расчета величины $R_{\text{тн}}$ получим из (3.83) с учетом (3.53):

$$R_{\text{тн}} = \frac{r_{\text{т}}}{S_{\text{н}}} r (K_L \delta_{1\text{н}}, K_L \delta_{2\text{н}}) + R_{\text{т вн}}, \quad (3.152)$$

где $S_{\text{н}} = 4\delta_{1\text{н}}\delta_{2\text{н}}h^2 = 4\Delta_{1\text{н}}\Delta_{2\text{н}}$ — площадь основания навесного элемента.

Величина максимально возможной температуры пленочных элементов оценивается следующим образом:

для пленочных резисторов

$$T'_{R \text{ max}} = T_{\text{k}} + \vartheta_{\text{max}} \quad (3.153)$$

или

$$T''_{R \text{ max}} = T_{\text{k}} + \vartheta_{R \text{ max}}; \quad (3.154)$$

для пленочных конденсаторов

$$T'_{c \text{ max}} = T_{\text{k}} + 0,5\vartheta_{\text{max}} \quad (3.155)$$

или

$$T''_{c \text{ max}} = T_{\text{k}}. \quad (3.156)$$

Формулы (3.154) и (3.156) относятся к случаю, когда рассматриваемый пленочный элемент находится вне зон влияния других элементов.

Выражения (3.150) — (3.156) позволяют оценить максимально возможные температуры элементов при наиболее нагруженном и облегченном тепловых режимах термокритичных элементов. Параметры W_{max} , $R_{\text{н max}}$ и T_{k} , определяющие тепловой режим в выбранной ($r_{\text{т}}$) конструкции ГИС при оговоренной номенклатуре навесных элементов ($R_{\text{т вн}}$), в этом случае являются заданными.

При проектировании топологии ГИС по заданному тепловому режиму встречается также обратная задача: необходимо оценить максимально допустимые значения W_{max} , $R_{\text{н max}}$ и T_{k} при заданных максимально допустимых температурах элементов.

Выражения для оценки W_{max} , $R_{\text{н max}}$, $T_{\text{k max}}$ получим из (3.150) и (3.151) с учетом (3.149):

$$W'_{\text{max}} = \frac{T_{\text{н max доп}} - P_{\text{н max}} R_{\text{т вн}} - T_{\text{k}}}{r_{\text{т}}}, \quad (3.157)$$

$$W''_{\text{max}} = \frac{T_{R \text{ max доп}} - T_{\text{k}}}{r_{\text{т}}}, \quad (3.158)$$

$$P'_{\text{н max}} = \frac{T_{\text{н max доп}} - \vartheta_{\text{max}} - T_{\text{k}}}{R_{\text{т вн}}}, \quad (3.159)$$

$$P''_{\text{н max}} = \frac{T_{\text{н max доп}} - T_{\text{k}}}{R_{\text{т н}}}, \quad (3.160)$$

$$T'_{\text{k max}} = T_{\text{н max доп}} - r_{\text{t}} W_{\text{max}} - P_{\text{н max}} R_{\text{т вн}}, \quad (3.161)$$

$$T''_{\text{k max}} = T_{\text{н max доп}} - P_{\text{н max}} R_{\text{т вн}}. \quad (3.162)$$

Пример. Оценим величину W_{max} для конструкции ГИС, описанной в примере § 3.3: $r_{\text{t}} = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, $R_{\text{т вн}} = 800 \text{ К/Вт}$, $R_{\text{т н}} = 1300 \text{ К/Вт}$ при $T_{\text{н max доп}} = 358 \text{ К}$, $T_{\text{к max доп}} = 423 \text{ К}$, $P_{\text{н max}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$.

1. При произвольном расположении элементов ГИС, задавшись температурой корпуса, получим

$T_{\text{k}}, \text{К}$	353	348	343	338	333
$W''_{\text{max}} \cdot 10^{-4}, \text{Вт/м}^2$	0,2	0,9	1,6	2,3	3

2. Если термокритичные элементы находятся вне зон влияния других элементов ГИС, то при наихудших условиях охлаждения $T_{\text{k}} = T_{\text{k max}} = 358 - 3,5 = 354,5 \text{ К}$,

$$W''_{\text{max}} = \frac{423 - 354,5}{0,73 \cdot 10^{-3}} = 9,4 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

При интенсификации охлаждения W''_{max} увеличивается

$T_{\text{k}}, \text{К}$	353	348	343	338	333
$W''_{\text{max}} \cdot 10^{-4}, \text{Вт/м}^2$	9,6	10,3	11	11,6	12,3

При проектировании ГИС необходимо разработать или выбрать из имеющихся такую конструкцию, которая позволила бы обеспечить заданный тепловой режим. Качество конструкции ГИС с точки зрения тепловых режимов можно оценить ее термическим сопротивлением r_{t} : чем меньше r_{t} , тем лучше конструкция.

Выражения для оценки величины термического сопротивления r_{max} конструкции, при которой еще обеспечивается заданный тепловой режим, получим из (3.157) – (3.162) с учетом (3.152).

В случае произвольной с точки зрения тепловых режимов топологии ГИС

$$r'_{\text{т max}} = \frac{T_{\text{н max доп}} - T_{\text{k}} - P_{\text{н max}} R_{\text{т вн}}}{W_{\text{max}}}. \quad (3.163)$$

В случае расположения элементов таким образом, что каждый термокритичный элемент находится вне зон влияния других элементов, то

$$r''_{\text{т max}} = \min \{r''_{\text{т max R}}, r''_{\text{т max н}}\}, \quad (3.164)$$

$$r''_{\text{т max R}} = \frac{T_{\text{R max доп}} - T_{\text{k}}}{W_{\text{max}}}, \quad (3.165)$$

$$r''_{\text{т max н}} = \frac{S_{\text{н}} (T_{\text{н max доп}} - T_{\text{k}} - P_{\text{н max}} R_{\text{т вн}})}{P_{\text{н max}} r (K_{\text{L}} \delta_{\text{LH}}, K_{\text{D}} \delta_{\text{D}})}. \quad (3.166)$$

Навесные полупроводниковые элементы ГИС имеют размеры основания, сравнимые с толщиной подложки. Поэтому выражение (3.166) можно приближенно записать в виде

$$r''_{\text{т max н}} \approx (S_{\text{н}} / P_{\text{н max}}) (T_{\text{н max доп}} - T_{\text{k}} - P_{\text{н max}} R_{\text{т вн}}). \quad (3.167)$$

Выражения (3.163) — (3.167) позволяют рассчитать величину $r_t \max$ из условия обеспечения заданного теплового режима. Параметры W_{\max} , R_{\max} , T_k и $R_{\text{ви}}$ в этом случае являются заданными.

Рассмотрим далее зависимость термического сопротивления от конструктивных и теплофизических характеристик ГИС:

для незалитых конструкций ГИС

$$r_t = (h_n/\lambda_k) = (h_n/\lambda_{k1}); \quad (3.168)$$

для залитых конструкций ГИС

$$r_{t3} = \frac{r_t (h_3/\lambda_{k1})}{r_t + (h_3/\lambda_{k1})} = \frac{r_t h_3}{r_t \lambda_{k1} + h_3}, \quad (3.169)$$

где h_3 — толщина слоя компаунда между поверхностью подложки и крышкой ГИС; λ_{k1} — коэффициент теплопроводности компаунда, используемого для заливки.

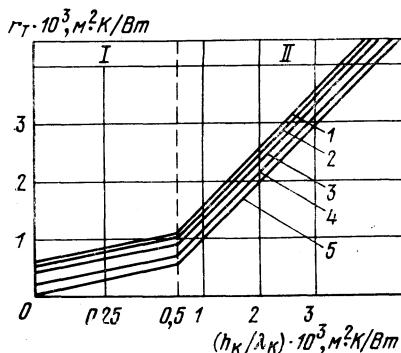


Рис. 3.27. Зависимость $r_t = f(h_k/\lambda_k)$ при:
1) $h_n=0,6$ мм, $\lambda_n=1$ Вт/м · К (стекло); 2) $h_n=-1,6$ мм, $\lambda_n=3$ Вт/м · К (глазурованная керамика); 3) $h_n=0,6$ мм, $\lambda_n=1,5$ Вт/м · К (сталь); 4) $h_n=0,6$ мм, $\lambda_n=3$ Вт/м · К; 5) $h_n=-0,6$ мм, $\lambda_n=30$ Вт/м · К («Поликор»).

На рис. 3.27 приведены зависимости $r_t = f(h_k/\lambda_k)$ для распространенных незалитых конструкций ГИС: область I соответствует конструкциям ГИС типа II-3, а область II — конструкциям типа II-2 (см. § 3.3).

На рис. 3.28 приведены зависимости $r_t = f(h_3/\lambda_{k1})$ при $\lambda_k = 0,3$ Вт/м · К для распространенных залитых конструкций ГИС. Из рисунка видно, что конструкции ГИС типа II-3 обладают значительно меньшим термическим сопротивлением, чем конструкции типа II-2. Наименьшая величина r_t наблюдается в конструкциях с корпусом — подложкой, у которых $h_k/\lambda_k \approx 0$.

Применение теплопроводных компаундов с $\lambda \approx 2$ Вт/м · К позволяет уменьшить термическое сопротивление для конструкций типа II-3 в 1,4—4 раза, а для конструкций типа II-2 — в 3,5—7 раз. Особенно большой эффект достигается при использовании подложек с относительно большим коэффициентом теплопроводности.

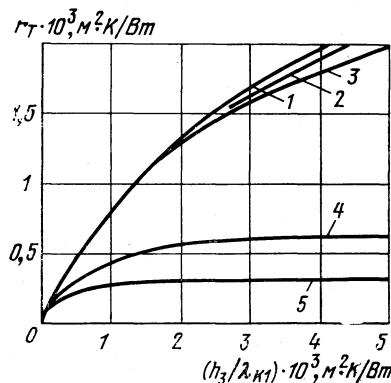


Рис. 3.28. Зависимость $r_t = f(h_3/\lambda_{k1})$ при:
1) $h_n=1,6$ мм, $h_k=1$ мм, $\lambda_n=3$ Вт/м · К; 2) $h_n=-0,6$ мм, $h_k=1$ мм, $\lambda_n=1,5$ Вт/м · К; 3) $h_n=0,6$ мм, $h_k=1$ мм, $\lambda_n=30$ Вт/м · К; 4) $h_n=-0,6$ мм, $h_k=0,1$ мм, $\lambda_n=1,5$ Вт/м · К; 5) $h_n=0,6$ мм, $h_k=0,1$ мм, $\lambda_n=30$ Вт/м · К.

Уменьшение толщины подложки с $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $0,6 \cdot 10^{-3}$ м приводит к снижению величины r_t в 1,1—1,7 раза. Значительный выигрыш дает применение тонких подложек в конструкциях типа II-3.

Увеличение коэффициента теплопроводности подложки с 1 до 30 Вт/м·К при использовании распространенных kleев и компаундов ($\lambda_k = 0,25$ —0,4 Вт/м·К) позволяет снизить термическое сопротивление в 1,1—1,2 раза в конструкциях типа II-2 и в 2,5—3,5 раза в конструкциях типа II-3. При использовании теплопроводного компаунда увеличение теплопроводности подложки приводит к снижению величины соответственно в 2 и 7 раз.

Заливка внутреннего объема микросхемы распространенными компаундами практически не снижает термического сопротивления конструкций типа II-3, а в конструкциях типа II-2 (при $h_3 = 1 \cdot 10^{-3}$ м) величина r_t снижается в 2—3,5 раза. Применение для этой цели теплопроводного компаунда позволяет снизить r_t конструкций типа II-3 в 1,7—3,5 раза, конструкций типа II-2 — в 6—9 раз.

Из проведенного анализа следует, что тепловые характеристики существующих конструкций ГИС могут быть значительно улучшены. Например, при применении в распространенной конструкции ГИС типа II-3 ($h_{\pi} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, $h_k = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м, $\lambda_n = 1,5$ Вт/м·К, $\lambda_k = 0,3$ Вт/м·К) поликоровой подложки и теплопроводного компаунда величину r_t можно уменьшить более чем в 10 раз. Проведение аналогичной замены в металлополимерной конструкции ГИС с параметрами $h_n = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м, $h_k = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\lambda_n = 3$ Вт/м·К; $\lambda_k = 0,3$ Вт/м·К уменьшает величину r_t примерно в 7 раз, а при заливке (дополнительно) внутреннего объема ГИС теплопроводным компаундом ($h_3 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м) r_t уменьшается более чем в 14 раз. Другими словами, при соответствующем конструировании ГИС только за счет уменьшения r_t можно повысить максимально допустимую плотность тепловыделений на подложке W_{\max} в 7—14 раз.

Проектирование пленочных резисторов предусматривает расчет их геометрических размеров и размещения на подложке. Минимально допустимые размеры резисторов определяются по формуле

$$b_p \geq \sqrt{\bar{P}_{p_0} / W_{0\max} R}, \quad (3.170)$$

где b_p — ширина резистора; R — номинал резистора; $W_{0\max}$ — допустимая удельная мощность рассеяния в резистивной пленке — вспомогательная расчетная величина, определяемая из условия обеспечения заданного теплового режима. Величину $W_{0\max}$ можно определить из соотношений (3.157) и (3.158). В случае произвольной с точки зрения тепловых режимов топологии

$$W'_{0\max} = W'_{\max} - W_{\max n}, \quad (3.171)$$

где $W'_{\max n}$ — максимально возможная удельная мощность рассеяния на основании навесных элементов ГИС.

В случае расположения элементов таким образом, что каждый термокритичный элемент находится вне зон влияния других элементов,

$$W''_{0\max} = W''_{\max}. \quad (3.172)$$

Выбор величин W_{\max} и $W_{0\max}$ при проектировании топологии ГИС производится исходя из схемотехнических требований с учетом ограничений

чений, обусловленных, с одной стороны, заданным тепловым режимом, с другой — минимально возможными размерами элементов. Если $W_{\max} \leq W'_{\max}$, то заданный тепловой режим обеспечивается при произвольном с точки зрения тепловых режимов проектирования топологии. В этом случае для повышения плотности монтажа элементы ГИС располагаются максимально близко друг к другу. Если $W'_{\max} < W_{\max} < W''_{\max}$, то заданный тепловой режим обеспечивается при создании зон защиты. Зоной защиты обычно называют свободную от тепловыделяющих элементов часть поверхности подложки, окружающую один или несколько термокритичных элементов и предназначенную для ослабления теплового влияния на них.

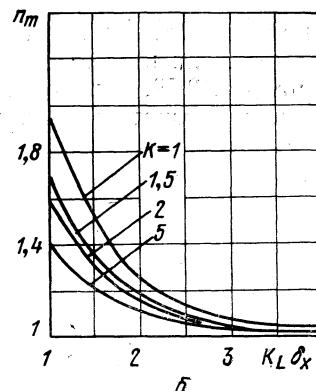
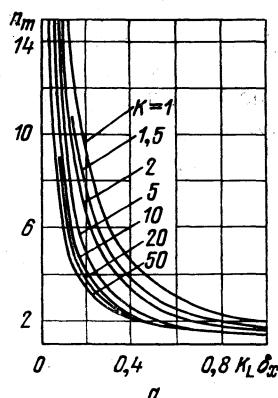


Рис. 3.29. Зависимость $n_m = f(K_L \delta_x, K)$.

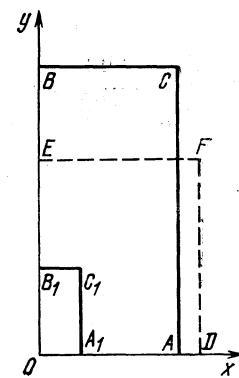


Рис. 3.30. Схема зоны теплового действия резистора.

Проектирование резисторов по формуле (3.170) с учетом соотношений (3.171), (3.172) обеспечивает получение заданного теплового режима с некоторым запасом, так как предполагается, что область расположения резисторов представляет собой сплошной неограниченный источник тепла с равномерно распределенной по поверхности плотностью тепловыделений, равной $W_{0\max}$. Это допущение позволяет определить $W_{0\max}$ при произвольном размещении резисторов относительно друг друга и при любых размерах и конфигурации области, на которой производится размещение резисторов. При компактном размещении резисторов с примерно одинаковой удельной мощностью рассеяния погрешность, вносимая этим допущением, невелика и быстро уменьшается по мере увеличения плотности монтажа элементов ГИС. Однако в практике проектирования нередки случаи, когда ввиду технологических ограничений по минимально возможным размерам один или несколько резисторов с $W = W_{0\max}$ окружены резисторами с относительно низкой удельной мощностью рассеяния. Покажем, что в этом случае имеется возможность уменьшения размеров мощных резисторов без нарушения требований к тепловым режимам.

Перегрев пленочного резистора, вызванный действием выделяемой в нем мощности (без учета взаимовлияния элементов ГИС), характеризуется выражением (3.53). Отсюда, положив $W = W_{0\max}$ и $\vartheta_{ii} = 0$, по-

лучим

$$\vartheta_R = r_t W_{0 \max} \Gamma(K_L \delta_{1R}, K_L \delta_{2R}). \quad (3.173)$$

Из сравнения (3.173) и (3.149) следует, что при конечных размерах резистора $\vartheta_R < \vartheta_{R \max}$ и, следовательно, имеется возможность уменьшения размеров резистора. Положим, что размеры резистора уменьшились в n раз, тогда

$$r_t W_{0 \max} n^2 \Gamma\left(K_L \frac{\delta_{1R}}{n}, K_L \frac{\delta_{2R}}{n}\right) \leq \vartheta_{R \max} = r_t W_{0 \max}. \quad (3.174)$$

Отсюда получим выражение для определения максимально допустимой величины n :

$$n^2 \Gamma\left(K_L \frac{\delta_{1R}}{n_m}, K_L \frac{\delta_{2R}}{n_m}\right) = 1. \quad (3.175)$$

Выражение (3.175) протабулировано для математической модели ГИС в виде изотропной пластины. График для определения $n_m = f(K_L, \delta_x, K)$ приведен на рис. 3.29, где δ_x — безразмерная ширина резистора; K — отношение длины резистора к его ширине.

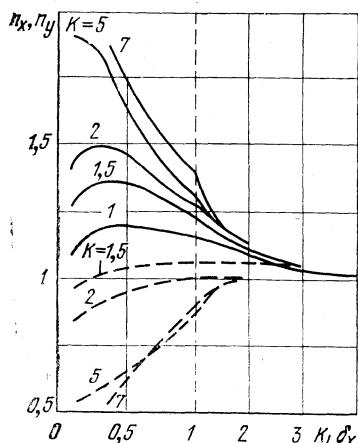


Рис. 3.31. Зависимость n_x , n_y от $K_L \delta_x$ и K (— n_x).

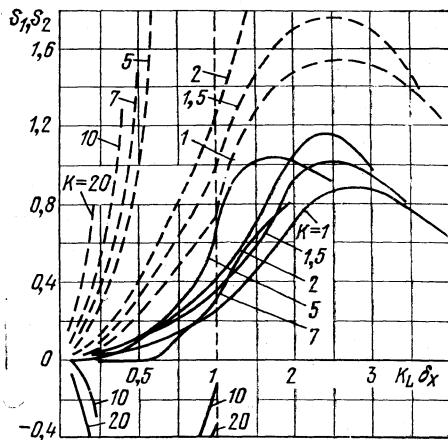


Рис. 3.32. Зависимость S_1 и S_2 от $K_L \delta_x$ и K (— S_1).

Рассмотрим, при каких условиях уменьшение размеров резистора не приведет к увеличению температуры остальных элементов ГИС. Максимальный перегрев на границе резистора достигается в точках A и B (рис. 3.30). Необходимо рассчитать координаты x_D и y_E , определяющие размеры зоны теплового воздействия из условия $\vartheta_A = \vartheta_D$, $\vartheta_B = \vartheta_E$ при уменьшении размеров резистора в $n_m = OA/OA_1 = OB/OB_1$ раз. Границы зоны теплового воздействия показаны штриховой линией на рис. 3.30. Результаты расчета приведены на рис. 3.31, 3.32. На рис. 3.31 показана зависимость $n_x = OA/OD$ и $n_y = OB/OE$ от $K_L \delta_x$ и K . На рис. 3.32 приведены зависимости $S_1 = f(K_L, \delta_x, K)$ и $S_2 = f(K_L, \delta_x, K)$, где

$$S_1 = b_p^2 K \left(1 - \frac{1}{n_m^2}\right) \frac{1}{h^2}; \quad S_2 = b_p^2 K \left(1 - \frac{1}{n_x n_y}\right) \frac{1}{h^2}.$$

Зависимости просчитаны в возможном диапазоне изменения размеров резистора. Величина S_1 определяет безразмерную площадь поверхности подложки, освобождающуюся при уменьшении размеров резистора. Эта площадь может быть использована для размещения нетермочувствительных элементов, например печатных проводников. Величина S_2 определяет безразмерную площадь поверхности подложки, на которой температурное поле резистора не увеличилось при уменьшении его размеров и где $\vartheta_x \leq \vartheta_A$, $\vartheta_y \leq \vartheta_B$. При расположении элементов ГИС на этой площади их температура не увеличивается. Таким образом, уменьшение размеров резистора при расположении близлежащих элементов ГИС за пределами зоны теплового воздействия не приводит к увеличению температур этих элементов. Значительный выигрыш в плотности компоновки наблюдается (рис. 3.32) при относительно больших первоначальных размерах источника тепла $K_L \delta_x \geq 0,5$ и $K \leq 7$.

С учетом сказанного расчет геометрических размеров пленочных резисторов из условия обеспечения заданного теплового режима производится в следующем порядке.

1. В результате оценки теплового режима ГИС с учетом технологических ограничений определяется величина W_{\max} и выбирается метод проектирования топологии.

2. Определяется величина $W_{0\max}$ по формуле (3.171).

3. Определяется расчетная ширина для каждого из резисторов по формуле (3.170) и с учетом технологических ограничений уточняются размеры резисторов. В этом случае заданный тепловой режим обеспечивается при произвольном относительно друг друга размещении резисторов.

Для дальнейшего уменьшения размеров особо мощных резисторов у которых $K_L \delta_x \geq 0,5$ и $K \leq 7$, расчет продолжается в следующем порядке.

1. Определяется величина n_m по графику рис. 3.29.

2. Определяются размеры резистора с учетом технологических ограничений из условия, что его ширина $b \leq b_p/n_m$.

3. Определяются размеры зоны теплового воздействия по графику, представленному на рис. 3.31.

4. Производится расчет теплового влияния на мощный резистор остальных элементов ГИС по методике, изложенной в § 3.3. Если это влияние значительно, то размеры мощного резистора увеличиваются и расчет повторяется до выполнения условия $\vartheta_R \leq (T_{R\max \text{ доп}} - T_k)$.

Заданный тепловой режим остальных пленочных резисторов обеспечивается при условии их произвольного расположения за пределами зоны теплового воздействия. Пленочные конденсаторы и навесные полупроводниковые элементы по сравнению с пленочными резисторами имеют значительно меньшие максимально допустимые температуры.

При произвольном с точки зрения тепловых режимов размещении элементов ГИС максимально допустимая мощность рассеяния на подложке W_{\max} ограничивается максимально допустимой температурой наиболее термокритичных (полупроводниковых) элементов. Заданный тепловой режим обеспечивается при $W_{\max} \leq W'_{\max}$.

Если $W'_{\max} < W_{\max} < W''_{\max}$, то для обеспечения заданного теплового режима необходимо наложить ограничения на взаимное расположение элементов ГИС. В этом случае каждый термокритичный элемент или группа однотипных термокритичных элементов отделяются от пленочных резисторов зонами защиты.

Зашита может быть односторонней (рис. 3.33, а), двусторонней (рис. 3.33, б) и по периметру (рис. 3.33, в). Выбор вида защиты определяется схемотехническими требованиями. Односторонняя защита может рассматриваться как частный случай двусторонней при $B_1 \rightarrow \infty$.

Для упрощения расчета зон защиты примем следующие допущения.

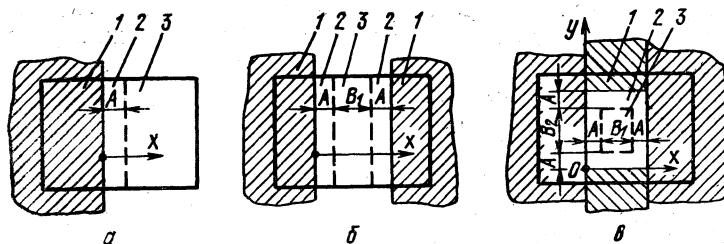


Рис. 3.33. Схемы зон защиты:

1 — область расположения пленочных резисторов; 2 — зона защиты; 3 — область расположения термокритических элементов (зашитаемая зона); A — ширина зоны защиты; B_1 — ширина защищаемой зоны; B_2 — длина защищаемой зоны.

1. Область расположения пленочных резисторов представляет собой сплошной источник тепла с равномерно распределенной по поверхности плотностью тепловыделений, равной \dot{W}_{\max} . В эту область входят зоны теплового воздействия. Такое допущение приводит к несколько завышенной оценке температуры элементов и соответственно к несколько

занятым к значению ширины зон защиты. Однако исходя из анализа теплового режима пленочных резисторов можно предположить, что погрешность, вносимая этим допущением, невелика и будет уменьшаться по мере увеличения плотности монтажа элементов ГИС.

2. Область, занятая пленочными резисторами, полуограничена, т. е. может состоять из одной полуплоскости (рис. 3.33, а), из двух полуплоскостей (рис. 3.33, б) или из двух полуплоскостей

Рис. 3.34. Изменение температурного поля защищаемой зоны:

1 — полуплоскость; 2 — полуполоса $\delta_x=3$; 3 — полуполоса $\delta_x=2$; 4 — источник $\delta_x \delta_y=2 \cdot 2$.

стей и двух полубесконечных полос (рис. 3.33в). Это допущение также приводит к небольшой отрицательной погрешности. Малая величина погрешности объясняется тем обстоятельством, что ввиду экспоненциального характера Γ -функции уже при сравнительно небольших размерах области расположения термостабильных тепловыделяющих элементов (более двух толщин подложки) температурное поле в защищаемой зоне практически не отличается от температурного поля, создаваемого полуограниченной поверхностью (рис. 3.34).

С учетом принятых допущений температурное поле в защищаемой зоне определяется суперпозицией температурных полей, создаваемых полуплоскостью и полубесконечной полосой.

Безразмерное температурное поле, создаваемое источником тепла за его границами при $y=0$, в системе координат, изображенной на рис. 3.33, определяется выражением

$$\theta(x) = 0,5[\Upsilon(2\delta_1 + x, \delta_2) - \Upsilon(x, \delta_2)]. \quad (3.176)$$

Положив без нарушения общности $\delta_2 \geq \delta_1$ и произведя в (3.176) предельный переход при $\delta_1 \rightarrow \infty$, получим формулу для расчета безразмерного температурного поля, созданного полуплоскостью,

$$\lim_{\delta_1 \rightarrow \infty} \theta(x) = f_1(x) = 0,5[1 - \Upsilon_1(x)]. \quad (3.177)$$

Безразмерное температурное поле, создаваемое источником тепла в области $0 \leq x \leq 2\delta_1$, $y=0$ (рис. 3.33), определяется выражением

$$\theta(x, y) = 0,25[\Upsilon(x, 2\delta_1 + y) + \Upsilon(2\delta_1 - x, 2\delta_1 + y) - \Upsilon(2\delta_1 - x, y) - \Upsilon(x, y)]. \quad (3.178)$$

Положив без нарушения общности $\delta_2 = K\delta_1$ и произведя в (3.178) предельный переход при $K \rightarrow \infty$, получим формулу для расчета безразмерного температурного поля, созданного полубесконечной полосой в защищаемой зоне:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \theta(x, y) = f_2(x, y, 2\delta_1) = 0,25[\Upsilon_1(x) + \Upsilon_1(2\delta_1 - x) - \Upsilon(2\delta_1 - x, y) - \Upsilon(x, y)]. \quad (3.179)$$

Введем выражения для расчета безразмерного температурного поля в защищаемой зоне.

При двусторонней защите температурное поле определяется выражением

$$f_3(x, b_1 + 2a) = f_1(x) + f_1(b_1 + 2a - x) = 1 - 0,5[\Upsilon_1(x) + \Upsilon_1(b_1 + 2a - x)] \quad (3.180)$$

где $b_1 = B_1/h$; $a = A/h$.

Рассмотрим характер изменения функции f_3 в защищаемой зоне. Ввиду симметричности температурного поля достаточно рассмотреть f_3 в области $a \leq x \leq a + 0,5b_1$. При увеличении x функция $\Upsilon_1(x)$ возрастает, функция $\Upsilon_1(b_1 + 2a - x)$ уменьшается.

Так как $(b_1 + 2a - x) > x$ и приращение $r_1(x)$ больше приращения $\Upsilon_1(b_1 + 2a - x)$, суммарное приращение положительно и функция уменьшается при увеличении x .

Следовательно, в защищаемой зоне функция f_3 достигает максимального значения при $x=a$:

$$f_3(x, b_1 + 2a) \big|_{x=a} = f_{3 \max}(a, b_1) = 1 - 0,5[\Upsilon_1(a) + \Upsilon_1(b_1 + a)]. \quad (3.181)$$

При защите по периметру температурное поле определяется выражением

$$\begin{aligned} f_4(x, y, b_1 + 2a, b_2 + 2a) &= f_3(a, b_1 + 2a) + f_2(x, y, b_1 + 2a) + \\ &+ f_2(x, b_2 + 2a - y, b_1 + 2a) = 1 - 0,25[\Upsilon(b_1 + 2a - x, y) + \\ &+ \Upsilon(x, y) + \Upsilon(b_1 + 2a - x, b_2 + 2a - y) + \Upsilon(x, b_2 + 2a - y)], \end{aligned} \quad (3.182)$$

где $b_2 = B_2/h$

Рассмотрим изменение функции f_4 в защищаемой зоне. Ввиду симметричности температурного поля достаточно рассмотреть изменение f_4 в области $a \leq x \leq a+0,5b_1$ и $a \leq y \leq a+0,5b_2$, где $b_1+2a-x > x$ и $b_2+2a-y > y$. При увеличении x частные суммы $[\Upsilon(b_1+2a-x, y) + \Upsilon(x, y)]$ и $[\Upsilon(b_1+2a-x, b_2+2a-y) + \Upsilon(x, b_2+2a-y)]$ возрастают и функция f_4 уменьшается. При увеличении y возрастают частные суммы $[\Upsilon(b_1+2a-x, y) + \Upsilon(b_1+2a-x, b_2+2a-y)]$ и $[\Upsilon(x, y) + \Upsilon(x, b_2+2a-y)]$ и функция f_4 также уменьшается. Следовательно, в защищаемой зоне функция f_4 достигает своего максимального значения при $x=y=a$:

$$f_4(x, y, b_1+2a, b_2+2a) \Big|_{x=y=a} = f_{4\max}(a, b_1, b_2) = 1 - 0,25 [\Upsilon(a, a) + \Upsilon(b_1+a, a) \Upsilon(a, b_2+a) + \Upsilon(b_1+a, b_2+a)]. \quad (3.183)$$

Соотношения (3.181) и (3.183) позволяют рассчитать ширину зон защиты. Расчет производится в следующем порядке.

1. Определяется исходя из схемотехнических требований форма зоны защиты.

2. Рассчитывается перегрев термокритичного элемента ϑ_t , вызванный действием выделяемой в нем мощности, по представленной в § 3.3 методике. Если группа термокритичных элементов имеет общую зону защиты, то рассчитываются перегревы этих элементов ϑ_{ti} с учетом теплового взаимовлияния и наибольшее из значений ϑ_{ti} принимается за ϑ_t .

3. Определяется максимально допустимый относительный перегрев термокритичного элемента, вызванный действием остальных элементов ГИС:

$$f = \frac{T_{t\max\text{ доп}} - \vartheta_t - T_k}{\vartheta_{\max}}, \quad (3.184)$$

где $T_{t\max\text{ доп}}$ — максимально допустимая температура элемента.

4. Определяются величины

$$b^0_1 = b_1 K_L, \quad b^0_2 = b_2 K_L. \quad (3.185)$$

5. Определяется ширина зоны защиты

$$A = a^0 h / K_L, \quad (3.186)$$

где a^0 определяется графически соответственно рассчитанным значениям f , b^0_1 , b^0_2 по рис. 3.35, а при двусторонней защите, по рис. 3.35, б при защите по периметру. Здесь $K_L \neq 1$ (изотропная модель ГИС). Ввиду того, что расчет зон защиты производится с некоторым запасом, применение двуслойной модели ГИС не является необходимым. На рис. 3.35 представлены графики $a^0 = f(f_{3\max}^0, b^0_1)$ и $a^0 = f(f_{4\max}^0, b^0_1, b^0_2)$, где $f_{3\max}^0 = f_{3\max}(a K_L, b^0_1)$; $f_{4\max}^0 = f_{4\max}(a K_L, b^0_1, b^0_2)$.

Пример. Рассчитаем ширину зон защиты для пленочного конденсатора и транзистора в конструкции ГИС, описанной в примере § 3.3: $r_t = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, $K_L = 0,636$, $h = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ при $T_k = 333 \text{ К}$, $T_{t\max\text{ доп}} = 358 \text{ К}$, $T_{s\max\text{ доп}} = 398 \text{ К}$, $W_{0\max} = W''_{0\max} = 12,3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. Размеры конденсатора $(6,5 \cdot 7) \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В транзисторе с размерами $(0,7 \cdot 0,7) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ рассеивается мощность $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$.

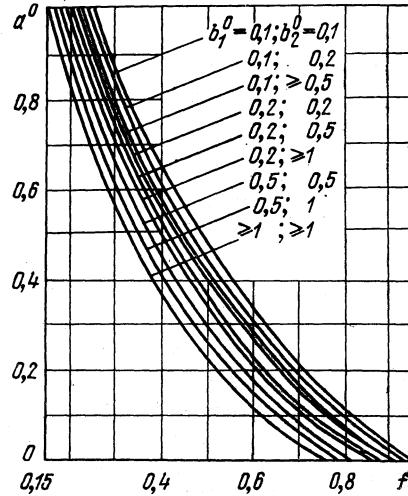
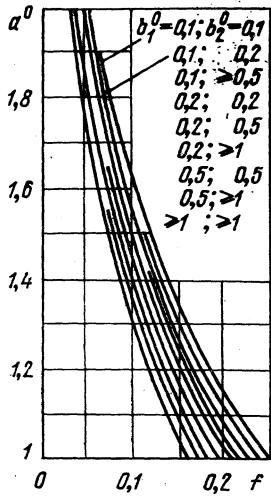
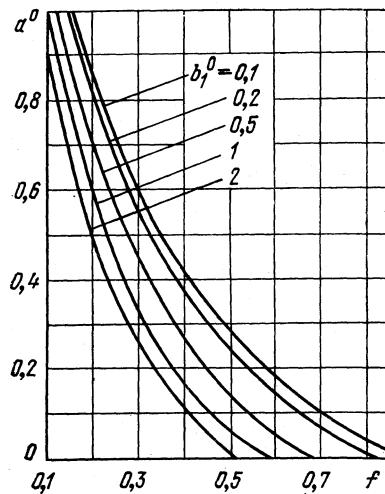
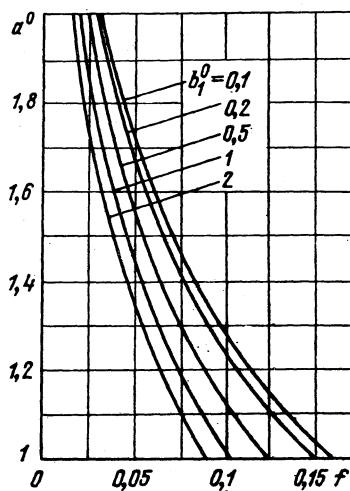


Рис. 3.35. Зависимость коэффициентов для определения ширины зон защиты от относительного перегрева:
 a — двусторонняя защита; b — защита по периметру.

Результаты расчета ширины зон защиты (односторонней — A' , двусторонней — A'' , по периметру — A'''), сведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16

Результаты расчета зон защиты

Элемент	$\theta_{T'}$ К	f	b_1^0	b_2^0	$A' \times 10^3$, м	$A'' \times 10^3$, м	$A''' \times 10^3$, м
T	3,5	0,24	0,64	0,64	0,38	0,63	0,82
C	0	0,72	5,9	6,4	0	0	0,06

Из рассмотренного примера видно, что при минимизации поверхности подложки, занятой зонами защиты, односторонняя защита имеет преимущественно перед двусторонней, а последняя — перед защитой по периметру.

Тепловая защита пленочных конденсаторов, как правило, обеспечивается при соблюдении технологических ограничений по их размещению, так как максимально допустимая температура пленочных конденсаторов значительно выше максимально допустимой температуры полупроводниковых элементов. Поэтому на поверхности подложки, занятой зонами защиты, можно располагать не только печатные проводники и контактные площадки, но и конденсаторы.

Ширина и соответственно площадь зон защиты полупроводниковых элементов даже при наихудших условиях ($W_0 = W''_{\max}$) относительно невелики.

Проектирование ГИС, соответствующей заданному тепловому режиму, целесообразно проводить в следующем порядке.

Первый этап. Оценивается тепловой режим ГИС, выбирается (или вновь проектируется) конструкция ГИС, определяется величина W_{\max} .

Результаты выполнения этого этапа с учетом технологических ограничений по минимально возможным размерам элементов ГИС могут привести к одному из следующих выводов.

1. Заданный тепловой режим обеспечивается при любой топологии, т. е. при проектировании топологии нет необходимости учитывать тепловые ограничения.

2. Обеспечение заданного теплового режима возможно только при наличии зон защиты (в этом случае необходимо перейти ко второму этапу).

Второй этап. Производится расчет зон теплового воздействия, зон защиты и проектирование топологии. Выполнение работ по второму этапу, как правило, позволяет спроектировать топологию, соответствующую заданному тепловому режиму.

Если почему-либо при проектировании топологии не удалось реализовать необходимую ширину зон защиты и зон теплового воздействия, то возможность обеспечения заданного теплового режима проверяется расчетом по представленной в § 3.3 методике.

Процесс проектирования топологии может повторяться многократно с целью оптимизации теплового режима ГИС. Достижение полной оптимизации затрудняется наличием ряда схемотехнических, конструктивных и технологических ограничений. Однако и частичная оптимизация теплового режима элементов может привести к значительному повышению надежности ГИС.

Глава 4

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭА

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТАХ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РЭА

В этой главе мы рассмотрим методы расчета блоков, стоек и других подобных узлов РЭА, выполненных на дискретных и микроминиатюрных элементах. Так как подавляющее большинство блоков РЭА (свыше 98%) в настоящее время выполнено с воздушным охлаждением, в этой главе рассматриваются методы расчета теплового режима только для этого способа охлаждения.

Различные конструкции блоков РЭА с воздушным охлаждением описаны в гл. 2. В состав этой аппаратуры в большинстве случаев входят полупроводниковые диоды и транзисторы, микросхемы, резисторы, конденсаторы, трансформаторы и другие подобные элементы, установленные либо на металлическом шасси, либо на платах в аппаратах кассетной конструкции.

Для рассматриваемого класса аппаратов существует значительное количество методик расчета, обладающих различной точностью и трудоемкостью. Точность расчета может характеризовать вероятность получения неправильного результата, т. е. чем выше точность, тем ниже вероятность получения неправильного результата. Поэтому необходимо получить соотношения, связывающие вероятность получения неправильного результата с точностью методики. При помощи этих соотношений можно решить вопрос о допустимой погрешности расчета теплового режима радиоэлектронных аппаратов. Расчет теплового режима радиоэлектронных аппаратов рекомендуется проводить в три этапа.

На первом этапе определяются среднеповерхностные температуры шасси (платы) с расположенным на них радиодеталями, кожуха и температура воздуха внутри радиоэлектронного аппарата.

На втором этапе, используя результаты первого этапа, определяются среднеповерхностные температуры корпусов элементов.

На третьем этапе определяются максимальные температуры критических зон элементов и их функциональные связи со среднеповерхностной температурой как корпусов, так и шасси (плат).

В этой главе будут рассмотрены первый и второй этапы расчета, так как они позволяют получить значения основных параметров, связанных с выбором системы охлаждения, а также наметить целесообразное, с точки зрения тепловых режимов, распределение элементов внутри блоков, блоков внутри аппарата, т. е. принять необходимое конструкторское решение. Третий этап расчета в основном изложен в предыдущей главе.

Существующие методики расчета теплового режима РЭА с воздушным охлаждением [8, 51—63], как правило, подразделяются на методики расчета для аппаратов на шасси и методики расчета для аппаратов кассетной конструкции. Однако имеется принципиальная возможность создания единой методики расчета.

Реальный радиоэлектронный аппарат в теплофизическом отношении представляет собой очень сложную систему с большим количеством источников тепла с границами неправильной формы. Полную систему уравнений теплообмена для реального аппарата часто невозможно не только решить аналитически, но и строго записать. В связи с этим процессы, протекающие в реальном радиоэлектронном аппарате, схематизируют, принимают ряд упрощающих предпосылок и в результате получают тепловую модель аппарата, для которой и проводят расчет теплового режима.

В настоящее время наибольшее распространение получила весьма плодотворная схематизация процессов теплообмена в РЭА, предложенная Г. Н. Дульневым [8]. Сущность этого метода состоит в том, что шасси (плата, пакет плат) с радиоэлементами принимают за одно тело с изотермической поверхностью (нагретую зону), для которого и проводится расчет теплового режима. В зависимости от конструкции радиоэлектронного аппарата в нем могут быть выделены одна или несколько нагретых зон. С помощью этого метода определяют среднеповерхностную температуру нагретой зоны. Суть понятия «нагретая зона» рассмотрим на примере одноблочного герметичного радиоэлектронного аппарата с горизонтальными шасси (рис. 4.13).

Так как процессы теплообмена в РЭА описываются очень сложной системой уравнений, примем ряд допущений. Предположим, что коэффициенты теплообмена α_1 и α_2 на наружной S_1 и внутренней S_2 поверхности кожуха, α_3 на части внутренней поверхности кожуха S_3 , соприкасающейся с шасси, α_4 и α_5 на поверхностях шасси S_4 и S_5 , обращенных соответственно вверх и вниз, зависят от физических параметров среды, геометрических размеров и средних перепадов температур, но не зависят от координат. Тогда уравнения теплопроводности для кожуха и нагретой зоны в установившемся режиме можно записать:

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{\lambda_2} \quad (4.2)$$

со следующими граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{(n, y, z) S_1} &= \alpha_1 (T_1 - T_0) \Big|_{(n, y, z) S_1}, \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{(n, y, z) S_2} &= \alpha_2 (T_2 - T_1) \Big|_{(n, y, z) S_2}, \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{(n, y, z) S_3} &= -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{(n, y, z) S_3} = \alpha_3 (T_2 - T_1) \Big|_{(n, y, z) S_3}, \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{(n, y, z) S_4} &= \alpha_4 (T_2 - T_3) \Big|_{(n, y, z) S_4}, \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{(n, y, z) S_5} &= \alpha_5 (T_3 - T_2) \Big|_{(n, y, z) S_5}, \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

где T_1 — температура кожуха аппарата; T_2 — температура нагретой зоны; T_3 — температура воздуха внутри аппарата; T_0 — температура окружающей среды; λ_1 — приведенный коэффициент теплопроводности корпуса; λ_2 — приведенный коэффициент теплопроводности нагретой зоны; q_V — объемная плотность теплового потока.

Строго аналитически систему уравнений (4.1), (4.2) с граничными условиями (4.3) решить невозможно, поэтому перейдем к интегральным характеристикам. Сделаем предварительно ряд преобразований.

Из уравнения (4.2) получим

$$P = \iiint_{V_2} q_V dV = \iiint_{V_2} \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) dV, \quad (4.4)$$

где P — мощность, рассеиваемая радиоэлектронным аппаратом; V_2 — объем нагретой зоны.

Воспользовавшись формулой Остроградского, преобразуем (4.4) к виду

$$P = - \iint_{S_3 + S_4 + S_5} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} dS = - \iint_{S_3} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} dS - \iint_{S_4} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} dS - \iint_{S_5} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} dS. \quad (4.5)$$

Используя граничные условия (4.3), получаем

$$\begin{aligned} P &= \iint_{S_3} \alpha_3 (T_2 - T_1) dS + \iint_{S_4} \alpha_4 (T_2 - T_1) dS + \iint_{S_5} \alpha_5 (T_2 - T_1) dS = \\ &= \alpha_3 S_3 (T_{23} - T_{13}) + \alpha_4 S_4 (T_{24} - T_3) + \alpha_5 S_5 (T_{25} - T_3), \end{aligned} \quad (4.6)$$

где $T_{23} = \frac{1}{S_3} \iint_{S_3} T_2 dS$ — среднеповерхностная температура поверхности нагретой зоны, граничащей с корпусом; $T_{13} = \frac{1}{S_3} \iint_{S_3} T_1 dS$ — среднеповерхностная температура внутренней поверхности корпуса, граничащей с нагретой зоной; $T_{24} = \frac{1}{S_4} \iint_{S_4} T_2 dS$ — среднеповерхностная температура поверхности нагретой зоны, обращенной вверх; $T_{25} = \frac{1}{S_5} \iint_{S_5} T_2 dS$ — среднеповерхностная температура поверхности нагретой зоны, обращенной вниз.

Учитывая, что все тепло, выделяющееся в аппарате с герметичным корпусом, попадает на корпус, при помощи аналогичных рассуждений можно получить

$$P = \alpha_1 S_1 (T_3 - T_{12}) + \alpha_3 S_3 (T_{23} - T_{13}), \quad (4.7)$$

$$P = \alpha_4 S_4 (T_{14} - T_0), \quad (4.8)$$

где $T_{12} = \frac{1}{S_2} \iint_{S_2} T_1 dS$ — среднеповерхностная температура внутренней поверхности корпуса, граничащей с воздухом в аппарате; $T_{14} = \frac{1}{S_4} \iint_{S_4} T_1 dS$ —

среднеповерхностная температура наружной поверхности корпуса.

Для решения системы уравнений (4.6)–(4.8) необходимо уметь определять тепловые сопротивления между частями корпуса и нагретой зоной, имеющими различные среднеповерхностные температуры. Эти тепловые сопротивления имеют структуру тепловых коэффициентов [8], т. е. зависят не только от геометрических размеров, но и от условий теплообмена, закона распределения мощности и, строго говоря, их определение эквивалентно решению системы уравнений (4.1) и (4.2) с граничными условиями (4.3). Поэтому для упрощения решения положим, что

$$T_{23} = T_{24} = T_{25} = \bar{T}_2, \quad (4.9)$$

$$T_{11} = T_{12} = T_{13} = \bar{T}_1. \quad (4.10)$$

С учетом (4.9) и (4.10) уравнения (4.6)–(4.8) принимают вид

$$P = \alpha_1 S_1 (\bar{T}_1 - T_0), \quad (4.11)$$

$$P = \alpha_2 S_2 T_3 + \alpha_3 S_3 \bar{T}_2 - (\alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3) \bar{T}_1, \quad (4.12)$$

$$P = (\alpha_3 S_3 + \alpha_4 S_4 + \alpha_5 S_5) \bar{T}_2 - (\alpha_4 S_4 + \alpha_5 S_5) T_3 - \alpha_5 S_5 \bar{T}_1. \quad (4.13)$$

Из системы уравнений (4.11)–(4.13) можно определить T_2 и T_3 , если известны соотношения для определения величин коэффициентов теплообмена α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 . При выводе уравнений (4.11)–(4.13) мы использовали условия (4.9) и (4.10). Условие (4.9) выполняется в случае $\lambda_2 \rightarrow \infty$, другими словами, при $Bi = \alpha_2 l / \lambda_2 \ll 1$. Однако если $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5$, то мы можем получить те же уравнения (4.11)–(4.13), определив \bar{T}_2 как

$$\bar{T}_2 = \frac{1}{S_3 + S_4 + S_5} \iint_{S_3 + S_4 + S_5} T_2 dS.$$

Таким образом, температура нагретой зоны стремится к строгому совпадению со среднеповерхностной температурой шасси и расположенных на нем элементов в следующих случаях:

1. Когда критерий Био для нагретой зоны стремится к нулю (значительно меньше единицы), т. е. $\lambda_2 \rightarrow \infty$, или размеры зоны очень малы.
2. Когда коэффициенты теплообмена от нагретой зоны не зависят от координат.
3. Когда плотность теплового потока стремится к нулю.

Как показывает многолетний опыт работы различных исследователей в области тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры, температура нагретой зоны во многих случаях незначительно отличается от среднеповерхностной температуры шасси с расположенными на нем деталями, вследствие чего мы в дальнейшем будем отождествлять температуру нагретой зоны со среднеповерхностной температурой нагретой зоны.

Уменьшение погрешности методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата обычно связано с ее усложнением и уменьшением универсальности. Так как в инженерной практике желательно иметь как можно более простую и универсальную методику расчета и учитывая, что ряд исходных данных задается с некоторыми погрешностями и, следовательно, сколь угодно точная методика расчета теплового режима не дает возможности полностью избавиться от ошибок.

бок, необходимо определить требования, предъявляемые к погрешности методики.

Погрешность методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата характеризует вероятность того, что спроектированный на основании расчета радиоэлектронный аппарат будет иметь допустимый тепловой режим, и эта вероятность тем выше, чем ниже погрешность методики расчета. Таким образом, для исследования требований, предъявляемых к погрешности методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата, необходимо вывести соотношения, связывающие вероятность получения неправильного расчета с погрешностью методики. Поскольку тепловой режим радиоэлектронного аппарата определяется рядом исходных параметров, которые обычно задаются с некоторой погрешностью, это накладывает определенные ограничения на целесообразность уточнения методики расчета.

В основу одного из способов определения соотношений, связывающих вероятность получения неправильного расчета с погрешностью методики расчета теплового режима радиоэлектронной аппаратуры, могут быть положены следующие соображения [11, 64].

Обычно при расчете и контроле теплового режима радиоэлектронной аппаратуры рассчитывают и измеряют либо температуру воздуха вблизи радиоэлементов, либо температуру поверхности элементов. Однако надежность и работоспособность элементов, как правило, определяется температурами критических зон, лежащих внутри элемента и недоступных непосредственному измерению. Эти температуры определяются расчетным путем с помощью задаваемых в технических условиях тепловых сопротивлений и задаваемых разработчиками аппаратуры мощностей рассеивания. Тепловые сопротивления в оговоренном по ТУ диапазоне являются случайными величинами, и, следовательно, даже нулевая погрешность методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата не гарантирует полностью наличия допустимой температуры в критических точках.

Если в технических условиях на элементы заданы допустимые температуры их поверхностей, то допустимый тепловой режим радиоэлектронного аппарата имеет место, когда соблюдаются следующие неравенства:

$$T_i \leq T_i^{(3)} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (4.14)$$

где T_i — температура поверхности i -го элемента. Здесь и в дальнейшем верхним индексом (3) обозначаются допустимые или заданные значения, (д) — действительные значения, (р) — расчетные значения.

Предположим, что элемент с индексом 1 ограничивает тепловой режим аппарата, тогда вместо (4.14) можно записать

$$T_1^{(д)} \leq T_1^{(3)}. \quad (4.15)$$

Выражение (4.15) есть условие, при соблюдении которого тепловой режим радиоэлектронного аппарата считается допустимым. Если считать (4.15) равенством, то

$$T_1 = T_{11} - P_1 R_1, \quad (4.16)$$

где T_{11} — температура критической зоны элемента с индексом 1; P_1 — мощность рассеивания элемента с индексом 1; R_1 — внутреннее теплое сопротивление элемента с индексом 1.

Расчет теплового режима радиоэлектронного аппарата заключается в определении по конструктивным данным температур нагретой зоны и поверхностей элементов. В ходе расчета определяют также температуры в других характерных зонах аппарата (воздуха, корпуса и т. п.) и характеристики системы охлаждения.

Неравенство (4.15) используется для определения допустимого теплового режима радиоэлектронного аппарата потому, что температура поверхности элемента доступна для измерения и неравенство (4.15) может быть проверено экспериментально после изготовления опытного образца аппарата. Фактически допустимый тепловой режим радиоэлектронного аппарата определяется температурой наиболее нагретой части элемента, т. е.

$$T_{11}^{(p)} \leq T_{11}^{(3)}, \quad (4.17)$$

а температура критической зоны элемента с индексом 1 рассчитывается по формуле

$$T_{11}^{(p)} = T_1^{(p)} + P_1^{(3)} R_1^{(3)}. \quad (4.18)$$

Предположим, что экспериментальное определение температур в радиоэлектронном аппарате выполнено для тех же условий, для которых проводился расчет, а действительное значение температуры критической зоны может быть получено из уравнения, аналогичного (4.16):

$$T_{11}^{(d)} = T_1^{(d)} + P_1^{(d)} R_1^{(d)}. \quad (4.19)$$

Ошибка расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата определяется выражением

$$\varepsilon = T_1^{(d)} - T_1^{(p)} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad (4.20)$$

где ε_1 — систематическая ошибка расчета; ε_2 — случайная ошибка с математическим ожиданием $M(\varepsilon_2) = 0$ и дисперсией σ_{ε}^2 .

Будем называть погрешностью методики расчета максимальную ошибку, имеющую место в 95% случаях расчета при нулевой систематической ошибке. Поскольку случайная ошибка обычно подчиняется нормальному закону распределения, то погрешность методики определяется формулой

$$\bar{\varepsilon} = 2\sigma_{\varepsilon}. \quad (4.21)$$

Методика расчета считается удовлетворительной, если результаты расчета подтверждаются опытом. Это значит, что если на этапе конструирования с помощью некоторой методики выполнен расчет теплового режима аппарата и по результатам расчета определено, что имеет место неравенство (4.17), то после изготовления и испытания опытного образца должно выполняться тоже неравенство (4.17).

Чем меньше погрешность методики расчета, тем ниже вероятность того, что тепловой режим опытного образца радиоэлектронного аппарата будет выше допустимого (вероятность неправильного расчета), т. е.

$$p[T_{11}^{(d)} > T_{11}^{(p)}] = f(T), \quad (4.22)$$

где $p(x > x_1)$ — вероятность того, что случайная величина x больше некоторого заданного значения x_1 .

Подставляя (4.18) и (4.19) в (4.22), раскроем эту функциональную зависимость

$$P_1 = P [(T_{11}^{(p)} - T_{11}^{(d)}) > 0] = P \{[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + P_1^{(d)} R_1^{(d)} - P_1^{(s)} R_1^{(s)}] > 0\} = P \{\theta > 0\}. \quad (4.23)$$

В (4.23) есть три случайные величины — ошибка расчета значения мощности рассеивания элемента $P_1^{(d)}$ теплового сопротивления $R_1^{(d)}$ и случайная ошибка, которую мы уже определили выражением (4.20).

В гл. 1 мы показали, что заданное значение теплового сопротивления соответствует наибольшему значению этой величины, т. е.

$$R_1^{(s)} = M[R_1^{(d)}] + 3\sigma_1, \quad (4.24)$$

где $M[R_1^{(d)}]$ — математическое ожидание величины $R_1^{(d)}$; σ_1 — среднеквадратичное отклонение величины $R_1^{(d)}$ и разброс тепловых сопротивлений лежит в пределах

$$1 - m \quad (m > 1). \quad (4.25)$$

Анализ значений величины $R_1^{(d)}$ для различных элементов показывает, что можно принять закон изменения этой случайной величины нормальным и с учетом (4.24) и (4.25) найти математическое ожидание

$$M[R_1^{(d)}] = \frac{m+1}{2m} R_1^{(s)} \quad (4.26)$$

и среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_1 = \frac{m-1}{6m} R_1^{(s)}, \quad (4.27)$$

где $R_1^{(s)}$ — значение, заданное в технических условиях.

Примем математическое ожидание мощности рассеивания равным

$$M[P_1^{(d)}] = b P_1^{(s)} \quad (4.28)$$

и среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_2 = c P_1^{(s)}. \quad (4.29)$$

Учитывая, что математическое ожидание и дисперсия произведения независимых случайных величин x и y равны [9] $M(x, y) = M(x) M(y)$; $D(x, y) = M^2(x) D(y) + M^2(y) D(x) + D(x) D(y)$, а также очевидное равенство

$$T_{11}^{(s)} - T_{11}^{(p)} = P_1^{(s)} R_1^{(s)},$$

можно записать выражения для математического ожидания и среднеквадратичного отклонения случайной величины θ

$$\left. \begin{aligned} M(\theta) &= \varepsilon_1 + \left(\frac{m+1}{2m} b - 1 \right) (T_{11}^{(s)} - T_{11}^{(p)}), \\ \sigma_\theta^2 &= \frac{T^2}{4} + \left[\left(\frac{m-1}{6m} \right)^2 c^2 + \left(\frac{m+1}{2m} \right)^2 c^2 + \left(\frac{m-1}{6m} \right)^2 b^2 \right] (T_{11}^{(s)} - T_{11}^{(p)})^2. \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

Предположим, что случайная величина θ подчиняется нормальному закону распределения, тогда вероятность неправильного расчета p_1 может быть определена через интегральную функцию распределения [9]

$$p_1 = 1 - F(z), \quad (4.31)$$

где $z = -M(\theta)/\sigma_0$; $F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-u^2/2} du$ (табулирован в [12]).

Систематическая ошибка расчета обусловлена теми «запасами», которые обычно принимаются при расчете теплового режима радиоэлектронного аппарата. Эти «запасы» обусловлены обычно следующим:

1. Действительные мощности, рассеиваемые нагретой зоной, ниже тех, которыми задаются при расчете.

2. Тепловой режим аппарата считается допустимым, когда имеют место неравенства (4.14) и (4.15), а не условия равенства, как мы считали при выводе выражения (4.16).

3. При расчете эквивалентного теплового сопротивления радиоэлектронного аппарата обычно его значения несколько завышаются.

Величину систематической ошибки можно оценить по уравнению $\varepsilon_1 = -aT_1^{(p)}$, $a < 1$.

Чтобы определить необходимую точность методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата, нужно задаться допустимой вероятностью неправильного расчета. Обычно в технических расчетах принимают уровень значимости 0,001—0,05, т. е. считают допустимым принятие неправильных решений в 1—50 случаях из 1000, причем выбирают конкретное значение уровня значимости (в указанном выше диапазоне) в зависимости от последствий, к которым может привести неправильное решение. Зададимся, например, вероятностью неправильного расчета

$$p_1 = a \quad (0,001 \leq a \leq 0,05), \quad (4.32)$$

т. е. мы допускаем возможность a неправильных расчетов из 1000 выполненных тепловых расчетов радиоэлектронных аппаратов.

Подставив (4.32) в (4.31), найдем, что $z \approx z_1$, и допустимую погрешность методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата, можно определить из уравнения

$$aT_1^{(p)} - \left(\frac{m+1}{2m} b - 1 \right) (T_{11}^{(s)} - T_1^{(p)}) = \\ = z_1 \sqrt{\frac{\bar{T}_2}{4} + \left[\left(\frac{m-1}{6m} \right)^2 c^2 + \left(\frac{m+1}{2m} \right)^2 c^2 + \left(\frac{m-1}{6m} \right)^2 b^2 \right] (T_{11}^{(s)} - T_1^{(p)})^2}. \quad (4.33)$$

В радиоэлектронной аппаратуре с полупроводниковыми элементами наиболее чувствительными к перегреву являются транзисторы. Поэтому определим допустимую погрешность методики расчета теплового режима такого радиоэлектронного аппарата, в котором наиболее чувствительным к перегреву элементом является транзистор. Значения тепловых сопротивлений R_1 транзисторов во многом зависят от принятого процесса изготовления. Для лучших образцов разброс тепловых сопротивлений обычно лежит в пределах 1:2, следовательно, $m=2$. Анализ расчетов теплового режима реальных радиоэлектронных аппаратов

позволяет принять величину систематической погрешности при расчете температуры нагретой зоны равной одной десятой от температуры нагретой зоны.

Предположим, что систематическая погрешность при расчете температуры поверхности элементов равна $\varepsilon_1 = -0,1 (T_1^{(p)} - 273)$, т. е. $a = -0,1$. Анализ используемых значений мощностей рассеивания элементов в радиоэлектронных аппаратах позволяет принять $b = 0,8$ в (4.28) и $c = 0,15$ в (4.29).

Учитывая изложенные выше рассуждения, зададимся, например, вероятностью неправильного расчета $p_1 = 0,005$, т. е. мы допускаем из

1000 выполненных тепловых расчетов радиоэлектронных аппаратов 5 неправильных, тогда по (4.31) найдем $z_1 = 2,49$. Допустимую погреш-

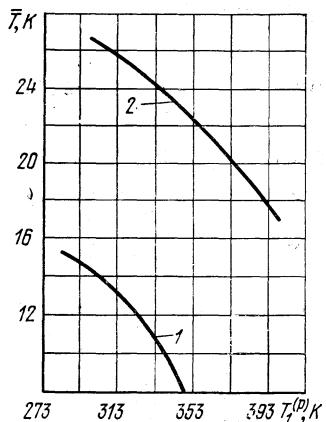


Рис. 4.1. Зависимость допустимой погрешности методики расчета от температуры нагретой зоны:

1 — германиевый транзистор; 2 — кремниевый транзистор.

нность методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата, в котором чувствительным к перегреву элементом является транзистор, можно определить, подставив найденные выше величины в (4.33):

$$0,4(T_{11}^{(3)} - 273) - 0,3(T_1^{(p)} - 273) = 2,49 \sqrt{\frac{T_2}{4} + 0,010(T_{11}^{(3)} - T_1^{(p)})^2} \cdot (4.34)$$

На рис. 4.1 приведены зависимости допустимой погрешности методики от величины расчетной температуры $T_1^{(p)}$ нагретой зоны радиоэлектронного аппарата $\bar{T} = f(T_1)$ для двух случаев: наиболее чувствительным к перегреву является германиевый транзистор с $T_{11}^{(3)} = 358$ К ($+85^{\circ}\text{C}$) (кривая 1); то же для кремниевого транзистора с $T_{11}^{(3)} = 423$ К ($+150^{\circ}\text{C}$) (кривая 2).

Как следует из рассмотрения кривых 1 и 2 на рис. 4.1, допустимая погрешность методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата, в котором чувствительным к перегреву элементом является транзистор, достаточно стабильна в широком диапазоне изменения температуры поверхности элементов, а следовательно, изменение температуры нагретой зоны аппарата, и лежит в пределах 9,7—14,8 К:

для германиевых транзисторов ($T_1^{(p)} = 343$ К) и 17,6—27,1 К,

для кремниевых транзисторов ($T_1^{(p)} = 398$ К).

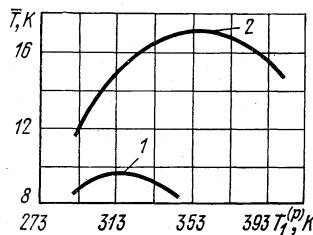


Рис. 4.2. Зависимость допустимой погрешности методики расчета от температуры нагретой зоны:

1 — германиевый диод; 2 — кремниевый диод.

Согласно (4.21) это соответствует величине среднеквадратической погрешности методики теплового расчета 4,8—7,4 К для германиевых и 8,8—13,6 К для кремниевых транзисторов.

Если в качестве примера принять, что в радиоэлектронном аппарате наиболее чувствительным к перегреву элементом является полупроводниковый диод, то в этом случае уравнение (4.33) примет вид

$$0,334 (T_{11}^{(3)} - 273) - 0,234 (T_1^{(p)} - 273) = \\ = 2,49 \sqrt{\frac{\bar{T}_2}{4} + 0,0175 (T_{11}^{(3)} - T_1^{(p)})^2}. \quad (4.35)$$

Уравнение (4.35) получено при условии, что у полупроводниковых диодов $m=1,5$.

На рис. 4.2 приведены зависимости допустимой погрешности \bar{T} методики от величины расчетной температуры $\bar{T}=f(T_1^{(p)})$ нагретой зоны радиоэлектронного аппарата $T=f(T_1^{(p)})$ для двух случаев: наиболее чувствительным к перегреву является германиевый полупроводниковый диод с $T_{11}^{(3)}=358$ К (кривая 1); то же для кремниевого полупроводникового диода $T_{11}^{(3)}=423$ К (кривая 2).

Как следует из рассмотрения кривых 1 и 2 на рис. 4.2, допустимая погрешность методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата, в котором наиболее чувствительным к перегреву является полупроводниковый диод, лежит в пределах 8,7—9,8 К для германиевых ($T_1^{(p)}=343$ К) и 15,8—17,1 К для кремниевых ($T_1^{(p)} \leq 398$ К) полупроводниковых диодов, что соответствует величине среднеквадратической погрешности методики теплового расчета 4,4—4,9 К для германиевых и 7,9—8,6 К для кремниевых полупроводниковых диодов.

Представляет интерес сопоставить применяемые в существующей практике методики теплового расчета РЭА. Для этого необходимо найти критерии сравнения. Вероятно, за основные критерии методики расчета могут быть приняты универсальность, сложность и погрешность. Но обычно более точные методики расчета менее универсальны и более сложны и, наоборот, за счет большей погрешности можно создать простую и универсальную методику. Тогда поставим задачу следующим образом: выберем методики расчета, обладающие одинаковой допустимой в настоящее время погрешностью, а затем сравним их по универсальности и сложности.

Для решения поставленной задачи были использованы результаты экспериментального исследования тепловых режимов радиоэлектронных аппаратов, среди которых были как аппараты на шасси и кассетной конструкции, так и аппараты смешанной конструкции, причем в рассмотренных аппаратах отсутствовали кондуктивные стоки тепла. Экспериментальные данные по тепловым режимам аппаратов получены в следующем диапазоне изменения исходных данных: температура охлаждающего воздуха на входе в аппарат и окружающей среды изменилась от 253 до 328 К; мощность, рассеиваемая в аппарате, измени-

лась от 5 до 300 Вт; коэффициент заполнения — от 0,1 до 0,65; массовый расход охлаждающего воздуха — от 0,003 до 0,24 кг/с; сечение аппарата — от 0,021 до 0,714 м²; длина аппарата в направлении обдува — от 0,1 до 0,8 м. Температура нагретой зоны определялась как средневзвешенная температура по отдельным участкам поверхности

$$T_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i S_i \left| \sum_{i=1}^n S_i \right|$$

где T_i — среднеповерхностная температура участка, на котором установлен спай i -й термопары; S_i — площадь поверхности i -го участка; n — число участков, на которое разделена нагретая зона.

Были выбраны пять инженерных методик для расчета тепловых режимов РЭА с вынужденным воздушным охлаждением, которые получили наибольшее распространение на практике. Методики отличались между собой как количеством учитываемых при расчете факторов, так и видом расчетных соотношений для определения коэффициентов теплообмена.

В методике 1 принято $\alpha \sim Re^{0.5}$, в теплообмене участвует вся поверхность нагретой зоны, определяющим размером является средний размер элементов, характерной скоростью воздуха является скорость в средневзвешенном сечении, часть тепла рассеивается корпусом, коэффициенты теплообмена корпуса с окружающей средой зависят от температуры. В методике 2 приняты те же предпосылки, что и в методике 1, только коэффициенты теплообмена корпуса с окружающей средой зависят от температуры. В методике 3 приняты те же предпосылки, что и в методике 2, но вместо $\alpha \sim Re^{0.5}$ использована зависимость $\alpha \sim Re^{0.8}$. Методика 4 отличается от методики 3 тем, что не учитывается тепло, рассеиваемое корпусом аппарата. Методика 5 аналогична методике 4, но для определения коэффициентов теплообмена элементов использованы формулы для тел простейшей формы (цилиндра, пластины, шара).

Для каждой из пяти методик определялись погрешность, сложность и универсальность. Кроме того, в процессе расчета оценивалась величина теплового потока, проходящего через корпус аппарата. Погрешность методики определялась из сравнения величины перегрева, рассчитанного по этой методике, с его экспериментальным значением. Сложность методики или ее трудоемкость определялась количеством времени и числом элементарных операций, необходимыми для проведения расчета теплового режима одного аппарата по данной методике. Под универсальностью понималась возможность применения данной методики к разнообразным в конструктивном исполнении аппаратам.

При определении погрешности методики определялись величины систематической $m = \sum_{i=1}^n \delta T_i / n$ и среднеквадратичной $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta T_i - m)^2 / (n-1)}$ погрешностей, где n — количество аппаратов; $\delta T_i = T_{i\text{эксп}} - T_{i\text{р}}$, $T_{i\text{эксп}}$ — экспериментально определенная температура нагретой зоны i -го аппарата ($i = 1, 2, \dots, n$); $T_{i\text{р}}$ — определенная при помощи расчета температура нагретой зоны i -го аппарата ($i = 1, 2, \dots, n$).

Для оценки количества времени, необходимого для проведения расчета теплового режима одного аппарата по данной методике (сложности), расчет предлагался лицам, имеющим различные навыки теплового расчета. Устанавливалось время расчета, а затем определялось среднее значение времени. Кроме этого определялось число элементарных операций, необходимых для проведения расчета по каждой из рассмотренных методик, причем за элементарную операцию принимались операции сложения, вычитания, умножения, деления и обращения к справочникам или таблицам. Данные по трудоемкости (сложности) различных методик и по их систематическим и среднеквадратичным погрешностям сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Данные по трудоемкости и погрешностям различных методик теплового расчета

Методика	m, K	σ, K	$\tau, ч$ (число операций)
1	-0,3	8,1	4,8(8000)
2	-0,35	8,2	3,5(6200)
3	0,8	8,5	3,5(6200)
4	1,8	8,7	1,5(2400)
5	-2,4	13,1	0,5(500)

Таблица 4.2

Среднеквадратичные погрешности $\sigma [K]$ тепловых расчетов для аппаратов различного конструктивного исполнения

Методика	Кассетные конструкции	Конструкции на шасси
1	8,25	8,0
2	8,3	8,15
3	8,6	8,45
4	8,7	8,7
5	13,0	13,2

С целью проверки универсальности рассматриваемых методик все аппараты были дифференцированы по конструктивному исполнению (конструкции на шасси, кассетные конструкции) и для каждой методики расчета были определены среднеквадратические погрешности для аппаратов различного конструктивного исполнения, которые приведены в табл. 4.2.

Анализ приведенных в табл. 4.1 данных показывает, что, несмотря на значительное отличие в трудоемкости (более чем в 3 раза), большинство существующих методик расчета теплового режима радиоэлектронных аппаратов обладает практически одинаковой погрешностью. Это говорит о том, что некоторые факторы, учитывающиеся в отдельных методиках, слабо влияют на тепловой режим. Сравнение данных, приведенных в табл. 4.2, показывает, что погрешность существующих методик расчета практически не зависит от конструкции радиоэлектронных аппаратов. Это означает, что тепловой режим принудительно вентилируемых радиоэлектронных аппаратов определяется в основном мощностью рассеивания, расходом и температурой охлаждающего воздуха, температурой окружающей среды, геометрическими размерами корпуса и площадью теплопередающей поверхности нагретой зоны, а следовательно, расчет теплового режима можно проводить по единой для различных конструкций методике, учитывающей вышеперечисленные факторы.

Анализ полученных в процессе расчетов величин теплового потока, проходящего через корпус принудительно вентилируемого радиоэлектронного аппарата, показал, что в подавляющем большинстве случаев

они составляют не более 3—5% от мощности, рассеиваемой в аппарате, т. е. практически все тепло, выделяемое в принудительно вентилируемых радиоэлектронных аппаратах, уносится охлаждающим воздухом.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Все рассмотренные методики расчета теплового режима принудительно вентилируемых радиоэлектронных аппаратов обладают одинаковой универсальностью.

2. Тепловой режим принудительно вентилируемого радиоэлектронного аппарата определяется в основном мощностью рассеивания, расходом и температурой охлаждающего воздуха, геометрическими размерами корпуса и площадью теплоотдающей поверхности нагретой зоны.

3. Практически все тепло, выделяемое в принудительно вентилируемом радиоэлектронном аппарате, уносится охлаждающим воздухом.

4. Для расчета теплового режима радиоэлектронных аппаратов различного конструктивного исполнения с принудительной вентиляцией можно применять единую методику расчета.

Как следует из табл. 4.1, наименьшая среднеквадратическая погрешность при определении температуры нагретой зоны имеет место для методики 1 и равна 8,1°C. Чтобы определить вероятность получения правильного расчета, по (4.33) находится величина z и затем используются таблицы [65]. Таким образом были определены вероятности получения правильного расчета для двух случаев: когда наиболее чувствительным к перегреву элементом является германиевый транзистор и когда кремниевый. Результаты приведены на рис. 4.3. Здесь кривая 1 характеризует зависимость вероятности получения правильного результата от величины температуры нагретой зоны, когда наиболее чувствительным к перегреву является германиевый транзистор, а кривая 2 — тоже для кремниевого транзистора. Анализ кривых на рис. 4.3 показывает, что существующие в настоящее время методики расчета теплового режима радиоэлектронных аппаратов допускают до 45 неверных расчетов из 1000, когда наиболее чувствительным к перегреву является германиевый транзистор и 2—4 неверных расчетов из 1000, когда наиболее чувствительным к перегреву является кремниевый транзистор. Эти значения совпадают с приведенными выше рассуждениями о допустимой погрешности методики расчета. Следовательно, большинство используемых в настоящее время методик расчета теплового режима РЭА имеет достаточную для практических применений точность.

Подобному анализу были подвергнуты существующие методики расчета теплового режима РЭА при естественном воздушном охлаждении.

Проведенный с единых позиций анализ существующих методов расчета тепловых режимов РЭА как при естественном, так и при вынужденном воздушном охлаждении, позволил рекомендовать ряд методик, которые подробно рассматриваются ниже.

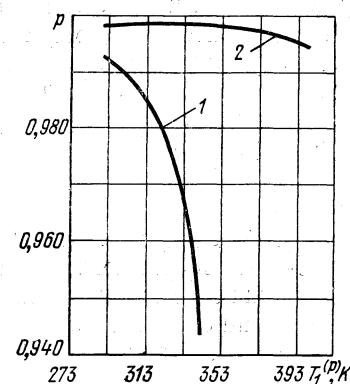


Рис. 4.3. Зависимость вероятности правильного расчета от температуры нагретой зоны:
1 — германиевый транзистор; 2 — кремниевый транзистор.

4.2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РЭА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Тепловой режим РЭА при естественном воздушном охлаждении зависит от многих факторов. Связь между перегревом нагретой зоны и влияющими факторами можно представить в виде [8].

$$\vartheta_3 = \prod_i K_i, \quad (4.36)$$

где ϑ_3 — перегрев нагретой зоны относительно температуры окружающей среды, а каждый коэффициент K_i зависит от одного параметра (фактора), влияющего на величину ϑ_3 . Величина перегрева нагретой зоны аппаратов в герметичном и перфорированном корпусах, работающих при нормальном атмосферном давлении и при отсутствии наружного обдува корпуса и внутреннего перемешивания воздуха, определяется в основном удельной мощностью нагретой зоны и коэффициентом перфорации, т. е.

$$\vartheta_3 = K_{q3} K_{\pi}, \quad (4.37)$$

где K_{q3} — коэффициент, зависящий от удельной мощности нагретой зоны; K_{π} — коэффициент, зависящий от коэффициента перфорации.

Удельная мощность нагретой зоны определяется как частное от деления мощности P_3 , рассеиваемой нагретой зоной, на условную поверхность нагретой зоны S_3 :

$$q_3 = P_3 / S_3, \quad (4.38)$$

где условная поверхность нагретой зоны определяется по формуле

$$S_3 = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2) l_3 K_3]. \quad (4.39)$$

Здесь $l_1 l_2$ — горизонтальные размеры корпуса аппарата; l_3 — вертикальный размер корпуса аппарата; K_3 — коэффициент заполнения.

Коэффициент перфорации определяется как отношение площади перфорационных отверстий S_{π} к площади оснований корпуса аппарата:

$$\Pi = S_{\pi} / 2l_1 l_2. \quad (4.40)$$

При создании методики расчета использовались экспериментальные данные по тепловым режимам реальных РЭА различного конструктивного исполнения: на шасси, с кассетами и смешанной конструкции. Аппараты имели герметичный либо перфорированный корпус. Тепловой режим этих РЭА определялся при нормальном и пониженном атмосферном давлении, причем в некоторых случаях для интенсификации теплообмена применялись либо наружный обдув корпуса, либо внутреннее перемешивание воздуха. Из анализа экспериментальных данных следует, что перегрев нагретой зоны нелинейно возрастает с ростом удельной мощности зоны и уменьшается с ростом коэффициента перфораций, асимптотически приближаясь к некоторой постоянной величине. Поэтому поведение K_{q3} и K_{π} можно описать зависимостями вида

$$K_{q3} = a_1 q_3 + a_2 q_3^2 + a_3 q_3^3, \quad (4.41)$$

$$K_{\pi} = a_2 + \frac{1}{a_3 + a_4 \Pi}, \quad (4.42)$$

и вычислить их по формуле

$$K_{q_3} = 0,1390q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} q_3^3, \quad (4.43)$$

$$K_{\Pi} = 0,29 + \frac{1}{0,41 + 4,95\Pi}. \quad (4.44)$$

Зависимости K_{q_3} и K_{Π} от q_3 и Π представлены на рис. 4.4 и 4.5 (на рис. 4.4 $K_{q_3} = \vartheta_2$).

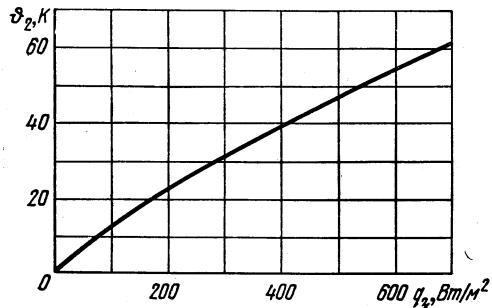


Рис. 4.4. Зависимость перегрева нагретой зоны от удельной мощности рассеивания.

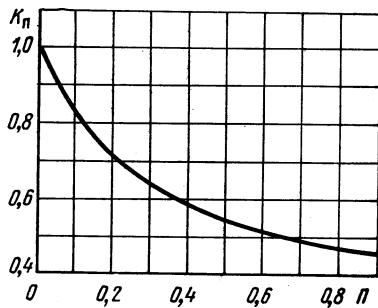


Рис. 4.5. Зависимость K_{Π} от коэффициента перфораций.

Аналогично было найдено выражение для определения перегрева корпуса герметичного аппарата ($\vartheta_1 = K_{q_k}$), работающего в нормальных условиях. Этот перегрев зависит от удельной мощности корпуса аппарата q_k , определяемой по

$$q_k = P_3/S_k, \quad (4.45)$$

где

$$S_k = 2[l_1l_2 + (l_1 + l_2)l_3]. \quad (4.46)$$

С использованием экспериментальных данных уравнение для K_{q_k} имеет вид

$$K_{q_k} = \vartheta_1 = 0,1472q_k - 0,2962 \cdot 10^{-3} q_k^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} q_k^3 \quad (4.47)$$

и графически представлено на рис. 4.6.

Наличие наружного обдува и изменение атмосферного давления снаружи влияет на величину перегрева корпуса ϑ_1 относительно температуры окружающей среды. Наличие внутреннего перемешивания и изменение атмосферного давления внутри корпуса влияет на величину перегрева ($\vartheta_2 - \vartheta_1$) нагретой зоны относительно температуры корпуса аппарата.

В общем случае перегрев нагретой зоны определяется как

$$\vartheta_3 = \vartheta_1 K_{H1} K_v + \\ + (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2} K_w, \quad (4.48)$$

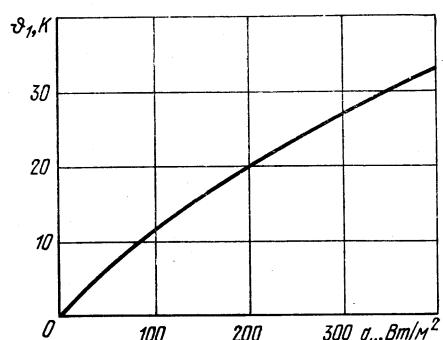


Рис. 4.6. Зависимость перегрева корпуса от удельной мощности.

где K_{H1} — коэффициент, зависящий от величины атмосферного давления снаружи корпуса аппарата H_1 ; K_v — коэффициент, зависящий от скорости наружного обдува корпуса аппарата v ; K_{H2} — коэффициент, зависящий от величины атмосферного давления внутри корпуса аппарата H_2 ; K_W — коэффициент, зависящий от скорости перемешивания воздуха в аппарате W :

$$W = a \frac{G_v}{V_b}, \quad (4.49)$$

где G_v — производительность вентилятора; V_b — объем воздуха в аппарате; $a = 0,6 \text{ м}^4/\text{кг}$.

Учитывая, что с ростом давления среды внутри и вне корпуса аппарата, скоростей наружного обдува и внутреннего перемешивания перегрев нагретой зоны уменьшается, коэффициенты K_{H1} , K_v , K_{H2} и K_W определялись в виде (4.42). Найденные с использованием экспериментальных данных по тепловым режимам реальных радиоэлектронных аппаратов уравнения для расчета коэффициентов K_{H1} , K_v , K_{H2} и K_W имеют следующий вид:

$$K_{H1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} H_1}, \quad (4.50)$$

$$K_v = \frac{1}{1 + 0,347 v}, \quad (4.51)$$

$$K_{H2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5} H_2}, \quad (4.52)$$

$$K_W = 0,08 + \frac{1}{1,09 + 0,27 W}. \quad (4.53)$$

Их графики показаны на рис. 4.7—4.10. Представленные выше коэффициенты получены в следующем диапазоне изменения исходных данных: $0 \leq q_3 \leq 600 \text{ Вт/м}^2$; $0 \leq \Pi \leq 0,8$, $0 \leq q_k \leq 400 \text{ Вт/м}^2$, $700 \leq H \leq 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $0 \leq v \leq 3,0$, $0 \leq W \leq 4,0$.

При определении вида зависимости величины перегрева поверхности элемента относительно температуры окружающей среды исходим из следующих рассуждений: тепловой поток, рассеиваемый элементом, поступает в нагретую зону и в окружающую среду, т. е.

$$P_{\text{эл}} = \sigma_{\text{эл з}} (\vartheta_{\text{эл}} - \vartheta_3) + \sigma_{\text{эл с}} \vartheta_{\text{эл}}, \quad (4.54)$$

где $P_{\text{эл}}$ — тепловой поток, рассеиваемый элементом; $\vartheta_{\text{эл}}$ — перегрев поверхности элемента относительно температуры окружающей среды; ϑ_3 — перегрев нагретой зоны относительно температуры окружающей среды; $\sigma_{\text{эл з}}$ — тепловая проводимость между поверхностью элемента и нагретой зоной; $\sigma_{\text{эл с}}$ — тепловая проводимость между поверхностью элемента и окружающей средой.

Из (4.54) следует, что

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left[\frac{\sigma_{\text{эл з}}}{\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл с}}} + \frac{P_{\text{эл}}}{\vartheta_3 (\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл с}})} \right], \quad (4.55)$$

так как

$$\vartheta_3 = P_3 / \sigma_{\text{зс}}; \quad q_{\text{эл}} = P_{\text{эл}} / S_{\text{эл}}; \quad q_3 = P_3 / S_3,$$

где $\sigma_{\text{зс}}$ — тепловая проводимость между нагретой зоной и окружающей средой; $S_{\text{эл}}$ — площадь теплоотдающей поверхности элемента (при на-

личии радиатора учитывается и поверхность радиатора), то (4.55) можно переписать так:

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left[\frac{\sigma_{\text{эл з}}}{\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл с}}} + \frac{q_{\text{эл}} \sigma_3 c S_3}{q_3 S_{\text{эл}} (\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл с}})} \right], \quad (4.56)$$

т. е. перегрев поверхности элемента можно представить в виде

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left(a + b \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \right). \quad (4.57)$$

Найденные методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных данных по тепловым режимам реальных радиоэлектронных аппаратов коэффициенты a и b равны соответственно: $a = -0,75$; $b = 0,25$ (исходные данные приведены на стр. 156).

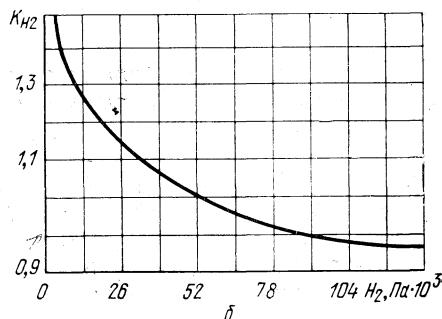
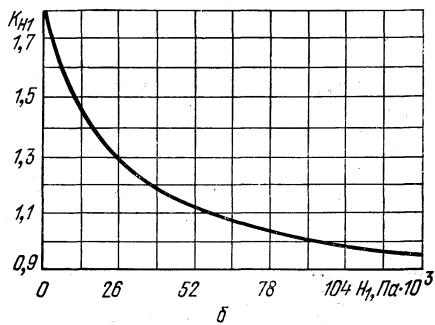
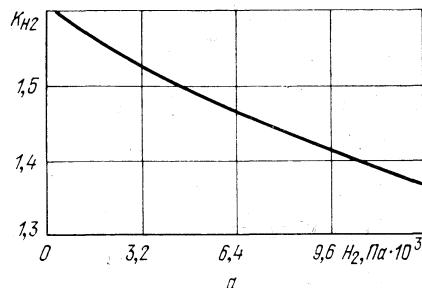
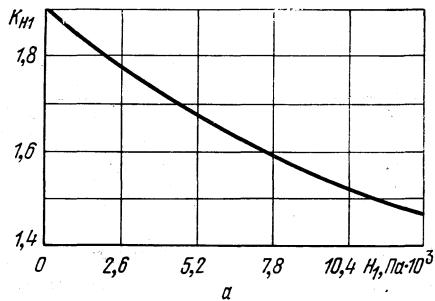


Рис. 4.7. Зависимость K_{H1} от давления окружающей среды:

а) $0 \leq H_1 \leq 2,6 \cdot 10^3$ Па; б) $0 \leq H_1 \leq 130 \cdot 10^3$ Па.

Рис. 4.8. Зависимость K_{H2} от давления среды внутри аппарата:

а) $0 \leq H_2 \leq 12,8 \cdot 10^3$ Па; б) $0 \leq H \leq 130 \cdot 10^3$ Па.

Формула (4.56) не учитывает особенностей монтажа элементов. Разработка методики, учитывающей особенности монтажа и конструкции элемента, позволит повысить точность расчета температуры поверхности элемента.

Приведенные зависимости позволяют определить среднеповерхностную температуру нагретой зоны и температуры поверхности элементов РЭА при естественном воздушном охлаждении.

На основании сравнения расчетных и экспериментальных данных были построены гистограммы погрешностей расчета перегревов нагретой зоны (рис. 4.11) и элементов (рис. 4.12). Анализ гистограмм показал, что среднеквадратическая погрешность предлагаемой методики

составляет 8 К при расчете перегрева поверхности элемента. Следовательно, погрешность этой методики имеет точность, рекомендованную нами в предыдущем параграфе для инженерных расчетов. Методика достаточно универсальна и при использовании рис. 4.4—4.10 является простой.

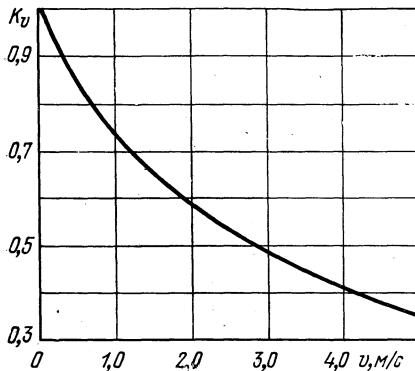


Рис. 4.9. Зависимость K_v от скорости обдува.

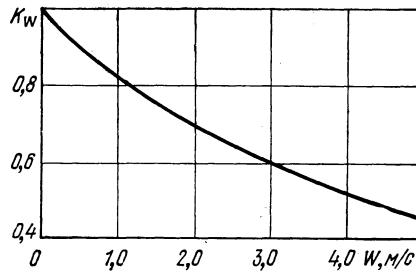


Рис. 4.10. Зависимость K_w от скорости перемешивания.

Для облегчения пользования методикой теплового расчета РЭА с естественным воздушным охлаждением приведем ряд алгоритмов и примеры расчета по ним.

Порядок расчета теплового режима блока в герметичном корпусе

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46), где $l_1 l_2$ — горизонтальные размеры корпуса блока; l_3 — вертикальный размер корпуса блока (рис. 4.13).
2. Определяется условная поверхность нагретой зоны по (4.39).
3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (4.45).
4. Рассчитывается удельная мощность нагретой зоны по (4.38).
5. Находится коэффициент ϑ_1 в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).
6. Находится коэффициент ϑ_2 в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).
7. Находится коэффициент K_{H1} в зависимости от давления среды вне корпуса блока H_1 (рис. 4.7).
8. Находится коэффициент K_{H2} в зависимости от давления среды внутри корпуса блока H_2 (рис. 4.8).
9. Определяется перегрев корпуса блока

$$\vartheta_k = \vartheta_1 K_{H1}. \quad (4.58)$$

10. Рассчитывается перегрев нагретой зоны

$$\vartheta_3 = \vartheta_k + (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2}. \quad (4.59)$$

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке

$$\vartheta_B = 0.5(\vartheta_k + \vartheta_3). \quad (4.60)$$

12. Определяется удельная мощность элемента

$$q_{\text{эл}} = P_{\text{эл}} / S_{\text{эл}}, \quad (4.61)$$

где $P_{\text{эл}}$ — мощность, рассеиваемая элементом (узлом), температуру которого требуется определить; $S_{\text{эл}}$ — площадь поверхности элемента (вместе с радиатором), омываемая воздухом.

13. Рассчитывается перегрев поверхности элемента по (4.57).

14. Рассчитывается перегрев окружающей элемент среды

$$\vartheta_{\text{эс}} = \vartheta_{\text{в}} \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{\text{эл}}}{q_{\text{в}}} \right). \quad (4.62)$$

15. Определяется температура корпуса блока

$$T_{\text{к}} = \vartheta_{\text{к}} + T_{\text{с}}, \quad (4.63)$$

где $T_{\text{с}}$ — температура окружающей блок среды.

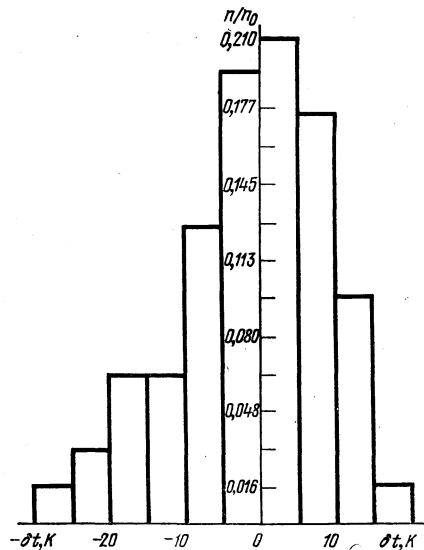


Рис. 4.11. Гистограмма погрешностей расчета перегревов нагретой зоны:
 n/n_0 — относительное число блоков.

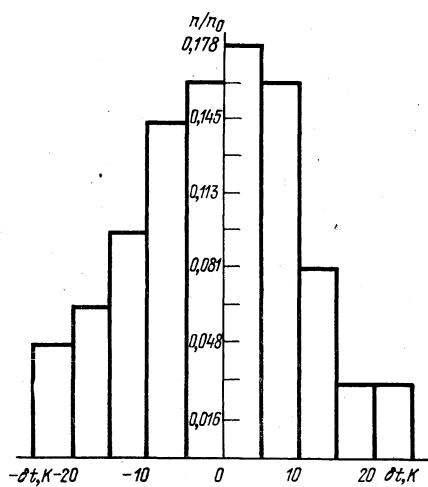


Рис. 4.12. Гистограмма погрешностей расчета перегревов элементов:
 n/n_0 — относительное число элементов.

16. Определяется температура нагретой зоны

$$T_{\text{з}} = \vartheta_{\text{з}} + T_{\text{с}}. \quad (4.64)$$

17. Находится температура поверхности элемента

$$T_{\text{эл}} = \vartheta_{\text{эл}} + T_{\text{с}}. \quad (4.65)$$

18. Находится средняя температура воздуха в блоке

$$T_{\text{в}} = \vartheta_{\text{в}} + T_{\text{с}}. \quad (4.66)$$

19. Находится температура окружающей элемент среды

$$T_{\text{эс}} = \vartheta_{\text{эс}} + T_{\text{с}}. \quad (4.67)$$

Порядок расчета теплового режима блока в герметичном корпусе с внутренним перемешиванием

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46).
2. Рассчитывается условная поверхность нагретой зоны по (4.39).
3. Находится удельная мощность корпуса блока по (4.45).
4. Находится удельная мощность нагретой зоны по (4.38).
5. Определяется коэффициент ϑ_1 в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).
6. Определяется коэффициент ϑ_2 в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).
7. Находится коэффициент K_{H1} в зависимости от атмосферного давления вне корпуса блока H_1 (рис. 4.7).
8. Рассчитывается объем воздуха в блоке

$$V_B = l_1 l_2 l_3 (1 - K_a). \quad (4.68)$$

9. Рассчитывается средняя скорость перемешивания воздуха в блоке по (4.49) (при пониженном давлении внутри корпуса блока в (4.49) должна входить производительность вентилятора с учетом изменения давления).

10. Определяется коэффициент K_w в зависимости от средней скорости перемешивания (рис. 4.10).
11. Определяется перегрев корпуса блока по (4.58).
12. Определяется перегрев нагретой зоны

$$\vartheta_3 = \vartheta_1 (K_{H1} - 1) + \vartheta_2 K_w. \quad (4.69)$$

13. Определяется средний перегрев воздуха в блоке

$$\vartheta_B = 0,75 \vartheta_3. \quad (4.70)$$

14. Находится удельная мощность элемента по (4.61).
15. Рассчитывается перегрев поверхности элемента по (4.57).
16. Рассчитывается перегрев окружающей элемент среды по (4.62).
17. Находится температура корпуса блока по (4.63).
18. Находится температура нагретой зоны, поверхности элемента, средняя температура воздуха в блоке и температура окружающей элемент среды по формулам (4.64) — (4.67).

Порядок расчета теплового режима блока в герметичном корпусе с наружным обдувом

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46).
2. Рассчитывается условная поверхность нагретой зоны по (4.39).
3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (4.45).
4. Определяется удельная мощность нагретой зоны по (4.38).
5. Находится коэффициент ϑ_1 в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).
6. Находится коэффициент ϑ_2 в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).
7. Находится коэффициент K_{H2} в зависимости от давления внутри корпуса блока H_2 (рис. 4.8).

8. Рассчитывается перегрев между нагретой зоной и корпусом блока.

$$\vartheta_{21} = (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2} \quad (4.71)$$

9. Рассчитывается перегрев корпуса блока с наружным обдувом

$$\vartheta_k = q_k / (12 + 4,17v), \quad (4.72)$$

где v — скорость обдува (при пониженном давлении в (4.72) должна входить скорость с учетом изменения давления).

10. Определяется перегрев нагретой зоны блока с наружным обдувом

$$\vartheta_3 = \vartheta_k + \vartheta_{21}. \quad (4.73)$$

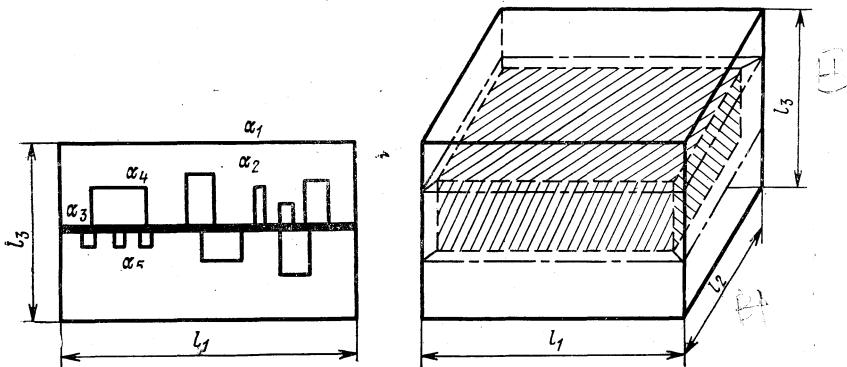


Рис. 4.13. Схемы блока в герметичном исполнении.

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по (4.70).

12. Рассчитывается удельная мощность элемента, перегревы его поверхности и окружающей среды по (4.61), (4.57), (4.62).

13. Находятся температуры корпуса блока, нагретой зоны, поверхности элемента, воздуха в блоке и окружающей среды элемент среды по формулам (4.63) — (4.67).

Порядок расчета теплового режима блока в герметичном обреображенном корпусе

1. Определяется поверхность ненебренного корпуса блока по (4.46).

2. Определяются условная поверхность нагретой зоны, удельная мощность ненебренного корпуса блока, удельная мощность нагретой зоны по формулам (4.39), (4.45), (4.38).

3. Определяется коэффициент ϑ_1 в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6).

4. Определяется коэффициент ϑ_2 в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4).

5. Рассчитывается перегрев между нагретой зоной и корпусом ненебренного блока

$$\vartheta_{21} = \vartheta_2 - \vartheta_1. \quad (4.74)$$

6. Рассчитывается поверхность обреенного корпуса блока

$$S_{kp} = S_{kh} + S_p, \quad (4.75)$$

где $S_{\text{кн}}$ — поверхность корпуса, не занятая ребрами; S_p — поверхность ребер.

7. Рассчитывается удельная мощность оребренного корпуса блока.

$$q_{\text{кр}} = P/S_{\text{кр}}. \quad (4.76)$$

8. Определяется коэффициент ϑ_{1p} в зависимости от удельной мощности оребренного корпуса блока (рис. 4.6).

9. Находятся коэффициенты K_{H1} и K_{H2} в зависимости от атмосферного давления вне и внутри корпуса блока — H_1 и H_2 (рис. 4.7 и 4.8).

10. Рассчитывается перегрев оребренного корпуса блока

$$\vartheta_k = \vartheta_{1p} K_{H1}. \quad (4.77)$$

11. Рассчитывается перегрев нагретой зоны с оребренным корпусом

$$\vartheta_3 = \vartheta_k + (\vartheta_2 - \vartheta_1) K_{H2}. \quad (4.78)$$

12. Рассчитывается средний перегрев воздуха в блоке по (4.70).

13. Определяется удельная мощность элемента, перегревы его поверхности и окружающей среды по (4.61), (4.57) и (4.62).

14. Находятся температуры поверхности корпуса блока, нагретой зоны, поверхности элемента, воздуха в блоке и окружающей элемент среды по (4.63) — (4.67).

Порядок расчета теплового режима блока в перфорированном корпусе

1. Рассчитываются: поверхность корпуса блока, условная поверхность нагретой зоны, удельная мощность корпуса блока, удельная мощность нагретой зоны по (4.46), (4.39), (4.45) и (4.38).

2. Находятся коэффициенты ϑ_1 и ϑ_2 в зависимости от удельной мощности корпуса блока и удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4 и 4.6).

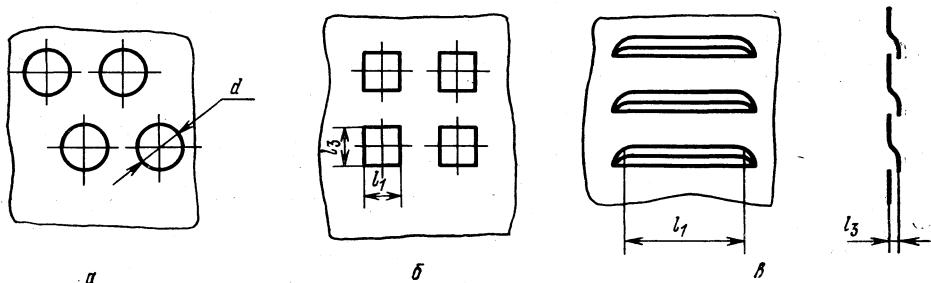


Рис. 4.14. Конфигурации перфорационных отверстий.

3. Находятся коэффициенты K_{H1} и K_{H2} в зависимости от давления вне и внутри корпуса блока — H_1 , H_2 (рис. 4.7 и 4.8).

4. Рассчитывается площадь перфорационных отверстий. Для прямоугольных отверстий (рис. 4.14, б и в) $S = nl_1 l_3$, где n — количество отверстий; l_1 — горизонтальный размер отверстия; l_3 — вертикальный размер отверстия. Для круглых отверстий (рис. 4.14, а) $S = n\pi d^2/4$, где d — диаметр отверстия.

5. Рассчитывается коэффициент перфораций по (4.40).

6. Находится коэффициент $K_{\text{п}}$ в зависимости от коэффициента порфораций (рис. 4.5).

7. Определяется перегрев корпуса блока

$$\vartheta_{\text{к}} = \vartheta_1 K_{\text{H1}} K_{\text{п}} \cdot 0,93. \quad (4.79)$$

8. Определяется перегрев нагретой зоны

$$\vartheta_3 = 0,93 K_{\text{п}} \left[\vartheta_1 K_{\text{H1}} + \left(\vartheta_2 \frac{1}{0,93} - \vartheta_1 \right) K_{\text{H2}} \right]. \quad (4.80)$$

9. Определяется средний перегрев воздуха в блоке

$$\vartheta_{\text{в}} = \vartheta_3 \cdot 0,6. \quad (4.81)$$

10. Рассчитываются удельная мощность элемента, перегрев поверхности элемента, перегрев окружающей элемент среды по (4.61), (4.57) и (4.62).

11. Находятся температуры корпуса блока, нагретой зоны, поверхности элемента, воздуха в блоке, окружающей элемент среды по (4.63) — (4.67).

Пример. Определить тепловой режим блока в герметичном корпусе и его элементов. Мощность, рассеиваемая в блоке, $P=30$ Вт; мощность, рассеиваемая двумя элементами: 1) $P_{\text{эл}}=2,8$ Вт; 2) $P_{\text{эл}}=2,2$ Вт; горизонтальные размеры корпуса блока $l_1=0,160$ м, $l_2=0,180$ м, вертикальный размер корпуса блока $l_3=0,190$ м; площадь поверхности элементов: 1) $S_{\text{эл}}=8 \cdot 10^{-3}$ м², 2) $S_{\text{эл}}=118 \cdot 10^{-3}$ м²; коэффициент заполнения $K_{\text{з}}=0,3$; температура окружающей среды $T_{\text{с}}=293$ К (+20°C); давление окружающей среды $H_1=H_2=0,1$ МПа.

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46)

$$S_{\text{к}} = 2[0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190] = 0,187 \text{ м}^2.$$

2. Определяется условная поверхность нагретой зоны по (4.39)

$$S_3 = 2[0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190 \cdot 0,3] = 0,096 \text{ м}^2.$$

3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (4.45)

$$q_{\text{к}} = 30 / 0,187 = 160 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Рассчитывается удельная мощность нагретой зоны по (4.38)

$$q_3 = 30 / 0,096 = 312 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности корпуса блока (рис. 4.6)

$$\vartheta_1 = 17,5 \text{ К.}$$

6. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности нагретой зоны (рис. 4.4)

$$\vartheta_2 = 33,0 \text{ К.}$$

7. Находится коэффициент, зависящий от атмосферного давления вне корпуса (рис. 4.7, a)

$$K_{\text{н1}} = 1,0.$$

8. Находится коэффициент, зависящий от давления внутри корпуса блока (рис. 4.8)

$$K_{\text{н2}} = 1,0.$$

9. Определяется перегрев корпуса блока по (4.58)

$$\vartheta_{\text{к}} = 17,5 \cdot 1,0 = 17,5 \text{ К.}$$

10. Рассчитывается перегрев нагретой зоны по (4.59)

$$\vartheta_3 = 17,5 + (33 - 17,5) \cdot 1,0 = 33 \text{ К.}$$

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по (4.60)

$$\vartheta_v = 0,5(33 + 17,5) = 25,3 \text{ К.}$$

12. Определяется удельная мощность элементов по (4.61)

1) $q_{\text{эл}} = 2,8 / 8 \cdot 10^{-3} = 350 \text{ Вт/м}^2$,

2) $q_{\text{эл}} = 2,2 / 118 \cdot 10^{-3} = 18,6 \text{ Вт/м}^2$.

13. Рассчитывается перегрев поверхности элементов по (4.57)

1) $\vartheta_{\text{эл}} = 33 \left(0,75 + 0,25 \frac{350}{312} \right) = 34 \text{ К,}$

2) $\vartheta_{\text{эл}} = 33 \left(0,75 + 0,25 \frac{18,6}{312} \right) = 25,2 \text{ К.}$

14. Рассчитывается перегрев окружающей среды по (4.62)

1) $\vartheta_{\text{sc}} = 25,3 \left(0,75 + 0,25 \frac{350}{312} \right) = 26,1 \text{ К,}$

2) $\vartheta_{\text{sc}} = 25,3 \left(0,75 + 0,25 \frac{18,6}{312} \right) = 19,3 \text{ К.}$

15. Определяется температура корпуса блока по (4.63)

$$T_k = 17,5 + 293 = 310,5 \text{ К.}$$

16. Определяется температура нагретой зоны по (4.64)

$$T_3 = 33 + 293 = 326 \text{ К.}$$

17. Находится температура поверхности элементов по (4.65)

1) $T_{\text{эл}} = 34 + 293 = 327 \text{ К,}$

2) $T_{\text{эл}} = 25,2 + 293 = 318,2 \text{ К.}$

18. Находится средняя температура воздуха в блоке по (4.66)

$$T_v = 25,3 + 293 = 318,2 \text{ К.}$$

19. Находится температура окружающей среды по (4.67)

1) $T_{\text{sc}} = 26,1 + 293 = 319,1 \text{ К,}$

2) $T_{\text{sc}} = 19,3 + 293 = 312,3 \text{ К.}$

Пример. Определить тепловой режим блока в герметичном корпусе с внутренним перемешиванием и его элементов.

Мощность, рассеиваемая в блоке, $P = 190 \text{ Вт}$; мощность, рассеиваемая двумя элементами: 1) $P_{\text{эл}} = 5,5 \text{ Вт}$, 2) $P_{\text{эл}} = 7,0 \text{ Вт}$; горизонтальные размеры корпуса блока $l_1 = 0,2 \text{ м}$, $l_2 = 0,4 \text{ м}$; вертикальный размер корпуса блока $l_3 = 0,19 \text{ м}$; площадь поверхности элементов: 1) $S = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, 2) $S_{\text{эл}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; коэффициент заполнения $K_s = 0,3$; температура окружающей среды $T_c = 308 \text{ К}$ ($+35^\circ\text{C}$); производительность вентилятора $G_v = 50,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; давление окружающей среды $H_1 = 0,1 \text{ МПа}$.

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46)

$$S_k = 2[0,2 \cdot 0,4 + (0,2 + 0,4) \cdot 0,19] = 0,388 \text{ м}^2.$$

2. Рассчитывается условная поверхность нагретой зоны по (4.39)

$$S_3 = 2[0,2 \cdot 0,4 + (0,2 + 0,4) \cdot 0,19 \cdot 0,3] = 0,228 \text{ м}^2.$$

3. Находится удельная мощность корпуса блока по (4.45)

$$q_k = 190/0,388 = 490 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Находится удельная мощность нагретой зоны по (4.38)

$$q_z = 190/0,228 = 835 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Определяется коэффициент ϑ_1 в зависимости от удельной мощности корпуса блока $\vartheta_1 = 38 \text{ К}$ (рис. 4.6).

6. Определяется коэффициент ϑ_2 в зависимости от удельной мощности нагретой зоны $\vartheta_2 = 70 \text{ К}$ (рис. 4.4).

7. Находится коэффициент, зависящий от атмосферного давления $K_{H1} = 1,0$ (рис. 4.7).

8. Рассчитывается объем воздуха в блоке по (4.68)

$$V_b = 0,2 \cdot 0,4 \cdot 0,19 (1 - 0,3) = 10,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

9. Рассчитывается средняя скорость перемешивания воздуха в блоке по (4.49)

$$W = 0,6 \frac{50,9 \cdot 10^{-3}}{10,6 \cdot 10^{-3}} = 2,9 \text{ м/с.}$$

10. Определяется коэффициент, зависящий от средней скорости перемешивания воздуха $K_w = 0,61$ (рис. 4.10).

11. Определяется перегрев корпуса блока по (4.58)

$$\vartheta_k = 38 \cdot 1,0 = 38 \text{ К.}$$

12. Определяется перегрев нагретой зоны по (4.69)

$$\vartheta_z = 38(1,0 - 1,0) + 70 \cdot 0,61 = 42,7 \text{ К.}$$

13. Определяется средний перегрев воздуха в блоке (4.70)

$$\vartheta_b = 0,75 \cdot 42,7 = 32 \text{ К.}$$

14. Находится удельная мощность элементов по (4.61)

1) $q_{el} = 5,5/(30 \cdot 10^{-3}) = 183,5 \text{ Вт/м}^2,$

2) $q_{el} = 7,0/(8 \cdot 10^{-3}) = 876 \text{ Вт/м}^2.$

15. Рассчитывается перегрев поверхности элементов по (4.57)

1) $\vartheta_{el} = 42,7 \left(0,75 + 0,25 \frac{183,5}{835} \right) = 34,4 \text{ К,}$

2) $\vartheta_{el} = 42,7 \left(0,75 + 0,25 \frac{876}{835} \right) = 43,2 \text{ К.}$

16. Рассчитывается перегрев окружающей элемент среды по (4.62)

1) $\vartheta_{ec} = 32 \left(0,75 + 0,25 \frac{183,5}{835} \right) = 25,8 \text{ К,}$

2) $\vartheta_{ec} = 32 \left(0,75 + 0,25 \frac{876}{835} \right) = 32,4 \text{ К.}$

17. Находится температура корпуса блока по (4.63)

$$T_k = 38 + 308 = 346 \text{ К.}$$

18. Находится температура нагретой зоны по (4.64)

$$T_z = 42,7 + 308 = 350,7 \text{ К;}$$

температура поверхности элементов по (4.65)

$$1) \quad T_{\text{эл}} = 34,4 + 308 = 342,4 \text{ К},$$

$$2) \quad T_{\text{эл}} = 43,2 + 308 = 351,2 \text{ К},$$

средняя температура воздуха в блоке по (4.66)

$$T_{\text{в}} = 32 + 308 = 340 \text{ К},$$

температура окружающей среды по (4.67)

$$1) \quad T_{\text{с}} = 25,8 + 308 = 333,8 \text{ К},$$

$$2) \quad T_{\text{с}} = 32,4 + 308 = 340,4 \text{ К}.$$

Пример. Определить тепловой режим блока в герметичном исполнении с наружным обдувом и его элемента. Мощность, рассеиваемая в блоке, $P=50$ Вт; мощность, рассеиваемая одним из элементов, $P_{\text{эл}}=7,0$ Вт; горизонтальные размеры корпуса блока $l_1=0,15$ м, $l_2=0,4$ м; вертикальный размер корпуса блока $l_3=0,15$ м; площадь поверхности элемента $S_{\text{эл}}=8 \cdot 10^{-3}$ м²; коэффициент заполнения $K_{\text{з}}=0,3$; температура окружающей среды $T_{\text{с}}=293$ К; скорость воздуха, обдувающего наружную поверхность блока, $v=3$ м/с; давление окружающей среды $H_1=H_2=0,1$ МПа.

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по (4.46)

$$S_{\text{к}} = 2[0,15 \cdot 0,4 + (0,15 + 0,4) \cdot 0,15] = 0,295 \text{ м}^2.$$

2. Рассчитывается условная поверхность нагретой зоны по (4.39)

$$S_{\text{з}} = 2[0,15 \cdot 0,4 + (0,15 + 0,4) \cdot 0,3] = 0,170 \text{ м}^2.$$

3. Определяется удельная мощность корпуса блока по (4.45)

$$q_{\text{к}} = 50 / 0,295 = 170 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Определяется удельная мощность нагретой зоны по (4.38)

$$q_{\text{з}} = 50 / 0,170 = 294 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Находится коэффициент, зависящий от удельной мощности корпуса блока $\vartheta_1 = 17$ К (рис. 4.6).

6. Находится коэффициент, зависящий от удельной мощности нагретой зоны $\vartheta_2 = 32$ К (рис. 4.4).

7. Находится коэффициент, зависящий от атмосферного давления $K_{\text{н2}}=1,0$ (рис. 4.8).

8. Рассчитывается перегрев между нагретой зоной и корпусом блока по (4.71)

$$\vartheta_{21} = (32 - 17) \cdot 1,0 = 15 \text{ К}.$$

9. Рассчитывается перегрев корпуса блока с наружным обдувом по (4.72)

$$\vartheta_{\text{к}} = 170 / (12 + 4,17 \cdot 3,0) = 6,9 \text{ К}.$$

10. Определяется перегрев нагретой зоны блока с наружным обдувом по (4.73)

$$\vartheta_{\text{з}} = 6,9 + 15 = 21,9 \text{ К}.$$

11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по (4.70)

$$\vartheta_{\text{в}} = 0,75 \cdot 21,9 = 16,4 \text{ К}.$$

12. Рассчитываются: удельная мощность элемента по (4.61)

$$q_{\text{эл}} = 7,0 / (8 \cdot 10^{-3}) = 875 \text{ Вт/м}^2;$$

перегрев поверхности элемента по (4.57)

$$\vartheta_{\text{эл}} = 21,9 \left(0,75 + 0,25 \frac{875}{294} \right) = 32,8 \text{ К};$$

перегрев окружающей среды по (4.62)

$$\vartheta_{sc} = 16,4 \left(0,75 + 0,25 \frac{875}{294} \right) = 24,5 \text{ К.}$$

13. Находятся: температура корпуса блока по (4.63)

$$T_k = 6,9 + 293 = 299,9 \text{ К,}$$

температура нагретой зоны по (4.64)

$$T_s = 21,9 + 293 = 314,9 \text{ К;}$$

температура поверхности элемента по (4.65)

$$T_{el} = 32,8 + 293 = 325,8 \text{ К;}$$

средняя температура воздуха в блоке по (4.66)

$$T_b = 16,4 + 293 = 309,4 \text{ К;}$$

температура окружающей среды по (4.67)

$$T_{sc} = 24,5 + 293 = 317,5 \text{ К.}$$

Пример. Рассчитать тепловой режим герметичного блока с оребренным корпусом. Условия те же, что и в примере 1.

Поверхность оребрения корпуса $S_{kp} = 0,168 \text{ м}^2$, давление вне корпуса блока $H_1 = 5,27 \cdot 10^4 \text{ Па}$; давление внутри корпуса блока $H_2 = 9,2 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

1. Определяется поверхность неоребренного корпуса блока по (4.46)

$$S_k = 2[0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190] = 0,187 \text{ м}^2.$$

2. Определяются: условная поверхность нагретой зоны по (4.39)

$$S_s = 2[0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,193 \cdot 0,3] = 0,096 \text{ м}^2;$$

удельная мощность неоребренного корпуса блока по (4.45)

$$q_k = 30/0,187 = 160 \text{ Вт/м}^2;$$

удельная мощность нагретой зоны по (4.38)

$$q_s = 30/0,096 = 312 \text{ Вт/м}^2.$$

3. Определяется коэффициент, зависящий от удельной мощности корпуса блока, $\vartheta_1 = 17,5 \text{ К}$ (рис. 4.4).

4. Определяется коэффициент, зависящий от удельной мощности нагретой зоны, $\vartheta_2 = 33 \text{ К}$ (рис. 4.4).

5. Рассчитывается перегрев между нагретой зоной и корпусом неоребренного блока по (4.74)

$$\vartheta_{21} = 33 - 17,5 = 15,5 \text{ К.}$$

6. Рассчитывается поверхность оребренного корпуса блока по (4.75)

$$S_{kp} = 0,187 + 0,168 = 0,355 \text{ м}^2.$$

7. Рассчитывается удельная мощность оребренного корпуса блока по (4.76)

$$q_{kp} = 30/0,355 = 84,5 \text{ Вт/м}^2.$$

8. Определяется коэффициент, зависящий от удельной мощности оребренного корпуса блока, $\vartheta_{1p} = 10 \text{ К}$ (рис. 4.6).

9. Находятся коэффициенты, зависящие от атмосферного давления вне и внутри корпуса блока, $K_{H1} = 1,1$; $K_{H2} = 1,02$ (рис. 4.7 и 4.8).

10. Рассчитывается перегрев оребренного корпуса блока по (4.77)

$$\vartheta_k = 10 \cdot 1,1 = 11 \text{ К.}$$

11. Рассчитывается перегрев нагретой зоны с оребренным корпусом по (4.78)

$$\vartheta_s = 11 + (33 - 17,5) \cdot 1,01 = 26,7 \text{ К.}$$

12. Рассчитывается средний перегрев воздуха в блоке по (4.70)

$$\vartheta_v = 0,5(26,7 + 11) = 18,9 \text{ К.}$$

13. Определяются: удельная мощность элементов по (4.61)

1) $q_{\text{эл}} = 350 \text{ Вт/м}^2$,

2) $q_{\text{эл}} = 18,6 \text{ Вт/м}^2$;

перегрев поверхности элементов по (4.57)

1) $\vartheta_{\text{эл}} = 26,7 \left(0,75 + 0,25 \frac{350}{312} \right) = 27,5 \text{ К,}$

2) $\vartheta_{\text{эл}} = 26,7 \left(0,75 + 0,25 \frac{18,6}{312} \right) = 20 \text{ К;}$

перегрев окружающей элементы среды по (4.62)

1) $\vartheta_{\text{sc}} = 18,9 \left(0,75 + 0,25 \frac{350}{312} \right) = 19,5 \text{ К,}$

2) $\vartheta_{\text{sc}} = 18,9 \left(0,75 + 0,25 \frac{18,6}{312} \right) = 14,2 \text{ К.}$

14. Находятся: температура поверхности корпуса блока по (4.63)

$$T_k = 11 + 293 = 304 \text{ К;}$$

температура нагретой зоны по (4.64)

$$T_s = 26,7 + 293 = 319 \text{ К;}$$

температура поверхности элементов по (4.65)

1) $T_{\text{эл}} = 27,5 + 293 = 320,5 \text{ К,}$

2) $T_{\text{эл}} = 20 + 293 = 313 \text{ К;}$

средняя температура воздуха в блоке по (4.66)

$$T_v = 18,9 + 293 = 311,9 \text{ К;}$$

температура окружающей элементы среды по (4.67)

1) $T_{\text{sc}} = 19,5 + 293 = 312 \text{ К,}$

2) $T_{\text{sc}} = 14,2 + 293 = 307,2 \text{ К.}$

Пример. Определить тепловой режим блока в перфорированном корпусе и его элементов.

Мощность, рассеиваемая в блоке, $P = 250 \text{ Вт}$; мощность, рассеиваемая тремя элементами: 1) $P_{\text{эл}} = 2,0 \text{ Вт}$; 2) $P_{\text{эл}} = 1,0 \text{ Вт}$; 3) $P_{\text{эл}} = 4,0 \text{ Вт}$; горизонтальные размеры корпуса блока $l_1 = 0,350 \text{ м}$, $l_2 = 0,400 \text{ м}$; $l_3 = 0,250 \text{ м}$; площадь поверхности элементов: 1) $S_{\text{эл}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, 2) $S_{\text{эл}} = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, 3) $S_{\text{эл}} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; коэффициент заполнения $K_s = 0,4$; количество перфорационных отверстий $n = 500$; диаметр перфорационного отверстия $d = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; давление окружающей среды $H_1 = 0,1 \text{ МПа}$; температура окружающей среды $T_c = 293 \text{ К.}$

1. Рассчитываются: поверхность корпуса блока по (4.46)

$$S_k = 2[0,350 \cdot 0,400 + (0,350 + 0,400) \cdot 0,250] = 0,655 \text{ м}^2;$$

условная поверхность нагретой зоны по (4.39)

$$S_s = 2[0,350 \cdot 0,400 + (0,350 + 0,400) \cdot 0,250 \cdot 0,4] = 0,430 \text{ м}^2;$$

удельная мощность корпуса блока по (4.45)

$$q_k = 250/0,655 = 382 \text{ Вт/м}^2;$$

удельная мощность нагретой зоны по (4.38)

$$q_3 = 250/0,430 = 582 \text{ Вт/м}^2.$$

2. Находятся коэффициенты, зависящие от удельной мощности корпуса блока и нагретой зоны $\vartheta_1 = 32 \text{ К}$, $\vartheta_2 = 53 \text{ К}$ (рис. 4.6 и 4.4).

3. Находятся коэффициенты, зависящие от атмосферного давления окружающей среды, $K_{H1} = K_{H2} = 1,0$ (рис. 4.7 и 4.8).

4. Рассчитывается площадь перфорационных отверстий

$$S = (3,14 \cdot 64 \cdot 10^{-6})/4 \cdot 500 = 0,025 \text{ м}^2.$$

5. Рассчитывается коэффициент перфораций по (4.40)

$$K_{\Pi} = 0,025/(2 \cdot 0,350 \cdot 0,400) = 0,09.$$

6. Находится коэффициент, зависящий от коэффициента перфорации $K_{\Pi} = 0,84$ (рис. 4.5).

7. Определяется перегрев корпуса блока по (4.79)

$$\vartheta_k = 32 \cdot 1,0 \cdot 0,84 \cdot 0,93 = 25 \text{ К.}$$

8. Определяется перегрев нагретой зоны по (4.80)

$$\vartheta_3 = 0,84 \cdot 0,93 \left[32 \cdot 1,0 + \left(53 \frac{1}{0,93} - 32 \right) \cdot 1,0 \right] = 44,5 \text{ К.}$$

9. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по (4.81)

$$\vartheta_v = 0,6 \cdot 44,5 = 26,7 \text{ К.}$$

10. Рассчитываются: удельная мощность элементов по (4.61)

$$1) q_{\text{эл}} = \frac{2,0}{2,7 \cdot 10^{-3}} = 741 \text{ Вт/м}^2;$$

$$2) q_{\text{эл}} = \frac{1,0}{7,7 \cdot 10^{-3}} = 130 \text{ Вт/м}^2,$$

$$3) q_{\text{эл}} = \frac{4,0}{2,0 \cdot 10^{-3}} = 2000 \text{ Вт/м}^2;$$

перегрев поверхности элементов по (4.57)

$$1) \vartheta_{\text{эл}} = 44,5 \left(0,75 + 0,25 \frac{741}{582} \right) = 47,5 \text{ К.}$$

$$2) \vartheta_{\text{эл}} = 44,5 \left(0,75 + 0,25 \frac{130}{582} \right) = 35,8 \text{ К.}$$

$$3) \vartheta_{\text{эл}} = 44,5 \left(0,75 + 0,25 \frac{2000}{582} \right) = 71,7 \text{ К.}$$

перегрев окружающей среды у элемента по (4.62)

$$1) \vartheta_{\text{sc}} = 26,7 \left(0,75 + 0,25 \frac{741}{582} \right) = 28,6 \text{ К,}$$

$$2) \vartheta_{\text{sc}} = 26,7 \left(0,75 + 0,25 \frac{130}{582} \right) = 21,5 \text{ К,}$$

$$3) \vartheta_{\text{sc}} = 26,7 \left(0,75 + 0,25 \frac{2000}{582} \right) = 43 \text{ К.}$$

11. Находятся: температура корпуса блока по (4.63)

$$T_k = 25 + 293 = 318 \text{ К;}$$

температура нагретой зоны по (4.64)

$$T_3 = 44,5 + 293 = 337,5 \text{ К};$$

температура поверхности элементов по (4.65)

1) $T_{\text{эл}} = 47,5 + 293 = 340,5 \text{ К},$

2) $T_{\text{эл}} = 35,8 + 293 = 328,8 \text{ К},$

3) $T_{\text{эл}} = 71,7 + 293 = 364,7 \text{ К};$

средняя температура воздуха в блоке по (4.66)

$$T_{\text{в}} = 26,7 + 293 = 319,7 \text{ К};$$

температура окружающей среды у элементов по (4.67)

1) $T_{\text{с}} = 28,6 + 293 = 321,6 \text{ К},$

2) $T_{\text{с}} = 21,5 + 293 = 314,5 \text{ К},$

3) $T_{\text{с}} = 43 + 293 = 336 \text{ К}.$

4.3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РЭА ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

При создании наиболее удобного в практическом применении коэффициентного метода расчета теплового режима принудительно вентилируемой радиоэлектронной аппаратуры используется общепринятый в настоящее время подход к решению задач подобного типа, разработанный Г. Н. Дульневым и наиболее полно изложенный в [8].

Пусть корпус аппарата имеет форму параллелепипеда, в противоположных гранях которого имеются устройства для подвода и отвода воздуха. Внутри корпуса расположено либо шасси, которое делит аппарат на два отсека, либо n кассет, которые делят аппарат на $(n+1)$ отсеков. Детали могут иметь различную форму и размеры и располагаться на шасси (платах) хаотически. Кондуктивные стоки тепла отсутствуют, а аппараты работают в следующем диапазоне изменения исходных данных:

температура окружающей среды $213-333 \text{ К} (-60 \div +60^\circ\text{C})$;

температура охлаждающего воздуха на входе в аппарат $253-333 \text{ К} (-20 \div +60^\circ\text{C})$;

коэффициент заполнения $0,1-0,85$;

мощность, рассеиваемая в аппарате, $5-800 \text{ Вт}$;

массовый расход охлаждающего воздуха $0,003-0,25 \text{ кг/с}$;

сечение аппарата, перпендикулярное к направлению обдува, $0,020-0,750 \text{ м}^2$ и длины аппарата в направлении обдува $0,1-0,8 \text{ м}$.

Как было показано в § 4.1, в подобных классах аппаратов практически все тепло уносится охлаждающим воздухом, на основании чего

$$P = \alpha S_3 (T_3 - T_{\text{в}}), \quad (4.82)$$

где P — мощность источников тепла, расположенных в радиоэлектронном аппарате; α — коэффициент теплообмена нагретой зоны с охлаждающим воздухом; T_3 — среднеповерхностная температура нагретой зоны; $T_{\text{в}}$ — средняя температура охлаждающего воздуха в радиоэлектронном аппарате; S_3 — площадь теплоотдающей поверхности нагретой зоны.

При принудительном воздушном охлаждении коэффициент конвективного теплообмена можно найти по следующему уравнению:

$$\alpha = B \frac{\lambda}{l_{\text{опр}}} \text{Re}^a \text{Pr}^b, \quad (4.83)$$

где λ — коэффициент теплопроводности воздуха; $l_{\text{опр}}$ — определяющий размер; Re — критерий Рейнольдса; Pr — критерий Прандтля.

Учитывая, что

$$\text{Re} = G l_{\text{опр}} / v F, \quad (4.84)$$

где G — массовый расход охлаждающего воздуха; v — коэффициент кинематической вязкости воздуха; F — эффективная площадь поперечного сечения радиоэлектронного аппарата; ρ — плотность воздуха, (4.83) можно переписать в виде

$$\alpha = D (G/F)^a l_{\text{опр}}^{a-1}, \quad (4.85)$$

где

$$D = B \frac{\lambda}{v^a \rho^a} \text{Pr}^b.$$

Если допустить, что радиоэлементы равномерно заполняют объем аппарата, то поверхностный коэффициент заполнения аппарата равен $K_3^{2/3}$ и, следовательно, выражение для эффективной площади поперечного сечения можно записать в виде

$$F = L_1 L_2 (1 - K_3^{2/3}), \quad (4.86)$$

где L_1 и L_2 — размеры поперечного к направлению обдува сечения радиоэлектронного аппарата.

За определяющий размер по аналогии с плоской пластиной примем длину нагретой зоны в направлении обдува воздуха.

Если объемный коэффициент заполнения равен K_3 , поверхностный $K_3^{2/3}$, то линейный коэффициент заполнения равен $K_3^{1/3}$. Тогда определяющий размер

$$l_{\text{опр}} = L_3 K_3^{1/3}, \quad (4.87)$$

где L_3 — длина радиоэлектронного аппарата в направлении обдува.

При расчете теплового режима принудительно вентилируемых радиоэлектронных аппаратов важной величиной является тепловая проводимость нагретой зоны, которая равна произведению коэффициента теплоотдачи α на площадь теплоотдающей поверхности нагретой зоны S_3 .

В существующих методиках эти величины определяются раздельно, причем определение величины S_3 представляет собой исключительно трудоемкий процесс. В связи с этим предположим, что площадь теплоотдающей поверхности однозначно определяется геометрическими размерами аппарата и коэффициентом заполнения, и выразим величину S_3 в виде

$$S_3 = M (L_1 L_2)^l L_3^d K_3^q, \quad (4.88)$$

С учетом (4.85) — (4.88) выражение (4.82) можно представить в виде

$$P = D \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)^a (L_1 L_2)^{-a} K_3^{1/3} M (L_1 L_2)^l L_3^d K_3^q (T_3 - T_b). \quad (4.89)$$

Из (4.89) следует, что температуру нагретой зоны можно представить так:

$$T_3 = T_{\text{в}} + PA \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)^{n_1} (L_1 L_2)^{n_2} L_3^{n_3} K_3^{n_4}, \quad (4.90)$$

где A — пока неизвестный коэффициент; n_1, n_2, n_3, n_4 — пока неизвестные показатели степеней.

Предположим, что средняя температура воздуха внутри аппарата равна среднеарифметическому значению температур воздуха на входе и выходе из аппарата, т. е.

$$T_{\text{в}} = T_{\text{вх}} + P/2c_p G, \quad (4.91)$$

где $T_{\text{вх}}$ — температура воздуха на входе в радиоэлектронный аппарат; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Из (4.90) с учетом (4.91) следует, что

$$\frac{T_3 - T_{\text{вх}}}{P} - \frac{1}{2c_p G} = A \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)^{n_1} (L_1 L_2)^{n_2} L_3^{n_3} K_3^{n_4}$$

или, обозначив

$$\begin{aligned} \vartheta_3 &= T_3 - T_{\text{вх}}, \\ \frac{\vartheta_3}{P} - \frac{1}{2c_p G} &= A \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)^{n_1} (L_1 L_2)^{n_2} L_3^{n_3} K_3^{n_4}. \end{aligned} \quad (4.92)$$

Для нахождения значений A, n_1, n_2, n_3, n_4 в (4.92) воспользуемся методом наименьших квадратов, для чего прологарифмируем выражение (4.92)

$$\begin{aligned} \lg A + n_1 \lg \frac{G}{1 - K_3^{2/3}} + n_2 \lg (L_1 L_2) + n_3 \lg L_3 + n_4 \lg K_3 = \\ = \lg \left(\frac{\vartheta_3}{P} - \frac{1}{2c_p G} \right). \end{aligned} \quad (4.93)$$

Система нормальных уравнений для (4.93) имеет вид

$$\begin{aligned} n \lg A + n_1 \sum_{i=1}^n \lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i + n_2 \sum_{i=1}^n \lg (L_1 L_2)_i + n_3 \sum_{i=1}^n \lg L_3 i + \\ + n_4 \sum_{i=1}^n \lg K_3 i = \sum_{i=1}^n \lg \left(\frac{\vartheta_3}{P} - \frac{1}{2c_p G} \right)_i; \\ \lg A \sum_{i=1}^n \lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i + n_1 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right]^2 + \\ + n_2 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right] [\lg (L_1 L_2)_i] + n_3 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right]^2 [\lg L_3 i] + \\ + n_4 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right] [\lg K_3 i] = \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right] \left[\lg \left(\frac{\vartheta_3}{P} - \frac{1}{2c_p G} \right)_i \right]; \\ \lg A \sum_{i=1}^n \lg (L_1 L_2)_i + n_1 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right] [\lg (L_1 L_2)_i] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + n_2 \sum_{i=1}^n [\lg (L_1 L_2)_i]^2 + n_3 \sum_{i=1}^n [\lg (L_1 L_2)_i] [\lg L_{3i}] + n_4 \sum_{i=1}^n [\lg (L_1 L_2)_i] \lg K_{3i} = \\
& = \sum_{i=1}^n [\lg (L_1 L_2)_i] \left[\lg \left(\frac{\vartheta_3}{P} - \frac{1}{2c_p G} \right)_i \right]; \\
& \lg A \sum_{i=1}^n \lg L_{3i} + n_1 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right] [\lg L_{3i}] + \\
& + n_2 \sum_{i=1}^n [\lg (L_1 L_2)_i] [\lg L_{3i}] + n_3 \sum_{i=1}^n [\lg L_{3i}]^2 + n_4 \sum_{i=1}^n [\lg K_{3i}] [\lg L_{3i}] = \\
& = \sum_{i=1}^n [\lg L_{3i}] \left[\lg \left(\frac{\vartheta_3}{P} - \frac{1}{2c_p G} \right)_i \right]; \\
& \lg A \sum_{i=1}^n \lg K_{3i} + n_1 \sum_{i=1}^n \left[\lg \left(\frac{G}{1 - K_3^{2/3}} \right)_i \right] [\lg K_{3i}] + \\
& + n_2 \sum_{i=1}^n [\lg (L_1 L_2)_i] [\lg K_{3i}] + n_3 \sum_{i=1}^n [\lg L_{3i}] [\lg K_{3i}] + \\
& + n_4 \sum_{i=1}^n [\lg K_{3i}]^2 = \sum_{i=1}^n [\lg K_{3i}] \left[\lg \left(\frac{\vartheta_3}{P} - \frac{1}{2c_p G} \right)_i \right]. \quad (4.94)
\end{aligned}$$

Значения величин A , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 найдены решением системы уравнений (4.94) с использованием экспериментальных данных по тепловым режимам РЭА с принудительным воздушным охлаждением. Таким образом $A=0,001$; $n_1=-0,5$; $n_2=-0,406$; $n_3=-1,059$; $n_4=-0,42$.

Введя в (4.92) численные значения и проведя преобразования, получим дробную формулу для определения перегрева нагретой зоны принудительно вентилируемых радиоэлектронных аппаратов:

$$\vartheta_3 = P/2c_p G + Pm_1 m_2 m_3 m_4, \quad (4.95)$$

где $m_1 = 0,001G^{-0,5}$ — коэффициент, учитывающий величину массового расхода охлаждающего воздуха; $m_2 = (L_1 L_2)^{-0,406}$ — коэффициент, учитывающий величину площади попечного к направлению обдува сечения аппарата; $m_3 = L_3^{-1,059}$ — коэффициент, учитывающий длину аппарата в направлении обдува; $m_4 = K_3^{-0,42}(1 - K_3^{2/3})^{0,5}$ — коэффициент, учитывающий заполнение аппарата.

Так как для воздуха в широком диапазоне изменения температуры $c_p = 10^3$ Дж/кг·К, выражение (4.95) можно записать в окончательном виде

$$\vartheta_3 = 5 \cdot 10^{-4} (P/G) + Pm_1 m_2 m_3 m_4. \quad (4.96)$$

Кривые, показывающие изменение коэффициентов m_1 , m_2 , m_3 , m_4 при изменении влияющих факторов представлены на рис. 4.15—4.18.

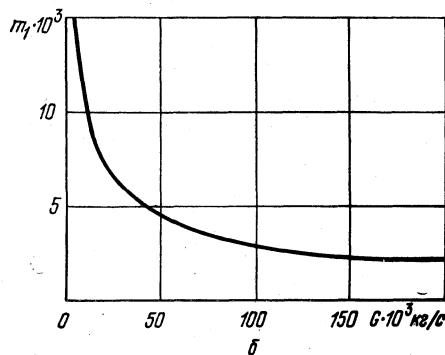
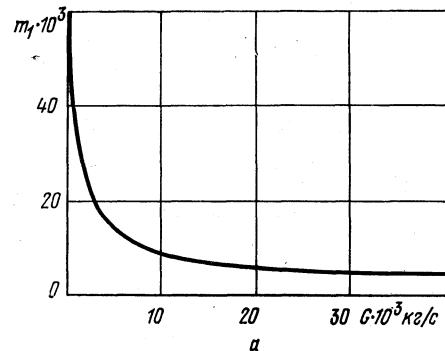


Рис. 4.15. Зависимость m_1 от расхода воздуха.

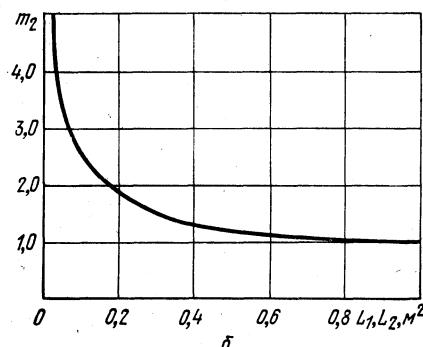
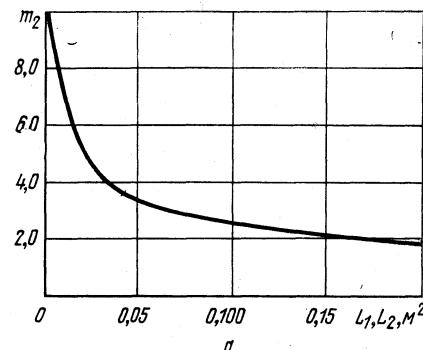


Рис. 4.16. Зависимость m_2 от поперечного сечения корпуса аппарата.

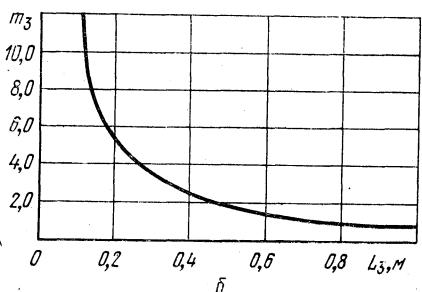
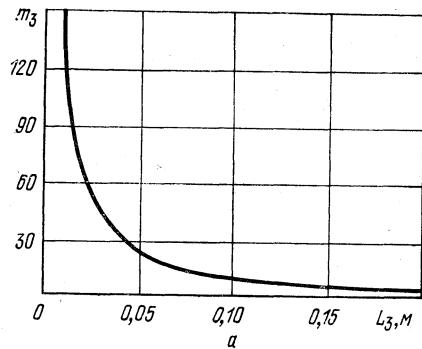


Рис. 4.17. Зависимость m_3 от пути движения воздуха.

На основании сравнения расчетных и экспериментальных данных была построена гистограмма погрешностей, приведенная на рис. 4.19. Чтобы охарактеризовать отклонение экспериментальных точек от зависимости (4.96), найдем среднеквадратическую погрешность по формуле

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\vartheta_{3pi} - \vartheta_{3ei})^2 / (n - m)}, \quad (4.97)$$

где ϑ_{3pi} — рассчитанный по (4.96) перегрев нагретой зоны; ϑ_{3ei} — экспериментально определенный перегрев нагретой зоны; n — число экспериментальных данных; m — число коэффициентов, определяемых методом наименьших квадратов. Величина $\bar{\sigma}^2$ является несмещенной оценкой дисперсии σ^2 . По экспериментальным данным $\bar{\sigma} \approx 8,1$ К, т. е. соответствует рекомендациям по точности, приведенным в § 4.1.

С учетом сделанных ранее допущений

$$P_{\text{эл}} = \sigma_{\text{эл з}} (\vartheta_{\text{эл}} - \vartheta_3) + \sigma_{\text{эл в}} \vartheta_{\text{эл}}, \quad (4.98)$$

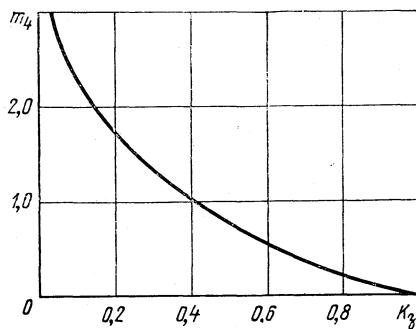


Рис. 4.18. Зависимость m_4 от коэффициента заполнения.

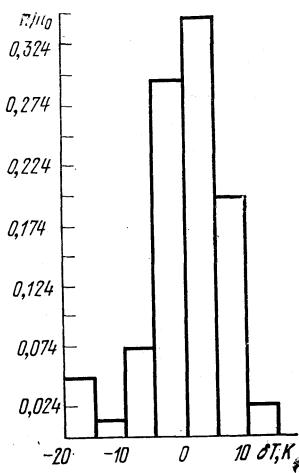


Рис. 4.19. Гистограмма погрешностей расчета по уравнению (4.96).

где $P_{\text{эл}}$ — тепловой поток, рассеиваемый элементом; $\vartheta_{\text{эл}}$ — перегрев поверхности элемента; ϑ_3 — перегрев нагретой зоны; $\sigma_{\text{эл з}}$ — тепловая проводимость между поверхностью элемента и нагретой зоной; $\sigma_{\text{эл в}}$ — тепловая проводимость между поверхностью элемента и охлаждающим воздухом.

Из (4.98) следует

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left[\frac{\sigma_{\text{эл з}}}{\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл в}}} + \frac{P}{\vartheta_3 (\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл в}})} \right]$$

или, учитывая, что $\vartheta_3 = P / \sigma_{\text{эл в}}$ ($\sigma_{\text{эл в}}$ — тепловая проводимость между нагретой зоной и охлаждающим воздухом),

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left[\frac{\sigma_{\text{эл з}}}{\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл в}}} + \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \frac{\sigma_{\text{эл з}} S_{\text{эл}}}{S_{\text{усл}} (\sigma_{\text{эл з}} + \sigma_{\text{эл в}})} \right], \quad (4.99)$$

где $q_{\text{эл}} = P_{\text{эл}} / S_{\text{эл}}$ — удельный тепловой поток, рассеиваемый элементом; $S_{\text{эл}}$ — площадь теплоотдающей поверхности элемента (при наличии ра-

диатора при расчете теплоотдающей поверхности учитывается и поверхность радиатора); $q_3 = P/S_{\text{усл}}$ — удельный тепловой поток, рассеиваемый нагретой зоной; $S_{\text{усл}} = 2[L_1 L_2 + K_3 L_3 (L_1 + L_2)]$ — площадь условной поверхности нагретой зоны.

Таким образом, перегрев поверхности элемента можно представить в виде

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 (a + b q_3 / q_3). \quad (4.100)$$

Найденные методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных данных по тепловым режимам реальных радиоэлектронных аппаратов, коэффициенты a и b оказались равны: $a = 0,75$; $b = 0,25$.

Формула (4.99) не учитывает подогрев воздуха по мере движения. Вследствие этого для уменьшения погрешности формулы (4.99) была рассмотрена величина

$$y = \frac{\vartheta_{\text{эл э}} i}{\vartheta_3 \left(a + b \frac{q_{\text{эл}} i}{q_3} \right)}, \quad (4.101)$$

которую можно представить еще так:

$$y = c + \frac{L}{L_3} d, \quad (4.102)$$

где L — расстояние в направлении движения охлаждающего воздуха от входного сечения до места расположения элемента.

Коэффициенты c и d были найдены методом наименьших квадратов с использованием тех же экспериментальных данных, что и при определении a и b , и оказались равными $c = 0,5$; $d = 1,0$.

Таким образом, формула для расчета перегрева поверхности элемента при принудительном воздушном охлаждении радиоэлектронного аппарата окончательно выглядит так:

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \right) \left(\frac{L}{L_3} + 0,5 \right). \quad (4.103)$$

Проведенная по формуле (4.97) оценка среднеквадратической погрешности зависимости (4.103) показала, что $\sigma = 11$ К. В технических условиях на некоторые элементы часто задается величина допустимой температуры воздуха в районе элемента. Для расчета этой величины аналогичным методом была получена формула

$$\vartheta_{\text{эл}} = \bar{\vartheta}_{\text{в}} \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \right) \left(\frac{L}{L_3} + 0,5 \right), \quad (4.104)$$

где $\bar{\vartheta}_{\text{в}}$ — средний перегрев охлаждающего воздуха в радиоэлектронном аппарате

$$\bar{\vartheta}_{\text{в}} = 5 \cdot 10^{-4} P/G. \quad (4.105)$$

Расчет теплового режима РЭА с принудительным воздушным охлаждением удобно проводить в следующем порядке:

1. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по формуле (4.105).

2. Определяется площадь поперечного в направлении продува сечения корпуса блока $S = L_1 L_2$, где L_1 , L_2 — размеры корпуса блока, перпендикулярные направлению продува..

3. Находится коэффициент m_1 в зависимости от массового расхода охлаждающего воздуха (рис. 4.15).

4. Находится m_2 в зависимости от поперечного в направлении продува сечения корпуса блока (рис. 4.16).

5. Находится m_3 в зависимости от длины корпуса блока в направлении продува (рис. 4.17).

6. Находится m_4 в зависимости от коэффициента заполнения (рис. 4.18).

7. Рассчитывается перегрев нагретой зоны блока с принудительным охлаждением

$$\vartheta_3 = \bar{\vartheta}_b + P m_1 m_2 m_3 m_4. \quad (4.106)$$

8. Находится условная поверхность нагретой зоны по формуле (4.39).

9. Находится удельная мощность нагретой зоны по (4.38).

10. Находится удельная мощность элемента по (4.61).

11. Рассчитывается перегрев поверхности элемента по (4.103).

12. Рассчитывается перегрев окружающей среды у элемента по (4.104).

13. Определяются: температура нагретой зоны

$$T_3 = \vartheta_3 + T_{bx}; \quad (4.107)$$

средняя температура воздуха в блоке

$$T_b = \bar{\vartheta}_b + T_{bx}; \quad (4.108)$$

температура воздуха на выходе из блока

$$T_{b2} = 2\bar{\vartheta}_b + T_{bx}; \quad (4.109)$$

температура поверхности элемента

$$T_{el} = \vartheta_{el} + T_{bx}, \quad (4.110)$$

температура окружающего элемент воздуха

$$T_{ec} = \vartheta_c + T_{bx}. \quad (4.111)$$

Пример. Определить тепловой режим блока с принудительным воздушным охлаждением. Мощность, рассеиваемая в блоке, $P = 160$ Вт; мощность рассеиваемая некоторыми элементами: 1) $P_{el} = 13$ Вт, 2) $P_{el} = 2$ Вт, 3) $P_{el} = 6$ Вт; размеры корпуса блока, перпендикулярные направлению продува: $L_1 = 0,200$ м, $L_2 = 0,350$; размеры корпуса блока в направлении продува $L_3 = 0,200$ м; площади поверхностей элементов: 1) $S_{el} = 15 \cdot 10^{-3}$ м², 2) $S_{el} = 11 \cdot 10^{-3}$ м², 3) $S_{el} = 13 \cdot 10^{-3}$ м²; коэффициент заполнения блока $K_3 = 0,3$; массовый расход воздуха $G = 10 \cdot 10^{-3}$ кг/с; расстояние в направлении движения воздуха от входного сечения до места расположения элемента: 1) $l = 0,050$ м, 2) $l = 0,100$ м, 3) $l = 0,150$ м; температура охлаждающего воздуха на входе $T_b = 291$ К ($+18^\circ\text{C}$).

1. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по (4.105)

$$\bar{\vartheta}_b = 5 \cdot 10^{-4} \frac{160}{10 \cdot 10^{-3}} = 8 \text{ K}.$$

2. Определяется площадь поперечного в направлении продува сечения корпуса блока

$$S = 0,200 \cdot 0,350 = 0,070 \text{ м}^2.$$

3. Находится $m_1 = 10 \cdot 10^{-3}$ (рис. 4.15).

4. Находится $m_2 = 2,95$ (рис. 4.16).

5. Находится $m_3 = 5,60$ (рис. 4.17).
 6. Находится $m_4 = 1,26$ (рис. 4.18).
 7. Рассчитывается перегрев нагретой зоны по (4.106)

$$\vartheta_3 = 8 + 160 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 2,95 \cdot 5,60 \cdot 1,26 = 41,2 \text{ К.}$$

8. Находится условная поверхность нагретой зоны по (4.39)
- $$S_3 = 2[0,200 \cdot 0,350 + (0,200 + 0,350) \cdot 0,200 \cdot 0,3] = 0,206 \text{ м}^2.$$
9. Находится удельная мощность нагретой зоны по (4.38)
- $$q_3 = 160 / 0,206 = 770 \text{ Вт/м}^2.$$

10. Находится удельная мощность элементов по (4.61)

$$1) q_{эл} = \frac{13}{15 \cdot 10^{-3}} = 867 \text{ Вт/м}^2,$$

$$2) q_{эл} = \frac{2}{11 \cdot 10^{-3}} = 182 \text{ Вт/м}^2,$$

$$3) q_{эл} = \frac{6}{13 \cdot 10^{-3}} = 461 \text{ Вт/м}^2.$$

11. Рассчитывается перегрев поверхности элементов по (4.103)

$$1) \vartheta_{эл} = 41,2 \left(0,75 + 0,25 \frac{867}{770} \right) \left(\frac{0,050}{0,200} + 0,5 \right) = 32,1 \text{ К,}$$

$$2) \vartheta_{эл} = 41,2 \left(0,75 + 0,25 \frac{182}{770} \right) \left(\frac{0,100}{0,200} + 0,5 \right) = 33,3 \text{ К,}$$

$$3) \vartheta_{эл} = 41,2 \left(0,75 + 0,25 \frac{461}{770} \right) \left(\frac{0,150}{0,200} + 0,5 \right) = 46,2 \text{ К.}$$

12. Рассчитывается перегрев окружающей среды по (4.104)

$$1) \vartheta_{sc} = 8 \left(0,75 + 0,25 \frac{867}{770} \right) \left(\frac{0,05}{0,200} + 0,5 \right) = 4,1 \text{ К,}$$

$$2) \vartheta_{sc} = 8 \left(0,75 + 0,25 \frac{182}{770} \right) \left(\frac{0,100}{0,200} + 0,5 \right) = 6,5 \text{ К,}$$

$$3) \vartheta_{sc} = 8 \left(0,75 + 0,25 \frac{461}{770} \right) \left(\frac{0,150}{0,200} + 0,5 \right) = 10,8 \text{ К.}$$

13. Определяются: температура нагретой зоны по (4.107)

$$T_3 = 41,2 + 291 = 332,2 \text{ К;}$$

средняя температура воздуха в блоке по (4.108)

$$T_v = 8 + 291 = 299 \text{ К;}$$

температура воздуха на выходе из блока по (4.109)

$$T_{v2} = 2 \cdot 8 + 291 = 307 \text{ К;}$$

температуры поверхности элементов по (4.110):

$$1) T_{эл} = 32,1 + 291 = 313,1 \text{ К,}$$

$$2) T_{эл} = 33,3 + 291 = 324,3 \text{ К,}$$

$$3) T_{эл} = 46,2 + 291 = 337,2 \text{ К;}$$

температура воздуха у элементов по (4.111):

$$1) T_c = 4,1 + 291 = 295,1 \text{ К,}$$

$$2) T_c = 6,5 + 291 = 297,5 \text{ К,}$$

$$3) T_c = 10,8 + 291 = 301,8 \text{ К.}$$

4.4. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ, ДЛЯ КОТОРЫХ НЕОБХОДИМО ПРОВЕДЕНИЕ ПОДРОБНОГО РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Расчет температуры всех входящих в аппарат элементов представляет собой чрезвычайно трудоемкий, а зачастую и практически трудновыполнимый процесс. В связи с этим встает вопрос: для каких элементов необходимо рассчитывать температуру, чтобы с заданной достоверностью можно было судить о соответствии теплового режима всего аппарата требованиям технического задания.

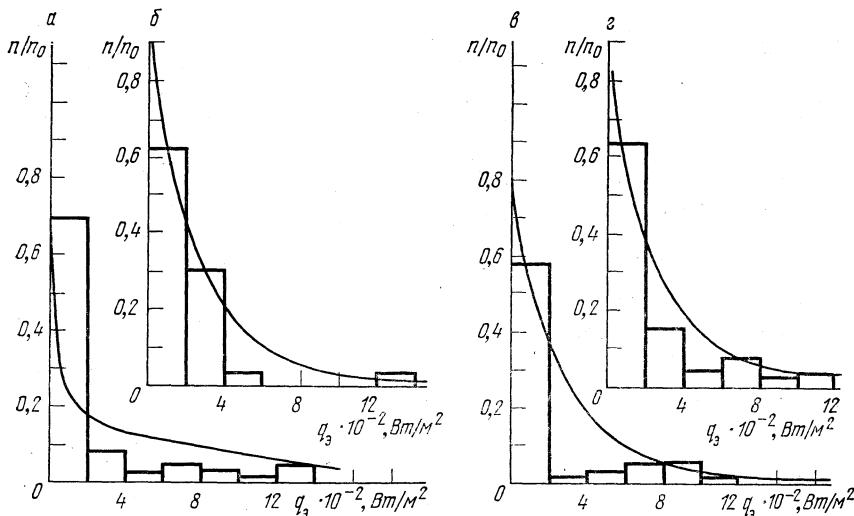


Рис. 4.20. Гистограммы распределения удельных мощностей рассеивания элементов в четырех блоках.

Как было показано в предыдущих параграфах, перегрев поверхности элемента в радиоэлектронных аппаратах с воздушным охлаждением является функцией удельной мощности, рассеиваемой элементом $q_{\text{эл}}$, и расстояния l от входа охлаждающего воздуха до места установки элемента. Формула (4.57), таким образом, в общем случае имеет вид

$$\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta(q_{\text{эл}}, l).$$

Определим законы распределения величин $q_{\text{эл}}$ и l , определяющих перегрев поверхности элемента.

На рис. 4.20 представлены гистограммы распределения удельной мощности рассеивания для радиоэлементов в четырех радиоэлектронных блоках. Анализ гистограмм показывает, что закон распределения мощности близок к экспоненциальному (непрерывная линия на рис. 4.20). Примем гипотезу о том, что плотность распределения удельной мощности рассеивания имеет вид

$$f_1(q_{\text{эл}}) = \begin{cases} \frac{1}{q_3} \exp\left(-\frac{q_{\text{эл}}}{q_3}\right) & \text{при } q_{\text{эл}} \geq 0, \\ 0 & \text{при } q_{\text{эл}} < 0, \end{cases}$$

где q_3 — удельная мощность рассеивания нагретой зоны. Часто элементы расположены приблизительно равномерно по длине аппарата, поэтому примем следующий закон распределения величины l :

$$f_2(l) = \begin{cases} 1/l_3 & \text{при } 0 \leq l \leq L_3, \\ 0 & \text{при } l < 0 \text{ и } l > L_3. \end{cases}$$

Так как величины $q_{\text{эл}}$ и l взаимонезависимы, то плотность распределения системы величин $q_{\text{эл}}$ и l равна произведению плотностей распределения величин $q_{\text{эл}}$ и l [9], т. е.

$$f_3(q_{\text{эл}}, l) = \begin{cases} \frac{1}{l_3 q_3} \exp\left(-\frac{q_{\text{эл}}}{q_3}\right) & \text{при } q_{\text{эл}} \geq 0, 0 \leq l \leq L_3, \\ 0 & \text{при } q_{\text{эл}} < 0; l < 0, l > L_3. \end{cases}$$

Определим закон распределения расчетных температур элементов в нагретой зоне при естественном и принудительном воздушном охлаждении. При естественном воздушном охлаждении перегрев элементов определяется из соотношения (4.57):

$$\text{или } \vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{\text{эл}}}{q_3} \right) \quad (4.112)$$

$$q_{\text{эл}} = q_3 \left(4 \frac{\vartheta_{\text{эл}}}{\vartheta_3} - 3 \right), \quad \vartheta_{\text{эл}} \geq 0,75 \vartheta_3,$$

так как $q_{\text{эл}} \geq 0$.

Следовательно, плотность распределения расчетных перегревов элементов в нагретой зоне имеет вид [9]

$$f_1(\vartheta_{\text{эл}}) = f_1[q(\vartheta_{\text{эл}})] \frac{dq_{\text{эл}}}{d\vartheta_{\text{эл}}} = \begin{cases} 0 & \text{при } \vartheta_{\text{эл}} < 0,75 \vartheta_3, \\ \frac{4}{\vartheta_3} \exp\left(-\frac{4\vartheta_{\text{эл}}}{\vartheta_3} + 3\right) & \text{при } \vartheta_{\text{эл}} \geq 0,75 \vartheta_3. \end{cases} \quad (4.113)$$

С помощью (4.113) найдем интегральный закон распределения расчетных температур элементов при естественном воздушном охлаждении

$$F_1(\vartheta_{\text{эл}}) = \int_{-\infty}^{\vartheta_{\text{эл}}} f_1(\vartheta) d\vartheta = \begin{cases} 0 & \text{при } \vartheta_{\text{эл}} < 0,75 \vartheta_3, \\ 1 - \exp\left(-\frac{4\vartheta_{\text{эл}}}{\vartheta_3} + 3\right) & \text{при } \vartheta_{\text{эл}} \geq 0,75 \vartheta_3. \end{cases} \quad (4.114)$$

Перейдем к нахождению закона распределения величин $\vartheta_{\text{эл}}$ при принудительном воздушном охлаждении РЭА, для чего зададимся некоторым значением $\vartheta_{\text{эл}}$ и построим на плоскости qOl кривую по уравнению (4.103).

На рис. 4.21 показаны эти кривые и область D изменения величин $q_{\text{эл}}$ и l при $0,375\vartheta_3 \leq \vartheta_{\text{эл}} \leq 1,125\vartheta_3$ (рис. 4.21,а) и при $1,125\vartheta_3 < \vartheta_{\text{эл}}$ (рис. 4.21,б). Таким образом, интегральный закон распределения перегрева элементов в нагретой зоне РЭА при принудительном воздушном охлаждении имеет вид [9]:

$$\text{при } \vartheta_{\text{эл}} < 0,375\vartheta_3$$

$$F_2(\vartheta) = 0;$$

при $0,375\vartheta_3 \leq \vartheta_{\text{эл}} \leq 1,125\vartheta_3$ (рис. 4.20, а)

$$F_2(\vartheta) = \iint_{(D)} f_3(q, l) dq dl = \int_0^{L_3(4\vartheta_{\text{эл}}/3\vartheta_3 - 0,5)} \int_0^{q_{\text{эл}}} \frac{l}{l_3 q_3} \exp\left(-\frac{q_{\text{эл}}}{q_3}\right) dq_{\text{эл}} dl =$$

$$= \frac{4\vartheta_{\text{эл}}}{3\vartheta_3} - 0,5 - \int_0^{4\vartheta_{\text{эл}}/3\vartheta_3 - 0,5} \exp\left(-\frac{4\vartheta_{\text{эл}}}{\vartheta_3(0,5 + x)} + 3\right) dx;$$

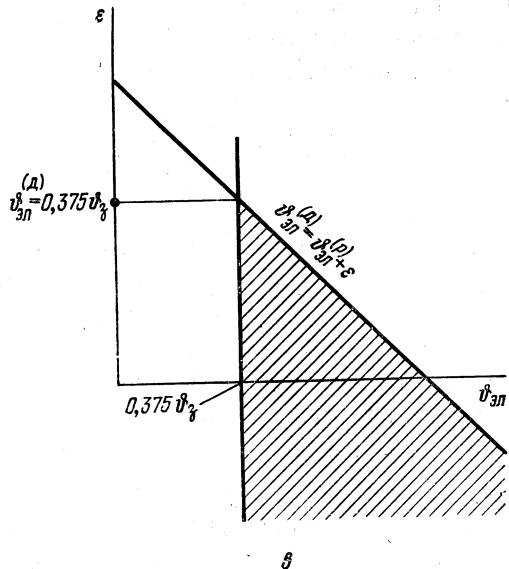
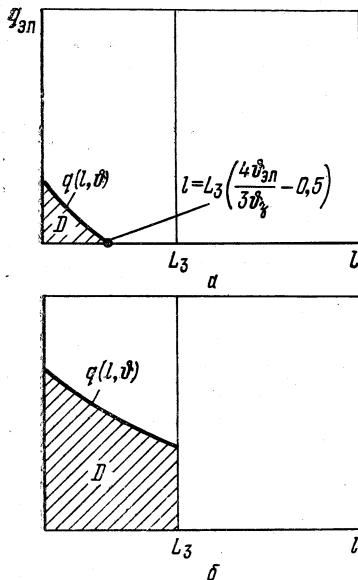


Рис. 4.21. Кривые интегрального распределения перегревов элементов в нагретой зоне:
а, б — кривые распределения; в — области интегрирования.

при $1,125\vartheta_3 < \vartheta_{\text{эл}}$ (рис. 4.20, б)

$$F_2(\vartheta) = \iint_{(D)} f_3(q, l) dq dl = \int_0^{L_3} \int_0^{q_{\text{эл}}} \frac{1}{l_3 q_3} \exp\left(-\frac{q_{\text{эл}}}{q_3}\right) dq_{\text{эл}} dl =$$

$$= 1 - \int_0^1 \exp\left(-\frac{4\vartheta_{\text{эл}}}{\vartheta_3(0,5 + x)} + 3\right) dx, \quad (4.115)$$

где $x = l/l_3$.

Дифференцируя (4.115), определяем плотность распределения. Имеем при $\vartheta_{\text{эл}} < 0,375\vartheta_3$

$$f_4(\vartheta) = 0;$$

при $0,375\vartheta_3 \leq \vartheta_{\text{эл}} \leq 1,125\vartheta_3$

$$f_4(\vartheta) = \int_0^{4\vartheta_{\text{эл}}/3\vartheta_3 - 0,5} \frac{4}{\vartheta_3(x + 0,5)} \exp\left(-\frac{4\vartheta_{\text{эл}}}{\vartheta_3(x + 0,5)} + 3\right) dx;$$

при $1,125\theta_3 < \theta_{\text{эл}}$

$$f_4(\theta) = \int_0^1 \frac{4}{\theta_3(x+0,5)} \exp\left(-\frac{4\theta}{\theta_3(x+0,5)} + 3\right) dx. \quad (4.116)$$

Действительное значение перегрева элементов $\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}$ равно его расчетному значению $\theta_{\text{эл}}^{(\text{р})}$ плюс погрешность расчета ϵ , т. е. $\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})} = \theta_{\text{эл}}^{(\text{р})} + \epsilon$.

Плотность распределения величины $\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}$ определяется по формулам (4.113) и (4.116). Величина ϵ подчиняется нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_ϵ^2 , т. е. плотность распределения этой величины имеет вид

$$f_5(\epsilon) = \frac{1}{\sigma_\epsilon \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma_\epsilon^2}\right). \quad (4.117)$$

Так как величины $\theta_{\text{эл}}^{(\text{р})}$ и ϵ взаимно независимы, то совместная плотность распределения этих величин равна

$$f_6(\theta_{\text{эл}}^{(\text{р})}, \epsilon) = f_4(\theta_{\text{эл}}^{(\text{р})}) f_5(\epsilon). \quad (4.118)$$

После подстановки значений (4.113), (4.117) в (4.118), получим интегральный закон распределения величины $\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}$ для естественного воздушного охлаждения:

$$\begin{aligned} \bar{f}_6(\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-\epsilon} f_4(\theta_{\text{эл}}) f_5(\epsilon) d\theta_{\text{эл}} d\epsilon = \\ &= \int_{-\infty}^{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-0,75\theta_3} \int_{-\infty}^{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-\epsilon} \frac{1}{\sigma_\epsilon \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma_\epsilon^2}\right) \frac{4}{\theta_3} \exp\left(-\frac{4\theta_{\text{эл}}}{\theta_3} + 3\right) d\theta_{\text{эл}} d\epsilon = \\ &= \Phi\left(\frac{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-0,75\theta_3}{\sigma_\epsilon}\right) - \exp\left(3 + \frac{8\sigma_\epsilon^2}{\theta_3^2} - \frac{4\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}}{\theta_3}\right) \Phi\left(\frac{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-0,75\theta_3}{\sigma_\epsilon} - \frac{4\sigma_\epsilon}{\theta_3}\right), \quad (4.119) \end{aligned}$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-x^2/2} dx$ (табулирован в [12]).

Определим интегральный закон распределения величины $\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}$ при принудительном воздушном охлаждении после подстановки (4.116) и (4.117) в (4.118):

$$\begin{aligned} f_4(\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-\epsilon} f_4(\theta_{\text{эл}}) f_5(\epsilon) d\theta_{\text{эл}} d\epsilon = \int_{-\infty}^{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-0,375\theta_3} \int_{0,375\theta_3}^{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-\epsilon} f_4(\theta_{\text{эл}}) f_5(\epsilon) d\theta_{\text{эл}} d\epsilon = \\ &= \int_{-\infty}^{\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-0,375\theta_3} f_5(\epsilon) [F_2(\theta_{\text{эл}}^{(\text{д})}-\epsilon) - F_2(0,375\theta_3)] d\epsilon = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-\infty}^{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 0,375\vartheta_3} f_5(\varepsilon) F_2(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon) d\varepsilon = \int_{-\infty}^{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 1,125\vartheta_3} f_5(\varepsilon) F_2(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon) d\varepsilon + \\
&+ \int_{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 0,375\vartheta_3}^{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 1,125\vartheta_3} f_5(\varepsilon) F_2(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon) = \frac{1}{\sigma_{\varepsilon} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 1,125\vartheta_3} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_{\varepsilon}^2}\right) \times \\
&\times \left[1 - \int_0^1 \exp\left(-\frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon}{3\vartheta_3(0,5+t)} + 3\right) dt \right] d\varepsilon + \\
&+ \frac{1}{\sigma_{\varepsilon} \sqrt{2\pi}} \int_{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 1,125\vartheta_3}^{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 0,375\vartheta_3} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_{\varepsilon}^2}\right) \left[\frac{4(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon)}{3\vartheta_3} - 0,5 - \right. \\
&\left. - \int_0^{\frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon}{3\vartheta_3}} \exp\left(-\frac{4(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon)}{3\vartheta_3(0,5+t)} + 3\right) dt \right] d\varepsilon. \quad (4.120)
\end{aligned}$$

Области интегрирования (4.120) показаны на рис. 4.21.в.

Таким образом, вероятность того, что действительный перегрев элемента не превзойдет его предельно допустимого значения $\vartheta_{\text{доп}}$, равна $F_4(\vartheta_{\text{доп}})$ (или $F_3(\vartheta_{\text{доп}})$ для РЭА с естественным воздушным охлаждением).

Определим математическое ожидание и дисперсию для распределений (4.119) и (4.120). Для этого найдем плотности распределений: для естественного воздушного охлаждения из (4.119)

$$f_8(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})}) = \frac{\partial F_3}{\partial \vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})}} = \frac{4}{\vartheta_3} \exp\left(3 + \frac{8\sigma_{\varepsilon}^2}{\vartheta_3^2} - \frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})}}{\vartheta_3}\right) \Phi\left(\frac{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 0,75\vartheta_3}{\sigma_{\varepsilon}} - \frac{4\sigma_{\varepsilon}}{\vartheta_3}\right); \quad (4.121)$$

для принудительного воздушного охлаждения из (4.120)

$$\begin{aligned}
f_9(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})}) &= \frac{\partial F_4}{\partial \vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})}} = \int_{-\infty}^{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 1,125\vartheta_3} \frac{1}{\sigma_{\varepsilon} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_{\varepsilon}^2}\right) \int_0^1 \frac{4}{\vartheta_3(0,5+x)} \times \\
&\times \exp\left[-\frac{4(\vartheta_3 - \varepsilon)}{\vartheta_3(0,5+x)} + 3\right] dx d\varepsilon + \frac{1}{\sigma_{\varepsilon} \sqrt{2\pi}} \int_{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 1,125\vartheta_3}^{\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - 0,375\vartheta_3} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_{\varepsilon}^2}\right) \times \\
&\times \frac{4(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon)}{3\vartheta_3} \int_0^{\frac{4(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon)}{3\vartheta_3}} \frac{4}{\vartheta_3(0,5+x)} \exp\left[-\frac{4(\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} - \varepsilon)}{\vartheta_3(0,5+x)} + 3\right] dx d\varepsilon. \quad (4.122)
\end{aligned}$$

Математическое ожидание и дисперсия определяются по формулам [9]

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx, \quad (4.123)$$

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - m_x^2. \quad (4.124)$$

Подставив значения (4.121) в (4.123) и (4.124), получим для естественного воздушного охлаждения

$$\begin{aligned}
 m_{\vartheta} &= \int_{-\infty}^{\infty} \vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} f_{\vartheta}(\vartheta_{\text{эл}}) d\vartheta_{\text{эл}}; \\
 m_{\vartheta} &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{4}{\vartheta_3 \sqrt{2\pi}} \vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} \exp \left(3 + \frac{8\sigma_{\varepsilon}^2}{\vartheta_3^2} - \frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}}{\vartheta_3} \right) \times \\
 &\quad \times \int_{-\infty}^{\frac{\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - 0,75\vartheta_3}{\sigma_{\varepsilon}} - \frac{4\sigma_{\varepsilon}}{\vartheta_3}} \exp \left(-\frac{\varepsilon^2}{2} \right) d\varepsilon d\vartheta_{\text{эл}} = \\
 &= - \left(\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} + \frac{\vartheta_3}{4} \right) \exp \left(3 + \frac{8\sigma_{\varepsilon}^2}{\vartheta_3^2} - \frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}}{\vartheta_3} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\vartheta_3 - 0,75\vartheta_3}{\sigma_{\varepsilon}} - \frac{4\sigma_{\varepsilon}}{\vartheta_3}} \exp \left(-\frac{\varepsilon^2}{2} \right) d\varepsilon \Big|_{-\infty}^{\infty} + \\
 &+ \frac{1}{\sigma_{\varepsilon} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} + 0,25\vartheta_3) \exp \left(3 + \frac{8\sigma_{\varepsilon}^2}{\vartheta_3^2} - \frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}}{\vartheta_3} - \frac{\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - 0,75\vartheta_3}{2\sigma_{\varepsilon}^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}}{\vartheta_3} - \frac{8\sigma_{\varepsilon}^2}{\vartheta_3^2} - 3 \right) d\vartheta_{\text{эл}} = \frac{1}{\sigma_{\varepsilon} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} + \\
 &\quad + 0,25\vartheta_3) \exp \left(-\frac{\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - 0,75\vartheta_3}{2\sigma_{\varepsilon}^2} \right) d\vartheta_{\text{эл}} = \vartheta_3,
 \end{aligned}$$

т. е.

$$\begin{aligned}
 m_{\vartheta} &= \vartheta_3; \\
 \sigma_{\vartheta}^2 + m_{\vartheta}^2 &= \frac{4}{\vartheta_3 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)^2} \exp \left(3 + \frac{8\sigma_{\varepsilon}^2}{\vartheta_3^2} - \frac{4\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}}{\vartheta_3} \right) \times \\
 &\quad \times \int_{-\infty}^{\frac{\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - 0,75\vartheta_3}{\sigma_{\varepsilon}} - \frac{4\sigma_{\varepsilon}}{\vartheta_3}} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx d\vartheta_{\text{эл}} = -(\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)^2} + 0,5\vartheta_3 \vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} +)
 \end{aligned}
 \quad (4.125)$$

$$\begin{aligned}
& + 0,125 \vartheta_3^2 \exp \left(3 + \frac{8\sigma_e^2}{\vartheta_3^2} - \frac{4\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)}}{\vartheta_3} \right) \int_{-\infty}^{\frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 0,75\vartheta_3}{\sigma_e}} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx \Big|_{-\infty}^{\infty} + \\
& + \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)^2} + 0,5\vartheta_3 \vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} + 0,125\vartheta_3^2 \exp \left(-\frac{(\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 0,75\vartheta_3)^2}{2\sigma_e^2} \right) d\vartheta_{\text{ел}} = \\
& = \sigma_e^2 + 1,0625\vartheta_3^2, \quad \sigma_{\vartheta}^2 = \sigma_e^2 + 0,0625\vartheta_3^2. \quad (4.126)
\end{aligned}$$

Подставив значения (4.122) в (4.123) и (4.124), получим для принудительного воздушного охлаждения

$$\begin{aligned}
m_{\vartheta} &= \int_{-\infty}^{\infty} \vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} f_{\vartheta}(\vartheta_{\text{ел}}) d\vartheta_{\text{ел}} = \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)}}{2} f_{\vartheta}(\vartheta_{\text{ел}}) \Big|_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)}}{2} \frac{df_{\vartheta}}{d\vartheta_{\text{ел}}} d\vartheta_{\text{ел}} = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)^2}}{2} \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 1,125\vartheta_3)^2}{2\sigma_e^2} \right) \int_0^1 \frac{4}{\vartheta_3(t+0,5)} \times \\
&\times \exp \left(-\frac{4,5}{0,5+t} + 3 \right) dt d\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)^2}}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \times \\
&\times \exp \left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_e^2} \right) \int_0^1 \frac{16}{\vartheta_3^2(t+0,5)^2} \exp \left(-\frac{4(\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - \varepsilon)}{\vartheta_3(t+0,5)} + 3 \right) dt d\varepsilon d\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} + \\
&+ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)^2}}{2} \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \exp \left(\frac{(\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 1,125\vartheta_3)^2}{2\sigma_e^2} \right) \int_0^1 \frac{4}{\vartheta_3(t+0,5)} \times \\
&\times \exp \left(-\frac{4,5}{0,5+t} + 3 \right) dt d\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)}}{2} \int_{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 1,125\vartheta_3}^{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 0,375\vartheta_3} \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \times \\
&\times \exp \left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_e^2} \right) \frac{4}{3\vartheta_3} \frac{4}{\vartheta_3} \frac{3\vartheta_3}{4(\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - \varepsilon)} d\varepsilon d\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} + \\
&+ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)^2}}{2} \int_{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 1,125\vartheta_3}^{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - 0,375\vartheta_3} \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma_e^2} \right) \int_0^{3\vartheta_3} \frac{16}{\vartheta_3^2(0,5+t)} \times \\
&\times \exp \left(-\frac{4(\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - \varepsilon)}{\vartheta_3(0,5+t)} + 3 \right) dt d\varepsilon d\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)}}{2} \int_{1,125\vartheta_3}^{\infty} \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \times \\
&\times \exp \left(-\frac{(\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - x)^2}{2\sigma_e^2} \right) \frac{4}{\vartheta_3 x} \exp \left(-\frac{4x}{1,5\vartheta_3} + 3 \right) dx d\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - \\
&- \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)}}{2} \int_{0,375\vartheta_3}^{\infty} \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} - x}{2\sigma_e^2} \right) \frac{4}{\vartheta_3 x} \exp \left(-\frac{8x}{\vartheta_3} + 3 \right) dx d\vartheta_{\text{ел}}^{(\Delta)} =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{1,125\vartheta_3}^{\infty} \frac{4}{\vartheta_3 x} \exp\left(-\frac{4x}{0,5\vartheta_3} + 3\right) \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}}{2} \exp\left(-\frac{(\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - x)^2}{2\sigma_e^2}\right) \times \\
&\quad \times d\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} dx - \int_{0,375\vartheta_3}^{\infty} \frac{4}{\vartheta_3 x} \exp\left(-\frac{8x}{\vartheta_3} + 3\right) \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)^2}}{2} \times \\
&\quad \times \exp\left(-\frac{(\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - x)^2}{2\sigma_e^2}\right) d\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} dx = \int_{1,125\vartheta_3}^{\infty} \frac{2\sigma_e^2}{\vartheta_3 x} \exp\left(-\frac{4x}{1,5\vartheta_3} + 3\right) dx - \\
&- \int_{0,375\vartheta_3}^{\infty} \frac{2\sigma_e^2}{\vartheta_3 x} \exp\left(-\frac{8x}{\vartheta_3} + 3\right) dx + \int_{1,125\vartheta_3}^{\infty} \frac{2x}{\vartheta_3} \exp\left(-\frac{4x}{1,5\vartheta_3} + 3\right) dx - \\
&- \int_{0,375\vartheta_3}^{\infty} \frac{2x}{\vartheta_3} \exp\left(-\frac{8x}{\vartheta_3} + 3\right) dx = \vartheta_3, \text{ т. е. } m_{\vartheta} = \vartheta_3, \quad (4.127)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\vartheta}^2 + m_{\vartheta}^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)^2} f_{\Delta}(\vartheta_{\Delta}) d\vartheta_{\Delta} = \frac{\vartheta_{\Delta}^2}{3} g(\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}) - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\Delta}^2}{3} \frac{df_{\Delta}}{d\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)}} d\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} = \\
&= \int_{1,125\vartheta_3}^{\infty} \frac{4}{\vartheta_3 x} \exp\left(-\frac{4x}{1,5\vartheta_3} + 3\right) \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\Delta}^2}{3} \exp\left(-\frac{(\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - x)^2}{2\sigma_e^2}\right) d\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} dx = \\
&= - \int_{0,375\vartheta_3}^{\infty} \frac{4}{\vartheta_3 x} \exp\left(-\frac{8x}{\vartheta_3} + 3\right) \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vartheta_{\Delta}^2}{3} \exp\left(-\frac{(\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} - x)^2}{2\sigma_e^2}\right) d\vartheta_{\text{эл}}^{(\Delta)} dx = \\
&= \int_{1,125\vartheta_3}^{\infty} \frac{4x^2}{\vartheta_3} \exp\left(-\frac{4x}{1,5\vartheta_3} + 3\right) dx - \int_{0,375\vartheta_3}^{\infty} \frac{4x^2}{\vartheta_3} \exp\left(-\frac{8x}{\vartheta_3} + 3\right) dx + \\
&+ \int_{1,125\vartheta_3}^{\infty} \frac{4x^2}{3\vartheta_3} \exp\left(-\frac{4x}{1,5\vartheta_3} + 3\right) dx - \int_{0,375\vartheta_3}^{\infty} \frac{4x^2}{3\vartheta_3} \exp\left(-\frac{8x}{\vartheta_3} + 3\right) dx = \\
&= \sigma_e^2 + 1,1475\vartheta_3^2, \\
\sigma_{\vartheta}^2 &= \sigma_e^2 + 0,1475\vartheta_3^2. \quad (4.128)
\end{aligned}$$

Представленные выше зависимости получены для перегревов корпусов элементов $\vartheta_{\text{эл}}$. Однако учитывая, что исходные выражения для определения температур корпуса и окружающей элемент среды идентичны, что следует из сравнения формул (4.57), (4.62) и (4.100), (4.105), представленные выше зависимости справедливы и для расчета перегревов воздуха в блоке у элементов.

Формулы (4.119), (4.120) позволяют вычислить вероятность того, что при заданном значении перегрева зоны ϑ_3 , температура любого элемента РЭА не может быть выше некоторого наперед заданного значения $\vartheta_{\text{эл}}$. Следовательно, если задаться вероятностью правильного расчета, то по формулам (4.119) или (4.120) можно определить значение

ние перегрева $\vartheta_{\text{эл}}$ и утверждать с этой вероятностью, что ни один элемент РЭА не может иметь более высокую температуру, т. е. $\vartheta_{\text{эл}i} < \vartheta_{\text{эл}}^{(d)}$ для $i = 1, 2, \dots, n$, где n — число элементов.

Таким образом, для всех элементов, у которых допустимые по ТЗ перегревы меньше наперед заданного перегрева $\vartheta_{\text{эл}}^{(d)} < \vartheta_{\text{эл}}^{(d)}$, $j = 1, 2, \dots, m$; $m < n$, можно дальнейшие расчеты не производить, а для остальных элементов, у которых $\vartheta_{\text{эл}k}^{(d)} > \vartheta_{\text{эл}}^{(d)}$, $k = m + 1, m + 2, \dots, n$, необходимо провести дальнейшие расчеты.

При помощи ЭВМ по формулам (4.119), (4.120) были рассчитаны зависимости величины $\vartheta_{\text{эл}}^{(d)}$ от ϑ_3 при $\sigma_e = 10$ и вероятностях, равных $p = 0,95; 0,96; 0,97; 0,98; 0,99; 0,995; 0,999$. Эти зависимости представлены на рис. 4.22 (для естественного воздушного охлаждения) и на рис. 4.23 (для принудительного воздушного охлаждения).

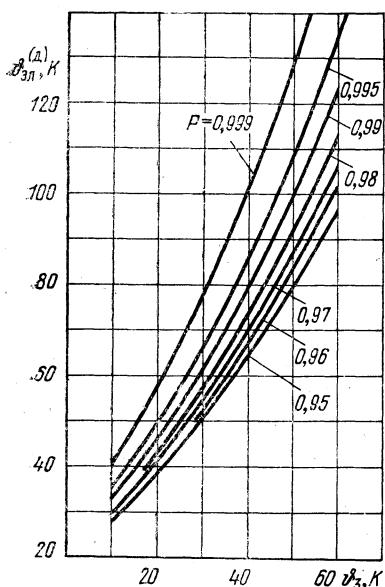


Рис. 4.22. Зависимость перегрева элемента от перегрева нагретой зоны при естественном воздушном охлаждении.

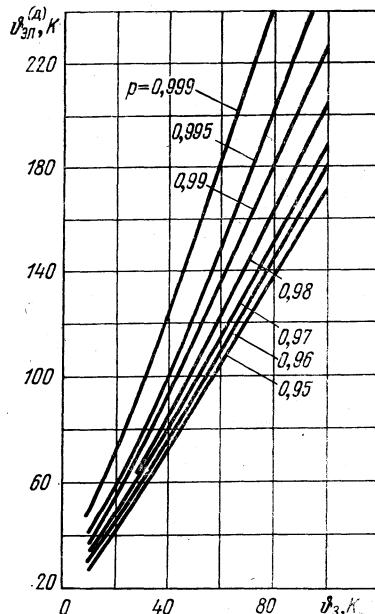


Рис. 4.23. Зависимость перегрева элемента от перегрева нагретой зоны при вынужденном воздушном охлаждении.

Методика определения числа элементов РЭА, подлежащих расчету теплового режима, состоит в следующем:

1. Задаемся вероятностью правильного расчета p .
2. По одной из методик, изложенных в § 4.2 или 4.3, определяем средний перегрев нагретой зоны (или воздуха) в РЭА.
3. По рис. 4.22, 4.23 находим значения $\vartheta_{\text{эл}}^{(d)}$.
4. Расчету подлежат те элементы РЭА, допустимые по ТЗ, перегревы которых больше найденных по п. 3, т. е. $\vartheta_{\text{эл}k}^{(d)} > \vartheta_{\text{эл}}^{(d)}$, $k = 1, 2, 3, \dots$,

Таблица 4.3

Параметры элементов

№/п. п.	Наименование элементов	Коли- чество	P , Вт	$T_{\text{эл}}^{\text{д}}$, К
1	Трансформатор	1	0,2	358
2	Дроссель	1	2,0	358
3	"	2	3,0	358
4	Конденсатор	111	—	358
5	Предохранитель	5	0,15	373
6	Дроссель	3	0,32	393
7	"	4	0,53	393
8	"	1	0,55	393
9	"	2	0,49	393
10	Диод	50	0,15	393
11	"	2	0,10	393
12	Транзистор	2	0,01	393
13	"	1	0,8	393
14	"	1	0,5	393
15	"	1	0,5	393
16	"	1	4,0	393
17	"	2	0,8	393
18	"	2	2,5	393
19	"	2	0,1	393
20	"	1	0,02	393
21	"	1	0,05	393
22	Резистор	1	0,1	398
23	Конденсатор	69	—	398
24	Резистор	1	0,9	428
25	"	2	0,65	428
26	"	4	0,5	428
27	"	32	0,05	428
28	"	4	0,14	428
29	"	2	0,50	428
30	"	1	0,15	428
31	Дроссель	2	0,20	428
32	Конденсатор	11	—	428
33	Резистор	60	0,001	473
34	"	4	0,05	473
35	"	14	0,1	473
36	"	1	0,15	473
37	"	1	0,33	473
38	"	1	0,29	473
39	"	1	0,24	473
40	"	1	0,27	473
41	"	2	0,40	473
42	Разъем	3	—	473

полнить подробный расчет теплового режима. Блок с естественным воздушным охлаждением и температурой окружающей среды $T_c = 323$ К, расчетное значение средней температуры воздуха в блоке $T_b = 358$ К, параметры элементов приведены в табл. 4.3.

1. Определяем средний перегрев воздуха в блоке

$$\vartheta_b = T_b - T_c = 35 \text{ К.}$$

2. Выбираем вероятности правильного расчета, $p = 0,98$.

3) Находим для значений $\vartheta_b = 35$ К и $p = 0,98$ (рис. 4.24) $\vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} = 64$ К, $T_{\text{эл}}^{(\text{д})} = T_c + \vartheta_{\text{эл}}^{(\text{д})} = 387$ К.

4. Дальнейшему расчету подлежат элементы, у которых $T_{\text{эл},k}^{(\text{д})} < 387$ К. В соответствии с табл. 4.3 это элементы с номерами 1, 2, 3, 4 и 5. Поскольку из каждой группы

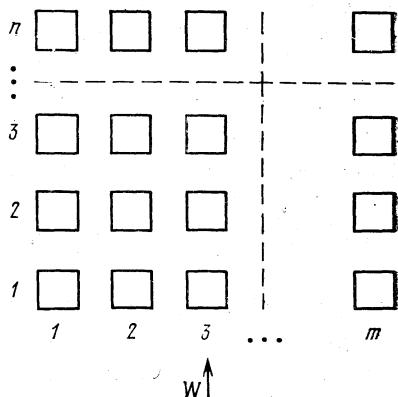


Рис. 4.24. Схема расположения конструктивных единиц РЭА.

$(n-m)$, где $(n-m)$ — число элементов РЭА, для которых необходимо выполнить расчет теплового режима.

Все элементы, подлежащие дальнейшему расчету, делятся на группы, к каждой из которых принадлежат элементы одного типа и наименования с близкой рассеиваемой мощностью. Для блоков с естественным воздушным охлаждением рассчитывается перегрев поверхности (либо окружающей среды) любого одного элемента из каждой группы. Для блоков с принудительным воздушным охлаждением рассчитывается перегрев поверхности (либо окружающей среды) того элемента из группы, который стоит последним по ходу теплоносителя.

Пример. Определить число элементов блока РЭА, для которых необходимо выполнить подробный расчет теплового режима. Блок с естественным воздушным охлаждением

и температурой окружающей среды $T_c = 323$ К, расчетное значение средней температуры воздуха в блоке $T_b = 358$ К, параметры элементов приведены в табл. 4.3.

элементов достаточно рассчитать один, то в нашем примере из общего числа 42 элементов подлежат расчету только 5 элементов.

4.5. ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Поскольку радиоэлектронный аппарат конструируется из элементов с различной мощностью рассеивания и зависимостью надежности от температуры, должна существовать конструкция аппарата, имеющая максимальную надежность. В этом параграфе рассмотрены некоторые принципы теплофизического конструирования и вопросы создания оптимальных с точки зрения тепловых режимов конструкций радиоэлектронных аппаратов с принудительным охлаждением. Оптимальной будем считать конструкцию, имеющую максимальную надежность при заданных ограничениях [66].

Существуют разные методы повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры. Используя эти методы, разработчик и конструктор выбирают оптимальную электрическую схему, радиоэлектронные элементы для этой схемы и метод охлаждения. Предположим, что нам заданы конкретные элементы, входящие в схему радиоэлектронной аппаратуры, принудительный метод охлаждения, расход воздуха. Необходимо определить расположение радиоэлементов для обеспечения максимальной надежности аппарата.

Подобная задача может решаться на различных уровнях: при конструировании узла, платы, кассеты, субблока, блока, стойки или шкафа, радиоэлектронного комплекса. В этом параграфе мы будем называть различные устройства конструктивной единицей, вкладывая в это понятие разный смысл в зависимости от уровня проектирования. Так, например, при проектировании платы, узла, кассеты конструктивными единицами могут быть полупроводниковые приборы, резисторы и т. п.; при проектировании стойки или шкафа — отдельные блоки.

Общий расход воздуха, который нам задан, может быть по-разному распределен между конструктивными единицами. Рассмотрим два случая: когда мы можем распределять расход воздуха между конструктивными единицами и когда не можем. Действительно, при охлаждении кассеты очень трудно определенным образом распределить воздух между элементами, а при охлаждении радиоэлектронного комплекса можно сравнительно легко получить необходимое распределение воздуха между отдельными стойками, шкафами, блоками.

Конструктивным исполнением радиоэлектронной аппаратуры будем называть некоторое расположение его конструктивных единиц и распределение потоков воздуха (теплоносителя) между конструктивными единицами. Оптимальным конструктивным исполнением радиоэлектронной аппаратуры будем называть такое расположение конструктивных единиц и распределение теплоносителя между ними (при заданном общем расходе теплоносителя), при которых общая надежность радиоэлектронной аппаратуры имеет максимальное значение.

Общий случай расположения конструктивных единиц радиоэлектронной аппаратуры приведен на рис. 4.24 (направление потока теплоносителя показано стрелкой с индексом W) [67]. Количество теплоносителя будем характеризовать величиной $W = Gc_p$, где G — массовый

расход теплоносителя; c_p — удельная теплоемкость теплоносителя. На рис. 4.24 конструктивные единицы расположены горизонтальными рядами (будем называть их строками) и вертикальными (будем называть из столбцами). В общем случае конструктивные единицы могут не располагаться правильными рядами, тогда отсутствие в некоторых столбцах (строках) элементов обозначается нулями, а деление на строки и столбцы является условным.

В соответствии с принятыми условиями общее количество теплоносителя задано и равно

$$W = \sum_{j=1}^m W_j, \quad (4.129)$$

где W_j — количество теплоносителя, пропускаемого через j -й столбец ($j=1, 2, \dots, n$).

Рассмотрим два случая ориентации потоков теплоносителя: потоки теплоносителя строго ориентированы вдоль столбцов, после прохождения строки они полностью перемешиваются. Первый случай имеет место, если конструктивными единицами являются блоки, стойки, подсистемы радиоэлектронного комплекса. Второй случай может иметь место, если конструктивными элементами являются элементы, расположенные на общем шасси. На практике могут быть промежуточные случаи, когда имеется частичное перемешивание теплоносителя, однако это мы рассматривать не будем.

Надежность радиоэлектронной аппаратуры и ее элементов будем характеризовать величиной интенсивности отказа по формулам (1.3) — (1.5). Если в небольшом диапазоне температур линеаризовать эти формулы, то интенсивность отказов для радиодетали можно определить выражением

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ijo} + K_{ij}\vartheta_{ij}, \quad (4.130)$$

где λ_{ijo} — интенсивность отказов элемента с индексом ij при температуре теплоносителя T_{ijo} ; K_{ij} — коэффициент линеаризации зависимости $\lambda_{ij} = f(T_{ij})$ для элемента с индексом ij при изменении температуры теплоносителя в диапазоне $T_{ijo}—T_{ijmax}$ ($T_{ijmax} = T_{ijo} + P/W$); ϑ_{ij} — перегрев теплоносителя в районе элемента с индексом ij относительно температуры теплоносителя T_{ijo} . В дальнейшем коэффициенты K_{ij} будем называть коэффициентами надежности. Перегрев ϑ_{ij} можно представить в виде суммы двух перегревов: перегрева $\vartheta_{ij}^{(1)}$, который бы имел элемент при условии, что он расположен в первом ряду по ходу движения теплоносителя, и перегрева ϑ'_{ij} , обусловленного нагревом теплоносителя предыдущими элементами, т. е.

$$\vartheta_{ij} = \vartheta_{ij}^{(1)} + \vartheta'_{ij}. \quad (4.131)$$

Подставляя (4.131) в (4.130), получаем

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^{(1)} + K_{ij}\vartheta'_{ij}, \quad (4.132)$$

где $\lambda_{ij}^{(1)}$ — интенсивность отказов элемента с индексом ij , если он установлен в первом ряду по движению потока теплоносителя.

При конструировании радиоэлектронной аппаратуры имеются весьма ограниченные возможности перемещения радиоэлементов, так как на их взаимное расположение обычно накладывается целый ряд ограничений. Гораздо большие возможности имеются при размещении отдельных блоков, вследствие чего сначала будем предполагать, что конструктивными единицами являются отдельные блоки. Предположим также, что интенсивность отказов в этом случае можно записать в виде (4.132). Способы определения величин $\lambda_{ij}^{(1)}$, K_{ij} и ϑ'_{ij} для этого случая будут рассмотрены ниже.

Если потоки теплоносителя строго ориентированы вдоль столбцов, то тепловой режим каждого столбца не зависит от тепловых режимов других столбцов и может быть рассмотрен отдельно. Предположим, что величины рассеиваемых мощностей по блокам нам заданы в виде матрицы

$$\begin{vmatrix} P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nj} & \dots & P_{nm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ig} & \dots & P_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2m} \\ P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1m} \end{vmatrix}, \quad (4.133)$$

причем суммарная мощность, рассеиваемая в аппарате, определяется выражением $P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij}$. Распределение потоков теплоносителя по

столбцам задано вектором W_1, W_2, \dots, W_m , а общее количество теплоносителя определяется из (4.129).

Поскольку все тепло, выделяемое элементами, отдается теплоносителю, то перегрев ϑ'_{ij} , обусловленный нагревом теплоносителя предыдущими элементами, равен

$$\vartheta'_{ij} = \sum_{l=1}^{i-1} P_{lj} / W_j, \quad (4.134)$$

где $l = 1, 2, \dots, i-1$.

Подставив (4.134) в (4.132), получим зависимость интенсивности отказов элемента с индексом ij от перегрева при отсутствии перемещения теплоносителя

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^{(1)} + K_{ij} \frac{\sum_{l=1}^{i-1} P_{lj}}{W_j}; \quad (4.135)$$

зависимость интенсивности отказов элементов j -го столбца от перегрева

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^n \lambda_{ij}^{(1)} + \frac{1}{W_j} \sum_{i=1}^n K_{ij} \sum_{l=1}^{i-1} P_{lj}; \quad (4.136)$$

зависимость интенсивности отказов радиоэлектронного аппарата от перегрева

$$\lambda = \sum_{j=1}^m \lambda_j. \quad (4.137)$$

Выражения (4.135) — (4.137) получены при следующих предположениях, обычно принимаемых при простейших расчетах: отказ любого элемента влечет за собой отказ всей системы, вероятности отказов элементов являются независимыми событиями.

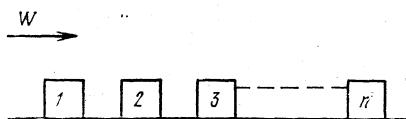


Рис. 4.25. Схема линейного расположения конструктивных единиц РЭА.

сским условиям температур воздуха у элементов при любом их расположении. Необходимо найти такое расположение элементов, при котором надежность системы будет максимальной (интенсивность отказов минимальна).

Выражение для интенсивности отказов системы можно получить из (4.136)

$$\begin{aligned} \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(1)} + \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n K_i \sum_{l=1}^{i-1} P_l = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(1)} + \frac{1}{W} [P_1 (K_2 + K_3 + \dots + K_n) + \\ + P_2 (K_3 + K_4 + \dots + K_n) + \dots + P_i (K_{i+1} + K_{i+2} + \dots + K_n) + \dots \\ + P_{\mu} (K_{\mu+1} + K_{\mu+2} + \dots + K_n) + \dots + P_{n-1} K_n]. \quad (4.138) \end{aligned}$$

Если поменять местами элементы i и μ ($i < \mu$), то интенсивность отказов в этом случае будет равна

$$\begin{aligned} \lambda' = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(1)} + \frac{1}{W} [P_1 (K_2 + K_3 + \dots + K_n) + P_2 (K_3 + K_4 + \dots \\ + K_n) + \dots + P_{\mu} (K_i + K_{i+1} + \dots + K_{\mu-1} + K_{\mu+1} + \dots + K_n) + \\ + P_{i+1} (K_{i+2} + K_{i+3} + \dots + K_{\mu-1} + K_i + K_{\mu+1} + \dots + K_n) + \dots \\ + P_i (K_{\mu+1} + K_{\mu+2} + \dots + K_n) + P_{\mu+1} (K_{\mu+2} + K_{\mu+3} + \dots \\ + K_n) + \dots + P_{n-1} K_n], \quad (4.139) \end{aligned}$$

а разность $\lambda - \lambda'$ будет определяться выражением

$$\lambda - \lambda' = \frac{1}{W} \left[P_i \sum_{l=i+1}^{\mu} K_l + P_{i+1} (K_{\mu} - K_i) + \dots + P_{\mu-1} (K_{\mu} - K_i) - P_{\mu} \sum_{l=1}^{\mu-1} K_l \right]. \quad (4.140)$$

Если (4.138) представляет собой интенсивность отказов при оптимальном расположении элементов, то при любом другом расположении интенсивность отказов будет не меньше и, следовательно, выражение (4.140) всегда не больше нуля, т. е.

$$\lambda - \lambda' = \frac{1}{W} \left[(K_\mu - K_i) \sum_{l=i+1}^{\mu-1} P_l - (P_\mu - P_i) \sum_{l=i}^{\mu-1} K_l + P_i K_\mu - P_\mu K_i \right] \leq 0. \quad (4.141)$$

Положив $\mu = i + 1$, получим

$$P_i K_{i+1} - P_{i+1} K_i \leq 0$$

или

$$P_i / K_i \leq P_{i+1} / K_{i+1}. \quad (4.142)$$

Неравенство (4.142) справедливо при $i = 1, 2, \dots, n-1$, поэтому необходимое условие для оптимального размещения элементов можно записать в виде

$$P_1 / K_1 \leq P_2 / K_2 \leq \dots \leq P_n / K_n. \quad (4.143)$$

Покажем, что условие (4.143) является достаточным условием того, что данное расположение оптимально, для чего достаточно доказать, что при соблюдении условия (4.143) имеет место неравенство (4.141). Неравенство (4.141) имеет место, если

$$P_i K_\mu \leq P_\mu K_i, \quad (4.144)$$

$$(K_\mu - K_i) \sum_{l=i+1}^{\mu-1} P_l \leq (P_\mu - P_i) \sum_{l=i+1}^{\mu-1} K_l. \quad (4.145)$$

Неравенство (4.144) всегда соблюдается, если справедливо условие (4.143).

Покажем, что при расположении элементов в соответствии с (4.143) неравенство (4.145) также соблюдается. Из (4.143) можно получить следующие производные неравенства:

$$\sum_{r=a}^b P_{\mu-r} \left| \sum_{r=a}^b K_{\mu-r} \right| \leq P_\mu / K_\mu, \quad (4.146)$$

$$\sum_{r=a}^c P_{i+r} \left| \sum_{r=a}^c K_{i+r} \right| \geq P_i / K_i, \quad (4.147)$$

где $0 \leq a; 0 \leq b \leq \mu-1; a \leq c \leq n-i$.

Неравенство (4.145) имеет место, если соблюдаются условия

$$P_\mu / K_\mu \geq \sum_{l=i+1}^{\mu-1} P_l \left| \sum_{l=i+1}^{\mu-1} K_l \right| \quad (4.148)$$

$$P_i / K_i \leq \sum_{l=i+1}^{\mu-1} P_l \left| \sum_{l=i+1}^{\mu-1} K_l \right| \quad (4.149)$$

Неравенство (4.148) следует из неравенства (4.146) при $a = \mu - i - 1$ и $b = 1$, неравенство (4.149) следует из неравенства (4.147) при $a = 1$ и $c = \mu - i - 1$. Следовательно, неравенство (4.145) всегда имеет место при соблюдении условия (4.143).

Таким образом, необходимым и достаточным условием для обеспечения максимальной надежности системы при расположении ее элементов на «линии» с последовательным охлаждением теплоносителем является расположение элементов в порядке, определяемом неравенством (4.143).

Рассмотрим задачу на «линии», составляющими которой являются элементы. В этом случае перегрев теплоносителя у элемента определяется по методике, изложенной в § 4.3. Задачу можно значительно упростить, если принять следующие допущения: все выделяемое элементом тепло отдается теплоносителю; в качестве температуры теплоносителя у элемента принимается температура наиболее нагретой точки, т. е. температура теплоносителя за элементом.

Рассмотрение большого числа радиоэлектронных аппаратов различных конструкций показало, что принятые допущения приводят к незначительным погрешностям при определении интенсивности отказов и вносят единообразие в расчетные соотношения.

С учетом принятых допущений перегрев теплоносителя у элемента с индексом ij в случае ориентации потока теплоносителя вдоль столбцов можно определить по формуле

$$\vartheta_{ij} = \sum_{l=1}^i P_{lj} / W_j \quad (4.150)$$

Если потоки теплоносителя полностью перемешиваются, то говорить о распределении потоков по столбцам бессмысленно. Используя те же рассуждения, что и при выводе соотношения (4.150), можно записать выражение для определения перегрева теплоносителя за элементом с индексом ij при полном перемешивании потоков

$$\vartheta_{ij} = \frac{1}{W} \sum_{l=1}^i \sum_{s=1}^m P_{ls}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (4.151)$$

Подставив (4.150) в (4.130), получим зависимость интенсивности отказов элемента с индексом ij от перегрева при отсутствии перемешивания потоков теплоносителя

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ijo} + K_{ij} \frac{\sum_{l=1}^i P_{lj}}{W_j}; \quad (4.152)$$

зависимость интенсивности отказов элементов j -го столбца от перегрева

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^n \lambda_{ijo} + \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n K_{ij} \sum_{l=1}^i P_{lj}; \quad (4.153)$$

зависимость интенсивности отказов радиоэлектронного аппарата от перегрева

$$\lambda = \sum_{j=1}^m \lambda_j. \quad (4.154)$$

Аналогичные выражения при полном перемешивании теплоносителя имеют вид

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ijo} + \frac{K_{ij}}{W} \sum_{l=1}^i \sum_{r=1}^m P_{lr}, \quad (4.155)$$

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^n \lambda_{ijo}, \quad (4.156)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i. \quad (4.157)$$

Так как выражения (4.152) и (4.153) можно записать в виде

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^{(1)} + K_{ij} \sum_{l=1}^{i-1} P_l, \quad (4.158)$$

$$\lambda_i = \sum_{i=1}^n \lambda_{ij}^{(1)} + \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n K_{ij} \sum_{l=1}^{i-1} P_{lj}, \quad (4.159)$$

идентичном (4.135) и (4.136), то аналогичными рассуждениями можно показать, что и в этом случае необходимым и достаточным условием для обеспечения максимальной надежности системы при расположении ее элементов на «линии» с последовательным прохождением теплоносителя является установка элементов в порядке, определяемом неравенством (4.143).

Теперь перейдем от радиоэлементов к блокам. Коэффициенты надежности известны только для элементов, входящих в состав блоков. Элементы расположены внутри блока либо в «линию», либо в n строк и m столбцов. Если конструктивными единицами аппаратуры являются блоки, стойки и т. п., то надежность конструктивной единицы может быть определена по (4.153) либо по (4.157), если она установлена первой по потоку теплоносителя. Для i -го блока выражение (4.153) имеет вид

$$\lambda_i = \sum_{r=1}^{n_i} \lambda_{rio} + \frac{1}{W} \sum_{r=1}^{n_i} K_{ri} \left[\sum_{l=1}^r P_{li} + \sum_{m=1}^{i-1} P_m \right], \quad (4.160)$$

где n_i — число радиодеталей, установленных в «линию», внутри i -го элемента; P_m — суммарная мощность рассеивания m -го элемента:

$$P_m = \sum_{l=1}^{n_m} P_{lm}.$$

Введем следующие обозначения:

$$K_1 = \sum_{r=1}^{n_1} K_{r1}, \quad K_2 = \sum_{r=1}^{n_2} K_{r2} \dots K_n = \sum_{r=1}^{n_n} K_{rn}. \quad (4.161)$$

и после несложных преобразований из (4.160) получим

$$\lambda_i = \lambda_i^{(1)} + \frac{1}{W} K_i \sum_{m=1}^{i-1} P_m. \quad (4.162)$$

Так как выражение (4.162) совпадает с (4.136), то мы таким образом нашли, как определять величины K_i и P_m для блоков.

Анализ выражения (4.143) для оптимального расположения конструктивных единиц радиоэлектронной аппаратуры с линейной схемой позволяет сделать ряд практических рекомендаций. 1. Пассивные конст-

руктивные единицы ($P_i=0$) целесообразно располагать первыми по ходу потока теплоносителя. 2. Если аппаратура состоит из конструктивных единиц, для которых справедливы равенства $P_1=P_2=\dots=P_n$ и $K_1=K_2=\dots=K_n$, то расположение элементов не влияет на надежность аппаратуры. 3. Часто применяемое на практике расположение более

мощных конструктивных единиц в конце потока теплоносителя является необоснованным, так как при этом может нарушаться неравенство (4.143).

4. Основным критерием для расположения конструктивных единиц с точки зрения максимальной надежности аппаратуры является неравенство (4.143).

Если конструктивные единицы аппаратуры расположены нескольки

Рис. 4.26. Схема строчного расположения конструктивных единиц РЭА.

ми столбцами и имеется возможность регулировать распределение потоков теплоносителя между столбцами, то необходимо решить задачу оптимального распределения потоков теплоносителя, обеспечивающего максимальную надежность аппаратуры. Предположим, что m элементов аппаратуры расположены в одну строку (рис. 4.26). Необходимо таким образом распределить имеющийся поток теплоносителя W (определить такие значения W_1, W_2, \dots, W_m , чтобы надежность аппаратуры была максимальной).

Если конструктивными единицами являются элементы, для которых известны коэффициенты надежности, то в соответствии с (4.152)–(4.154) ($n=1$), интенсивность отказов аппаратуры определяется из формулы

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_{io} + \sum_{i=1}^m K_i \frac{P_i}{W_i}. \quad (4.163)$$

Поскольку переменные W_i связаны условием (4.129), для определения минимума функции (4.163) воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Из (4.129) и (4.163) следует, что функция Лагранжа должна иметь вид

$$\Phi = \sum_{i=1}^m K_i \frac{P_i}{W_i} + \varphi \sum_{i=1}^m W_i, \quad (4.164)$$

где φ – неопределенный множитель. Значения W_1, W_2, \dots, W_m , при которых выражение (4.163) имеет минимум, можно определить, приравняв частные производные от (4.164) нулю (читатель может самостоятельно убедиться, что это условие минимума, а не максимума функции):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial W_i} = -K_i P_i / W_i^2 + \varphi = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

отсюда

$$W_i = \sqrt{K_i P_i / \varphi}. \quad (4.165)$$

Значение неопределенного множителя φ определим при помощи (4.129)

$$W = \sqrt{\sum_{i=1}^m K_i P_i / \varphi},$$

отсюда

$$V\varphi = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m \sqrt{K_i P_i} \quad (4.166)$$

Подставив (4.166) в (4.165), окончательно получим

$$W_i = W \frac{\sqrt{K_i P_i}}{\sum_{j=1}^m \sqrt{K_j P_j}}. \quad (4.167)$$

Выражение (4.167) определяет оптимальное распределение потоков теплоносителя между элементами радиоэлектронной аппаратуры, при котором надежность аппаратуры будет максимальной.

Если конструктивными единицами являются блоки, стойки и т. п., для которых не определены коэффициенты надежности, то оптимальное распределение потоков теплоносителей находится следующим образом. Определим интенсивность отказов блока в виде

$$\lambda_i = \frac{A_i}{W_i} + \sum_{r=1}^{n_i} \lambda_{ro}. \quad (4.168)$$

Если внутри блока элементы, для которых известны коэффициенты надежности, установлены на «линии», то из сравнения (4.153) и (4.168) находим значение коэффициента надежности блока:

$$A_i = \sum_{r=1}^{n_i} K_r \sum_{l=1}^r P_{l_r}. \quad (4.169)$$

Если внутри блока элементы, для которых известны коэффициенты надежности, расположены m_p столбцами и n_r строками, то из сравнения (4.155), (4.156), (4.157) и (4.168) получим

$$A_i = \sum_{r=1}^{n_r} \sum_{p=1}^{m_p} K_{rp} \sum_{l=1}^r \sum_{p=1}^{m_p} P_{l_p}. \quad (4.170)$$

Положив в (4.167) $A_i = \sum_{i=1}^m K_i P_i$, получим выражения для определения оптимального распределения потоков теплоносителя между блоками, стойками и т. п.

$$W_i = W \frac{\sqrt{A_i}}{\sum_{j=1}^m \sqrt{A_j}}. \quad (4.171)$$

Формула (4.171) может быть использована при любом расположении блоков радиоэлектронной аппаратуры. Например, при расположении блоков, приведенных на рис. 4.24, каждый столбец может быть назван блоком и для каждого столбца — блока при помощи выражения (4.169) может быть определен коэффициент A_i , после чего оптимальное распределение теплоносителя определяется уравнением (4.171). На практике потоки теплоносителя между блоками, стойками и т. п. рас-

пределяются равномерно либо пропорционально мощности, что обычно заметно отличается от оптимального распределения.

Задача на «плоскости» формулируется для $m \times n$ конструктивных единиц, расположенных в n строк и m столбцов (рис. 4.24). Заданы тип и рассеиваемая мощность каждой из $m \times n$ конструктивных единиц аппаратуры и известно, что их необходимо разместить в n строках и m столбцах. Необходимо при заданном расходе теплоносителя и оптимальном (либо заданном) распределении потоков теплоносителя по столбцам найти такое расположение конструктивных единиц, при котором надежность аппаратуры будет максимальной. Когда мы говорим об оптимальном или заданном распределении потоков теплоносителя, то имеем в виду, что мы либо можем, либо не можем управлять распределением потоков теплоносителя.

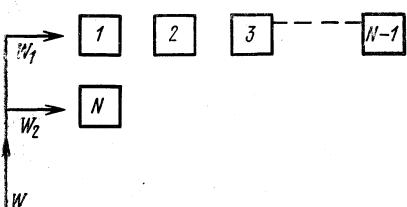


Рис. 4.27. Схема расположения блоков с двумя столбцами.

Прежде чем решать задачу на «плоскости», решим более общую задачу, которая формулируется следующим образом. Имеется N конструктивных единиц с заданными мощностями рассеивания и расходом теплоносителя. Необходимо определить, в каком случае выше надежность аппаратуры: при расположении конструктивных единиц на «линии» ($m=1, n=N$) или на плоскости ($m>1, m \times n=N$). И, вообще, поскольку «линия» есть частный случай «плоскости», то возникает вопрос, какие соотношения между числом столбцов и строк дают максимальную надежность.

Рассмотрим N конструктивных единиц, расположенных на «линии» (рис. 4.25), и сравним их надежность с надежностью другой системы (рис. 4.27), в которой имеется два столбца. Причем в одном столбце $N-1$ конструктивных единиц, а в другом — одна единица с индексом N . Распределение потоков теплоносителя во второй системе будем считать оптимальным. В соответствии с (4.152), (4.153) и (4.154) интенсивность отказов первой и второй систем определяется

$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^N \lambda_{io} + \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N K_i \sum_{l=1}^i P_l = \sum_{i=1}^N \lambda_{io} + \frac{A}{W}, \quad (4.172)$$

$$\lambda_2 = \sum_{i=1}^N \lambda_{io} + \frac{1}{W_1} \sum_{i=1}^{N-1} K_i \sum_{l=1}^i P_l + \frac{1}{W_2} K_N P_N = \sum_{i=1}^N \lambda_{io} + \frac{A_1}{W_1} + \frac{A_2}{W_2}, \quad (4.173)$$

где A, A_1, A_2 — коэффициенты надежности блоков.

Оптимальные потоки теплоносителя W_1 и W_2 можно определить из (4.171)

$$W_1 = W \frac{\sqrt{A_1}}{\sqrt{A_1} + \sqrt{A_2}}, \quad (4.174)$$

$$W_2 = W \frac{\sqrt{A_2}}{\sqrt{A_1} + \sqrt{A_2}}. \quad (4.175)$$

Покажем, что если в первой и второй системах элементы расположены оптимально и удовлетворяется условие (4.143), то надежность первой системы выше, чем второй. Для этого достаточно доказать, что

$$\lambda_2 - \lambda_1 > 0. \quad (4.176)$$

Подставив (4.172) — (4.175) в (4.176), получим

$$A_1 + A_2 + 2\sqrt{A_1 A_2} - A > 0. \quad (4.177)$$

Из (4.172) и (4.173) следует, что

$$A - A_1 - A_2 = K_N \sum_{i=1}^{N-1} P_i,$$

и вместо (4.177) можно записать

$$2\sqrt{K_N P_N \sum_{i=1}^{N-1} K_i \sum_{l=1}^i P_l} > K_N \sum_{i=1}^{N-1} P_i$$

или

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \sqrt{2 \frac{P_N}{K_N} \frac{P_1(K_1 + K_2 + \dots + K_{N-1}) + P_2(K_2 + K_3 + \dots + K_{N-1}) + \dots + P_{N-1}K_{N-1}}{(P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1})^2}} > 1. \end{aligned} \quad (4.178)$$

Так как в первой системе расположение оптимально, то в соответствии с (4.146)

$$\frac{P_N}{K_N} \geq \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1}}{K_1 + K_2 + \dots + K_{N-1}},$$

$$\frac{P_N}{K_N} \geq \frac{P_2 + P_3 + \dots + P_{N-1}}{K_2 + K_3 + \dots + K_{N-1}},$$

• • • • • • • •

$$\frac{P_N}{K_N} \geq \frac{P_{N-1}}{K_{N-1}}$$

или

$$\frac{P_N(K_1 + K_2 + \dots + K_{N-1})}{K_N} \geq P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1},$$

$$\frac{P_N(K_2 + K_3 + \dots + K_{N-1})}{K_N} \geq P_2 + P_3 + \dots + P_{N-1}, \quad (4.179)$$

• • • • • • • •

$$\frac{P_N K_{N-1}}{K_N} \geq P_{N-1}.$$

Подставив (4.179) в (4.178)

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{2} \sqrt{2 \frac{P_N}{K_N} \frac{P_1(K_1 + K_2 + \dots + K_{N-1}) + P_2(K_2 + \dots + K_3 + \dots + K_{N-1}) + \dots + P_{N-1}K_{N-1}}{(P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1})^2}} \geq \sqrt{2} \times \\
 & \times \sqrt{2 \frac{P_1(P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1}) + P_2(P_2 + P_3 + \dots + P_{N-1}) + \dots + P_{N-1}}{(P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1})^2}},
 \end{aligned}$$

получим

$$\sqrt{2} \sqrt{2 \sum_{i=1}^{N-1} P_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} P_i P_j} > \sqrt{2} > 1,$$

т. е. неравенство (4.176) доказано.

Можно образовать вторую систему из первой переносом во второй столбец не одной конструктивной единицы, а r последних. Если r последних единиц рассматривать как единый блок и для определения его интенсивности отказов воспользоваться соотношениями (4.146), (4.158), (4.159), получим уравнения, аналогичные (4.164) и (4.165), после чего можно доказать неравенство (4.176).

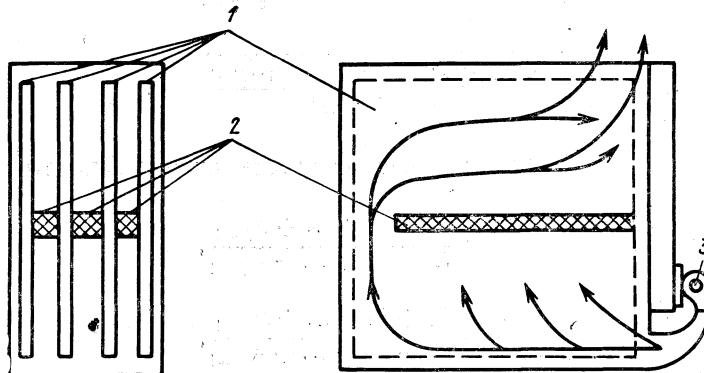


Рис. 4.28. Схема организации потока воздуха в блоке квадратного поперечного сечения: 1 — платы; 2 — перегородки; 3 — вентилятор.

Итак, оптимальным с точки зрения надежности расположением конструктивных единиц аппаратуры при заданном количестве теплоносителя является расположение в «линию» ($m=1, n=N$). Всякое увеличение числа столбцов ухудшает надежность аппаратуры и, вообще, надежность аппаратуры тем выше, чем меньше число столбцов, и достигает своего максимального значения при $m=1$.

Из вышесказанного следует ряд практических выводов. 1. Традиционные конструкции систем воздушного охлаждения, когда холодный воздух из общего короба распределяется между отдельными блоками, стойками и т. п., с точки зрения надежности радиоэлектронной аппаратуры не являются оптимальными.

2. Отдельные блоки радиоэлектронной аппаратуры целесообразно выполнять в форме удлиненных тел с подачей теплоносителя вдоль

большой стороны. Это требование не всегда следует понимать буквально. На рис. 4.28 показана конструкция блоков, в которой соблюдается это требование при квадратной форме кожуха.

Рассмотрим задачу на «линии», сформулированную в начале этого параграфа для блока, элементы которого расположены в n строк и m столбцов (рис. 4.24). Так как мы практически не можем управлять распределением теплоносителя между столбцами в блоке, то будем считать, что теплоноситель распределяется между столбцами поровну и после прохождения каждой строки происходит полное перемешивание теплоносителя. Примем, что каждая строка является элементом, тогда оптимальное расположение элементов должно подчиняться неравенству (4.143). Расположим элементы по следующему правилу:

$$P_{ij}/K_{ij} \leq P_{ep}/K_{ep}, \quad i < e, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad e = 2, 3, \dots, n; \\ j = 1, 2, \dots, m; \quad \rho = 1, 2, \dots, m. \quad (4.180)$$

С помощью (4.146) и (4.147) из (4.172) можно получить следующую систему неравенств

$$\sum_{j=1}^m P_{ij} \left/ \sum_{j=1}^m K_{ij} \right. \leq \sum_{j=1}^m P_{i+1,j} \left/ \sum_{j=1}^m K_{i+1,j} \right., \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (4.181)$$

Подставляя (4.158) и (4.159) в (4.181), получаем неравенство (4.143), и, следовательно, расположение элементов радиоэлектронного аппарата на плоскости, согласно правилу (4.143), соответствует оптимальному при равномерном распределении теплоносителя между столбцами и полном его перемешивания.

Подводя итоги, сформулируем принципы повышения надежности при теплофизическому конструированию принудительно вентилируемой радиоэлектронной аппаратуры:

1. Пассивные (невыделяющие тепла) конструктивные единицы целесообразно располагать первыми по ходу движения теплоносителя.

2. Если аппаратура состоит из конструктивных единиц, имеющих одинаковую мощность и одинаковые коэффициенты надежности, то их расположение не влияет на надежность аппаратуры.

3. Традиционные конструкции систем воздушного охлаждения, в которых холодный воздух из общего короба распределяется между отдельными стойками, блоками и т. п., не являются с точки зрения надежности аппаратуры оптимальными.

4. Отдельные блоки целесообразно выполнять в форме удлиненных тел с подачей теплоносителя вдоль большей стороны.

5. Наиболее целесообразным является последовательное расположение охлаждаемых конструктивных единиц.

6. Наиболее распространенное в настоящее время распределение теплоносителя при параллельной установке конструктивных единиц пропорционально рассеиваемой мощности не всегда оправдано с точки зрения надежности. В частности, при одинаковых коэффициентах надежности распределение теплоносителя целесообразно проводить пропорционально корню квадратному из рассеиваемой мощности.

7. При последовательном охлаждении элементов их целесообразно располагать согласно (4.143).

8. При параллельном охлаждении элементов распределение потоков теплоносителя целесообразно производить согласно (4.171).

9. При конструировании блока элементы на шасси (плате) целесообразно располагать согласно (4.180).

Пример. Рассматриваемая система состоит из четырех радиоэлектронных блоков (рис. 4.29). Мощности, рассеиваемые блоками и системой в целом, значения температу-

Таблица 4.4

Блок	I	II	III	IV
P , Вт	257,31	108,33	142,33	59,03
$T_{вх}$, К	298	298	298	298
$T_{вых}$, К	331	340,5	333	334

ры воздуха на входе и выходе из блоков приведены в табл. 4.4.

Расположение плат в блоке I представлено на рис. 4.30 (стрелкой с индексом W на этом рисунке и в дальнейшем обозначено направление движения воздуха). Воздух, поступающий в блок в количестве W_1 , распределяется по двум каналам II канал $W_{12} = 0,8W_1$. Параметры плат блока

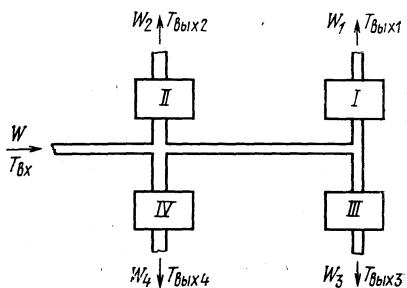


Рис. 4.29. Схема расположения блоков.

Таблица 4.5

Параметры плат блока I

Номер платы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>P</i> , Вт	6,38	2,56	1,40	1,60	1,80	13,5	6,82	8,07	15,0	137,0	0	1,9	4
<i>K</i> · 10 ⁶	37,51	7,81	3,23	3,22	3,42	192,4	51,27	50,94	41,25	30,28	0,4	0,42	10,4
Количество, шт.	1	1	1	1	2	3	3	3	1	1	1	1	1

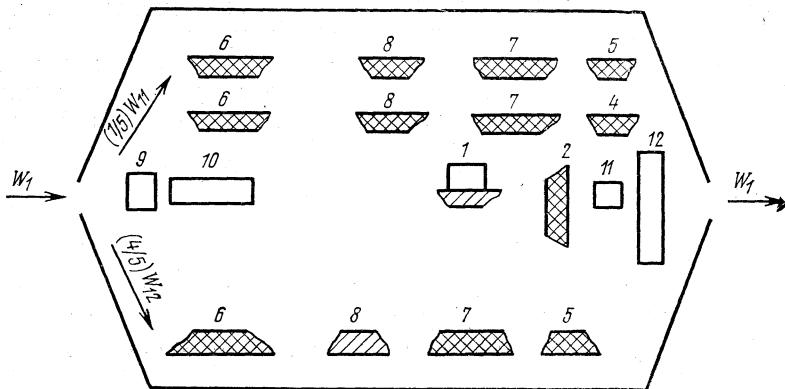


Рис. 4.30. Схема расположения плат в блоке 1.

Конструктивно блок II выполнен в виде двух отсеков (рис. 4.31). В I-м отсеке имеется один канал для прохода воздуха, по которому проходит $\frac{1}{3}$ воздуха, подаваемого в блок. Во II-й отсек поступает $\frac{2}{3}$ расхода воздуха, распределяющегося по четы-

рем каналам отсека в количестве:

$$\text{I канал } W_{21} = \frac{4}{21} W_2,$$

$$\text{II канал } W_{22} = \frac{2}{21} W_2,$$

$$\text{III канал } W_{23} = \frac{4}{21} W_2,$$

$$\text{IV канал } W_{24} = \frac{4}{21} W_2.$$

Параметры плат блока приведены в табл. 4.6. При расчете интенсивности отказов для различных вариантов компоновки блок II был представлен в виде трех отсеков (рис. 4.32), последовательно продуваемых общим расходом воздуха, поступающего

Таблица 4.6

Параметры плат блока II

Номер платы $P, \text{ Вт}$ $K \cdot 10^8$	1 0,3 4,83	2 1,3 1,61	3 0,70 34,8	4 2,90 3,74	5 0,80 2,72	6 1,63 64,24	7 0,40 7,96	8 2,40 5,98	9 0,15 16,89	10 0,70 22,19	11 0,70 7,64
Номер платы $P, \text{ Вт}$ $K \cdot 10^8$	12 0,80 11,56	13 0,25 1,24	14 1,05 13,31	15 1,00 43,94	16 8,70 9,36	17 8,30 2,00	18 1,20 0,80	19 3,10 1,8	20 0,70 0,59	21 2,20 3,35	22 28,6 3,73

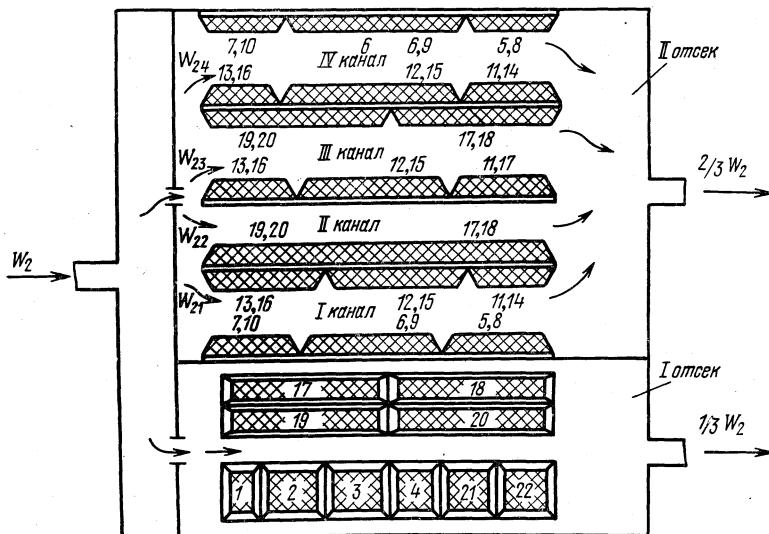


Рис. 4.31. Схема расположения плат в блоке II.

в блок. В пределах каждого отсека платы расположены вдоль двух каналов, по каждому из которых поступает половина общего расхода воздуха. В пределах каждого канала платы сгруппированы в две строки по ходу движения воздуха. После прохождения отсека воздух перемешивается и поступает в следующий отсек, поровну распределяясь между его каналами.

Воздух, поступающий в блок III, распределяется по трем каналам (рис. 4.33) в соотношении: I канал $W_{31}=0,25 W_3$, II канал $W_{32}=0,5 W_3$, III канал $W_{33}=0,25 W_3$. Параметры плат блока приведены в табл. 4.7.

Расположение плат в блоке IV представлено на рис. 4.34. Воздух, поступающий в блок, распределяется по трем каналам в соотношении: I канал $W_{41}=W_{43}$, II канал $W_{42}=0,5 W_4$, III канал $W_{43}=0,25 W_4$. Параметры плат блока приведены в табл. 4.8.

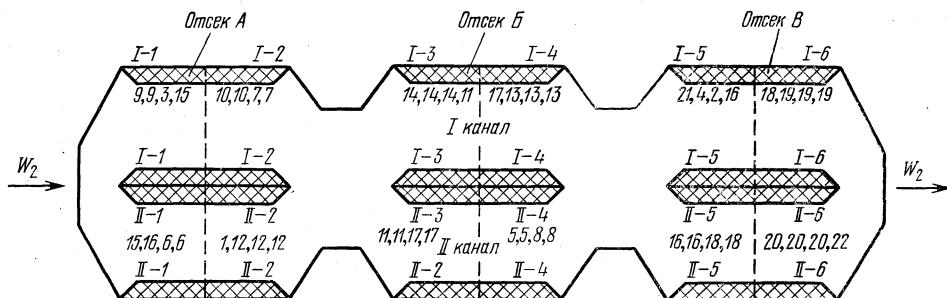


Рис. 4.32. Схема распределения воздуха по отсекам в блоке II.

Таблица 4.7

Параметры плат блока III

Номер платы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P , Вт	6,9	2,10	15,6	6,5	35,81	19,00	16,5	2,40	0	0	3,5	0,62	0,5	32,9
$K \cdot 10^8$	39,57	9,19	21,39	11,43	24,83	41,16	12,69	8,91	1,36	1,36	0,36	2,34	5,68	19

Таблица 4.8

Параметры плат блока IV

Номер платы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
P , Вт	10,11	8,07	2,35	2,94	3,2	2,25	2,77	2,93	9,22	8,55	6,64
$K \cdot 10^8$	16,27	4,74	15,96	13,93	19,65	18,53	17,49	14,00	18,88	6,6	9,07

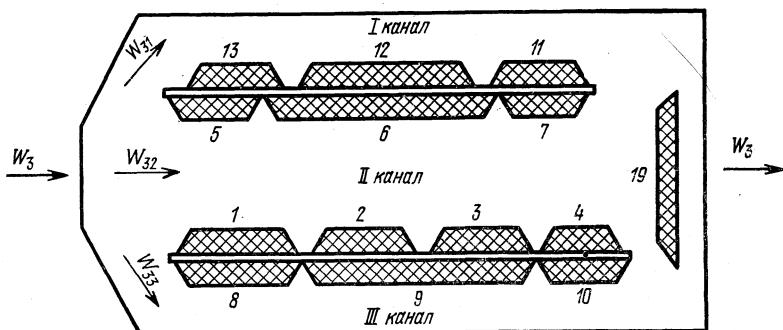


Рис. 4.33. Схема расположения плат в блоке III.

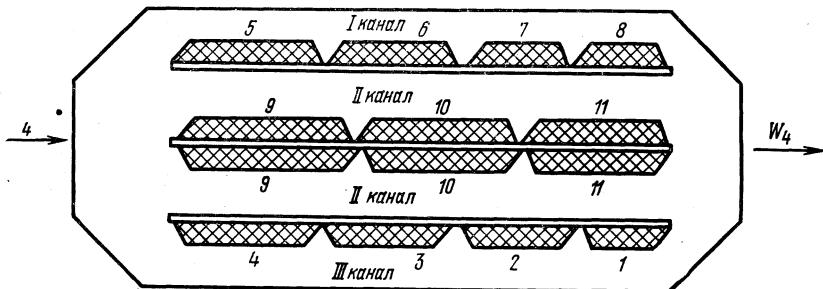


Рис. 4.34. Схема расположения плат в блоке IV.

Проведены расчеты надежности при следующих вариантах систем охлаждения:

1. Параллельное охлаждение блоков с распределением теплоносителя пропорционально мощности.

2. Параллельное охлаждение с оптимальным распределением теплоносителя согласно (4.171).

3. Последовательное охлаждение с расположением блоков согласно неравенству (4.143).

4. Оптимизированные конструкции блоков, в которых платы расположены согласно (4.143), охлаждаются параллельно с распределением теплоносителя пропорционально мощности.

5. Оптимизированные конструкции блоков, в которых элементы расположены согласно (4.143), охлаждаются параллельно с оптимальным распределением теплоносителя согласно (4.171).

6. Оптимизированные конструкции блоков, в которых элементы и блоки расположены согласно (4.143), охлаждаются последовательно. Результаты расчетов сведены в табл. 4.9.

Как показывает анализ табл. 4.9, при полной оптимизации системы интенсивность отказов уменьшилась на 27%, оптимизация, не затрагивающая размещения элементов внутри блока, уменьшает интенсивность отказов на 15% и оптимизация распределения теплоносителя при параллельном охлаждении — на 3%.

Для более широкой оценки эффективности разработанных принципов оптимального конструирования аналогичному анализу был подвергнут ряд радиоэлектронных устройств. Как показали проведенные расчеты [67, 68], применение всех указанных принципов оптимизации радиоэлектронного устройства позволяет снизить величину интенсивности отказов почти на 50%. Применение оптимизации, не затрагивающей расположения элементов внутри блоков, позволяет снизить величину интенсивности отказов почти на 25%. Применение только принципов оптимального распределения потока теплоносителя при параллельном охлаждении позволяет снизить величину интенсивности отказов примерно на 10%. Таким образом, применение принципов оптимального теплофизического конструирования позволяет существенно увеличить надежность радиоэлектронной аппаратуры и в ряде случаев избежать резервирования.

Анализ результатов расчетов также позволяет сделать вывод о том, что уменьшение интенсивности отказов при оптимальном размещении элементов РЭА существенно зависит от уровня рассеиваемой мощности. Для РЭА, работающих в тяжелом тепловом режиме, можно получить более существенное уменьшение интенсивности отказов. Если интенсивность отказов РЭА разложить на две составляющие

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_t, \quad (4.182)$$

где λ_0 — интенсивность отказов РЭА при температуре элементов, равной температуре воздуха на входе в аппарат; λ_t — увеличение интенсивности отказов РЭА за счет повышения температуры элементов, можно найти

зависимость

$$\Delta\lambda = f(\lambda_t/\lambda_o),$$

где $\Delta\lambda$ — изменение интенсивности отказов. В результате анализа расчетов большого числа блоков на рис. 4.35 построены области, характеризующие изменение интенсивности отказов блоков при частичной и полной оптимизации размещения элементов. Реальные возможности уменьшения интенсивности отказов обычно соответствуют области «частичной оптимизации», а область «полной оптимизации» является иллюстрацией теоретических возможностей оптимального размещения элементов РЭА.

Как следует из рис. 4.35, отношение расчетных значений λ_t/λ_o позволяет предвидеть результаты, которых можно добиться при оптимальном размещении элементов блоков РЭА. При $\lambda_t/\lambda_o < 0,5$ нецелесообразно рассматривать оптимальное размещение элементов при конструировании блока РЭА, так как эффект невелик. При $0,5 < \lambda_t/\lambda_o < 0,8$ оптимальное размещение элементов позволяет уменьшить интенсивность отказов на 20—50%; в этом случае конструкторам следует учитывать влияние размещения элементов блока на его надежность. При $\lambda_t/\lambda_o > 0,8$ следует уделить

Рис. 4.35. Зависимость снижения интенсивности отказов блоков от относительной интенсивности отказов элементов:

1 — полная оптимизация; 2 — частичная оптимизация.

особое внимание оптимальному размещению элементов блока РЭА, так как оптимальные конструкции в этом случае позволяют значительно увеличить надежность РЭА.

4.6. ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

При естественном охлаждении РЭА движение воздуха вызвано переносом тепловой энергии, выделяемой источниками тепла (радиоэлементами), и поэтому тепловой режим естественно вентилируемого аппарата неразрывно связан с его аэродинамическим режимом. На расход воздуха при естественной вентиляции существенное влияние оказывают как теплофизические (мощности тепловыделения элементов, температура и давление окружающей среды), так и конструктивные факторы (размещение элементов, габариты аппарата, вид вентиляционных отверстий). Поскольку РЭА конструируется из элементов с различной мощностью тепловыделения и различной зависимостью надежности элементов от изменения температуры окружающей среды, то, очевидно, существует оптимальное размещение элементов в аппарате с точки зрения надежности.

Пусть заданы конкретные радиоэлементы и метод охлаждения (естественная вентиляция). Необходимо найти требуемое расположение элементов для обеспечения максимальной надежности (минимальной интенсивности отказов РЭА).

Оптимальным размещением элементов будем называть такое, при котором общая надежность РЭА имеет максимальное значение.

Таким образом, необходимо исследовать влияние теплофизических и конструктивных факторов на аэродинамический режим естественно вентилируемого РЭА и на основе анализа результатов исследований дать рекомендации по оптимальному размещению элементов в аппарате [69].

Естественная вентиляция РЭА осуществляется за счет разности плотностей холодного снаружи и нагретого внутри аппарата воздуха при условии, что в его корпусе имеются специальные вентиляционные отверстия. Выделяющаяся в аппарате тепловая энергия конвекцией передается протекающему через него воздуху и уносится из аппарата. Часть тепловой энергии рассеивается в окружающую среду внешней поверхностью корпуса путем излучения и конвекции.

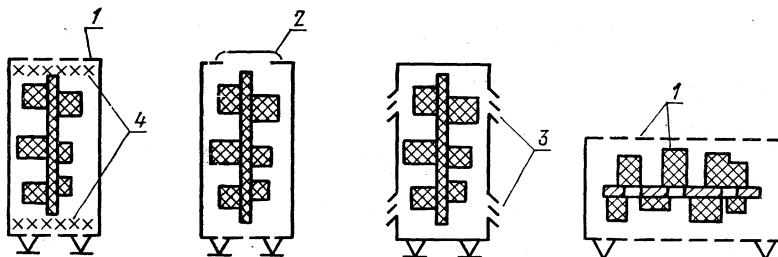


Рис. 4.36. Вентиляционные отверстия в корпусах естественно вентилируемых РЭА:
1 — перфорации; 2 — грибок; 3 — жалюзи; 4 — сетки.

Чаще всего корпуса естественно вентилируемых РЭА имеют форму параллелепипедов. Вентиляционные отверстия обычно выполняются в виде перфораций, решеток, жалюзи. Отверстия в крышке аппарата могут быть прикрыты вентиляционными грибками. Вентиляционные отверстия часто закрывают защитными сетками, которые одновременно служат электромагнитными экранами, иногда вместо сеток устанавливают пылезащитные фильтры. Примеры выполнения вентиляционных отверстий показаны на рис. 4.36.

Для исследования влияния теплофизических и конструктивных факторов на аэродинамический режим естественно вентилируемого РЭА с вертикально расположенным шасси (платами) принята аэродинамическая модель аппарата, представляющая собой вертикально ориентированный воздухопроводящий параллелепипед, через который в стационарном режиме проходит одномерный поток воздуха (рис. 4.37). Дно и крышка модели перфорированы. На одной из вертикальных стенок расположены источники тепла P_i , установленные друг над другом на одинаковом расстоянии. Такое конструктивное исполнение модели наиболее характерно для большинства реальных конструкций РЭА с естественной вентиляцией.

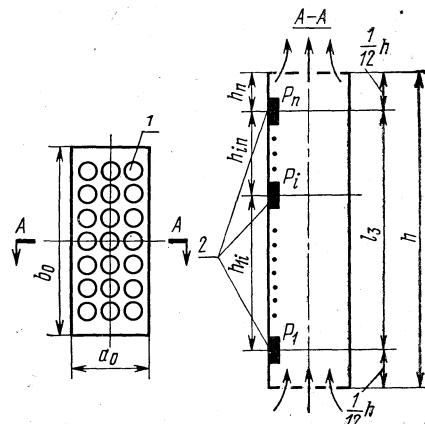


Рис. 4.37. Аэродинамическая модель естественно вентилируемого РЭА:
1 — перфорации; 2 — источники тепла.

При анализе условий воздухообмена в модели приняты следующие допущения:

1. Все рассеиваемое источниками тепло передается конвекцией воздуху в модели. Поэтому температура воздуха в сечении i -го источника равна

$$T_i = T_0 + \frac{\sum_{j=1}^i P_j}{G_p c_p}, \quad (4.183)$$

где T_0 — температура окружающей среды; $\sum_{j=1}^i P_j$ — суммарное количество тепла, рассеянное в расчетном сечении; G_p — массовый расход воздуха через модель; c_p — удельная теплоемкость воздуха.

2. Перепад давлений, обусловленный самотягой (самотяга вызвана разностью плотностей воздуха в модели и вне ее), мал по сравнению с атмосферным давлением, т. е. приближенно выполняется соотношение

$$\rho_0 T_0 = \rho_i T_i = \rho_{\text{вх}} T_{\text{вх}} = \rho_{\text{вых}} T_{\text{вых}} = \rho_3 T_3, \quad (4.184)$$

где ρ_0 , ρ_i , $\rho_{\text{вх}}$, $\rho_{\text{вых}}$, ρ_3 — плотности воздуха соответственно вне аппарата, в сечении i -го источника, во входном и выходном сечениях модели и средняя плотность воздуха на рабочем участке (зона с источниками тепла); T_i , $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вых}}$, T_3 — температура воздуха соответственно в расчетных сечениях i -го источника, входа и выхода модели и средняя температура на рабочем участке:

$$T_3 = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}. \quad (4.185)$$

3. Влияние тепловых мостов между источниками тепла незначительно.

4. Течение воздуха в модели ламинарное (отдельные источники, придающие некоторую «шероховатость» стенкам канала, не искажают ламинарного характера потока).

5. Фактические площади поперечных сечений струй, проходящих через отверстия для подвода и отвода потока, мало отличаются от площадей соответствующих отверстий на входе и выходе модели.

6. Площади отверстий на входе и выходе модели одинаковы.

Степень перфорации входа и выхода модели количественно характеризуется коэффициентом перфорации $K_{\text{п}}$, в данном случае равным

$$K_{\text{п}} = F_{\text{вх}}/F_{\text{вк}} = F_{\text{вых}}/F_{\text{вк}}, \quad (4.186)$$

где $F_{\text{вх}}$, $F_{\text{вых}}$ — площади поперечных сечений входного и выходного участков модели, равные сумме площадей отверстий входа и выхода модели; $F_{\text{вк}}$ — площадь поперечного сечения модели, равная произведению ширины канала на его глубину, $F_{\text{вк}} = a_0 b_0$.

В установившемся режиме перепад давлений, обусловленный самотягой, уравновешивается аэродинамическим сопротивлением канала, а именно

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^N \Delta H_i, \quad (4.187)$$

где ΔH_c — разность давлений, обусловленная самотягой, ΔH_i — аэродинамическое сопротивление i -го участка канала; N — количество участков канала, аэродинамическое сопротивление которых необходимо учесть при расчете.

Разность давлений ΔH_c , вызванная самотягой, определяется по формуле

$$\Delta H_c = gh_{12}(\rho_0 - \rho_1) + \dots + gh_{i, i+1}(\rho_0 - \rho_i) + \dots + gh_n(\rho_0 - \rho_n), \quad (4.188)$$

где ρ_0 — плотность холодного воздуха (окружающей среды); ρ_i — плотность горячего воздуха в расчетном сечении i -го источника; $h_{12}, h_{i, i+1}, h_n$ — перепады высот (расстояния) между расчетными сечениями соответственно 1- и 2-го, i - и $(i+1)$ -го источников и n -го источника в выходном сечении канала; g — ускорение силы тяжести.

Аэродинамическое сопротивление модели $\sum_{i=1}^N \Delta H_i$ обусловлено местными потерями на входе ($\Delta H_{вх}$) в модель и выходе ($\Delta H_{вых}$) из нее, сопротивлением рабочего участка (ΔH_3), а также ускорением потока воздуха ($\Delta H_{кин}$) вследствие его нагревания:

$$\sum_{i=1}^N \Delta H_i = \Delta H_{вх} + \Delta H_{вых} + \Delta H_3 + \Delta H_{кин}. \quad (4.189)$$

Можно показать, что сопротивление из-за подогрева воздуха ($\Delta H_{кин}$) (сопротивление неизотермичности) составляет не более 1% от общего сопротивления РЭА при естественной вентиляции. Поэтому этим сопротивлением можно пренебречь и уравнение (4.189) примет вид

$$\sum_{i=1}^N \Delta H_i = \Delta H_{вх} + \Delta H_3 + \Delta H_{вых}. \quad (4.190)$$

Величины слагаемых в правой части уравнения (4.190) определяются по формулам

$$\Delta H_{вх} = \xi_{вх} \frac{\rho_{вх} v_{вх}^2}{2}, \quad \Delta H_{вых} = \xi_{вых} \frac{\rho_{вых} v_{вых}^2}{2}, \quad \Delta H_3 = \xi_3 \frac{\rho_3 v_3^2}{2}, \quad (4.191)$$

где $v_{вх}, v_{вых}, v_3$ — средние скорости воздуха соответственно на входе, выходе и внутри канала; $\xi_{вх}, \xi_{вых}, \xi_3$ — коэффициенты аэродинамических сопротивлений соответственно входного, выходного и рабочего участков модели (определяются по графикам, таблицам и формулам [70]).

Для расчета коэффициента ξ_3 можно использовать методику, предложенную в [70] для расчета сопротивления пластинчатых электрофильтров, а именно:

$$\xi_3 = \xi_{3 вх} + \xi_{3 тр} + \xi_{3 вых}, \quad (4.192)$$

где $\xi_{3 вх}, \xi_{3 тр}, \xi_{3 вых}$ — коэффициенты аэродинамических сопротивлений соответственно входа в рабочий участок, трения по длине рабочего участка и выхода из него.

Потери давления на преодоление сил трения в каналах на участке безотрывного движения в общем случае рассчитываются с учетом поправки на гидродинамический начальный участок. При отсутствии успокоительного участка и равномерном распределении скоростей на входе

поправка ξ равна 0,63 (для плоского канала). С учетом поправки ξ формула (4.192) принимает вид

$$\xi_3 = \xi_{3 \text{ вх}} + (\xi_{3 \text{ тр}} + \xi) + \xi_{\text{вых}}. \quad (4.193)$$

Подставив (4.188) и (4.191) в уравнение (4.187), получим

$$gh_{12}(\rho_0 - \rho_1) + \dots + gh_{i, i+1}(\rho_0 - \rho_i) + \dots + gh_n(\rho_0 - \rho_n) = \xi_{\text{вх}} \frac{\rho_{\text{вх}} \theta_{\text{вх}}^2}{2} + \\ + \xi_3 \frac{\rho_3 v_{\text{вх}}^2}{2} + \xi_{\text{вых}} \frac{\rho_{\text{вых}} v_{\text{вых}}^2}{2}. \quad (4.194)$$

Используя уравнение неразрывности и принятые выше допущения, имеем

$$v_{\text{вх}} = \frac{G_0}{\rho_{\text{вх}} F_{\text{вх}}}, \quad v = \frac{G_p}{\rho_3 F_3}, \quad v_{\text{вых}} = \frac{G_p}{\rho_{\text{вых}} F_{\text{вых}}}; \quad (4.195)$$

$$F_3 = F_k = a_0 b_0, \quad F_{\text{вх}} = F_{\text{вых}} = K_n F_k = K_n a_0 b_0; \quad (4.196)$$

$$\rho_{\text{вх}} = \rho_0, \quad \rho_{\text{вых}} = \rho_n = \rho_0 T_0 / T_n, \quad \rho_3 = \rho_0 T_0 n / \sum_{i=1}^n T_i.$$

Преобразовав (4.194) на основании соотношений (4.184), (4.195) и (4.196), получаем

$$2\rho^2_0 g \left[h_{12} \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) + \dots + h_{i, i+1} \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) + \dots + h_n \left(1 - \frac{T_0}{T_n} \right) \right] = \\ = G_p^2 \left(\frac{\xi_{\text{вх}}}{K_n^2 a_0^2 b_0^2} + \frac{T_3 \xi_3}{T_0 a_0^2 b_0^2} + \frac{T_n \xi_{\text{вых}}}{T_0 K_n^2 a_0^2 b_0^2} \right). \quad (4.197)$$

Подставив в (4.197) значения величин, входящих в (4.183), (4.185) и (4.196), коэффициент ξ_3 с учетом поправок ξ и K_1 из [70], учитывающий изменение формы канала при изменении отношения a_0/b_0 , получим уравнение воздухообмена для расчета массового расхода воздуха в модели с n источниками

$$2\rho_0^2 g \left(\frac{h_{12} P_1}{P_1 + G_p c_p T_0} + \dots + \frac{h_{i, i+1} \sum_{j=1}^i P_j}{\sum_{j=1}^i P_j + G_p c_p T_0} + \dots + \frac{h_n \sum_{j=1}^n P_j}{\sum_{j=1}^n P_j + G_p c_p T_0} \right) = \\ = G_p^2 \left\{ \frac{\xi_{\text{вх}}}{K_n^2 a_0^2 b_0^2} + \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i P_j}{G_p c_p T_0 n} \right) \left[\frac{64 K_1 \nu l_3 \rho_0}{a_0 b_0 \left(1 + \frac{\sum P_j}{G_p c_p T_0 n} \right) \left(\frac{2 a_0 b_0}{a_0 + b_0} \right)^2 G_p} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{0,63}{a_0^2 b_0^2} \right] + \left(1 + \frac{\sum_{j=1}^n P_j}{G_p c_p T_0} \right) \frac{\xi_{\text{вых}}}{K_n^2 a_0^2 b_0^2} \right\}. \quad (4.198)$$

При выводе (4.198) использован предложенный в [8] подход к расчету теплового режима перфорированного блока РЭА с горизонтально расположенным шасси.

Для количественной оценки неравномерности тепловыделения введем коэффициент неравномерности тепловыделения ε :

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{P_i}{P_{cp}}\right)^2}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{nP_i}{P_{\Sigma}}\right)^2}{n(n-1)}, \quad (4.199)$$

где P_i — мощность тепловыделения i -го источника ($i = 1, 2, \dots, n$); $P_{cp} = P_{\Sigma}/n$ — средняя мощность тепловыделения, приходящаяся на один источник; P_{Σ} — суммарная мощность тепловыделения n источников, равная $\sum_{i=1}^n P_i$.

Коэффициент неравномерности тепловыделения ε может меняться от 0 до 1. Случай $\varepsilon=0$ соответствует равномерному тепловыделению всех n источников ($P_1=P_2=\dots=P_i=\dots=P_n$), а $\varepsilon=1$ — максимальной неравномерности тепловыделения, когда нагружен всего один источник тепла, а остальные $n-1$ источников пассивны ($P_1 \neq 0, P_2=P_3=\dots=P_i=\dots=P_n=0$).

Для исследования вопроса о влиянии размещения источников тепла на воздухообмен в естественно вентилируемом радиоэлектронном аппарате рассматривалась модель с двумя источниками тепла, один из которых располагался в верхней части канала, а другой — в нижней. Меняя в каждом конкретном случае местами источники тепла, получаем весь диапазон возможных изменений массового расхода воздуха.

Для двух источников выражение (4.199) принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\left(1 - \frac{2P_1}{P_{\Sigma}}\right)^2 + \left(1 - \frac{2P_2}{P_{\Sigma}}\right)^2}{2}. \quad (4.200)$$

Из (4.200) следует, что

$$P_1 = \frac{P_{\Sigma}}{2} (1 - \sqrt{\varepsilon}), \quad P_2 = \frac{P_{\Sigma}}{2} (1 + \sqrt{\varepsilon}). \quad (4.201)$$

Таким образом, возможны следующие предельные случаи тепловыделения источников:

1. $P_1 = P_{\Sigma}/2 (1 - \sqrt{\varepsilon}), P_2 = P_{\Sigma}/2 (1 + \sqrt{\varepsilon})$ — неравномерное тепловыделение по высоте модели (большая часть суммарной мощности выделяется в верхней части канала);

2. $P_1 = P_{\Sigma}/2 (1 + \sqrt{\varepsilon}), P_2 = P_{\Sigma}/2 (1 - \sqrt{\varepsilon})$ — неравномерное тепловыделение по высоте модели (большая часть суммарной мощности выделяется в нижней части канала).

Уравнение (4.198) для двух источников имеет вид

$$\begin{aligned} 2\rho^2 g \left[\frac{h_{12}P_1}{P_1 + G_p c_p T_0} + \frac{h_2 (P_1 + P_2)}{(P_1 + P_2) + G_p c_p T_0} \right] &= G_p \left\{ \frac{\xi_{bx}}{K_n^2 a^2 b^2} + \right. \\ &+ \left(1 + \frac{2P_1 + P_2}{2G_p c_p T_0} \right) \left[\frac{64K_1 \nu l_{300}}{a_0 b_0 \left(1 + \frac{2P_1 + P_2}{2G_p c_p T_0} \right) \left(\frac{2a_0 b_0}{a_0 + b_0} \right)^2 G_p} + \frac{0,63}{a^2 b^2} \right] + \\ &+ \left. \left(1 + \frac{P_1 + P_2}{G_p c_p T_0} \right) \frac{\xi_{bx}}{K_n^2 a^2 b^2} \right\}. \end{aligned} \quad (4.202)$$

Приняв величины $h_{12}=l_3=5/6h$ и $h_2=1/12h$, что является характерным для большинства конструкций естественно вентилируемых РЭА, получим уравнение для расчета массового расхода воздуха в модели с двумя источниками

$$\frac{5\rho_0ghP_1}{3(P_1+G_p c_p T_0)} + \frac{\rho^2_0gh(P_1+P_2)}{G[(P_1+P_2)+G_p c_p T_0]} = G_p \left\{ \frac{\xi_{\text{вх}}}{K_{\text{п}}^2 a^2_0 b^2_0} + \right. \\ \left. + \left(1 + \frac{2P_1+P_2}{2G_p c_p T_0}\right) \left[\frac{64K_1 \nu l_3 \rho_0}{a_0 b_0 \left(1 + \frac{2P_1+P_2}{2G_p c_p T_0}\right) \left(\frac{2a_0 b_0}{a_0 + b_0}\right)^2 G_p} + \frac{0,63}{a^2_0 b^2_0} \right] + \right. \\ \left. + \left(1 + \frac{P_1+P_2}{G_p c_p T_0}\right) \frac{\xi_{\text{вых}}}{K_{\text{п}}^2 a^2_0 b^2_0} \right\}. \quad (4.203)$$

Расчет массового расхода воздуха G_p для модели с двумя источниками проводился по уравнению (4.203) с помощью ЭВМ. Постоянные в исходном уравнении имели следующие значения: $T_0=293$ К, $\rho_0=1,2$ кг/м³, $\nu=15 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $c_p=10^3$ Дж/кг·К, $g=9,8$ м/с². Кроме того, постоянной принималась глубина канала $b_0=0,5$ м. Ширина канала a_0 изменялась от 0,002 до 0,1 м, высота h — от 0,2 до 1,2 м. Суммарная мощность тепловыделения источников в модели P_{Σ} изменялась от 1 до 200 Вт. Коэффициенты перфорации дна и крышки модели $K_{\text{п}}=0,1-0,3$, так как увеличение коэффициента перфорации свыше 0,3 неэффективно.

Коэффициенты аэродинамических сопротивлений входа, выхода и рабочего участка канала определялись по справочным данным [68]. Коэффициент неравномерности тепловыделения источников тепла, расположенных на стенке канала, принимался в диапазоне $\varepsilon=0-0,2$, так как расчеты, проведенные для большого числа реальных конструкций естественно вентилируемых РЭА по формуле (4.200), показали, что коэффициент неравномерности тепловыделения источников в каналах, образованных вертикально расположенными платами, не превышает $\varepsilon=0,1$. Значения мощностей тепловыделения источников тепла P_1 и P_2 , соответствующие заданным коэффициентам неравномерности тепловыделения, определялись по (4.201).

Проведенные расчеты позволили исследовать влияние теплофизических и конструктивных факторов на аэродинамический режим модели естественно вентилируемого РЭА.

Данные расчетов представлены в виде следующих зависимостей:

1. Относительное изменение расхода воздуха ΔG_p при перестановке источников с изменением ширины канала a_0 для различных коэффициентов неравномерности тепловыделения ε в канале и коэффициентов перфорации $K_{\text{п}}$ дна и крышки модели (остальные параметры фиксированы), а именно: $\Delta G_p=f(a_0)$. Причем $\Delta G_p=(G''_p - G'_p)/G''_p$, где G'_p — массовый расход воздуха, соответствующий такому расположению источников на стенке канала, при котором большая часть суммарной мощности выделяется в верхней части модели, т. е. $P_1 < P_2$; G''_p — массовый расход воздуха, соответствующий такому расположению источников на стенке канала, при котором большая часть суммарной мощности выделяется в нижней части модели, т. е. $P_1 > P_2$. График зависимости $\Delta G_p=f(a_0)$ при $h=0,8$ м и $P_{\Sigma}=100$ Вт для различных значений

коэффициента неравномерности и коэффициента перфорации приведен на рис. 4.38.

2. Относительное изменение расхода воздуха ΔG_p при перестановке источников с изменением коэффициентов перфорации K_p дна и крышки модели для различных коэффициентов неравномерности тепловыделения ε и различной ширины канала a_0 , а именно: $\Delta G_p = f(K_p)$.

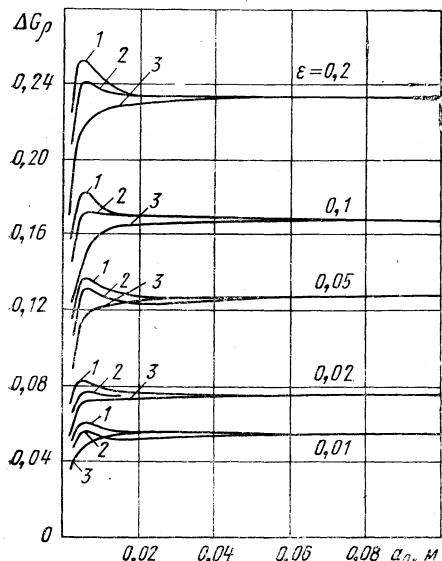


Рис. 4.38. Зависимость ΔG_p при перестановке источников тепла от a_0 при $h = 0,8$ м и $P_\Sigma = 100$ Вт для различных значений ε и K_p :

1 — $K_p = 0,3$; 2 — $K_p = 0,2$; 3 — $K_p = 0,1$.

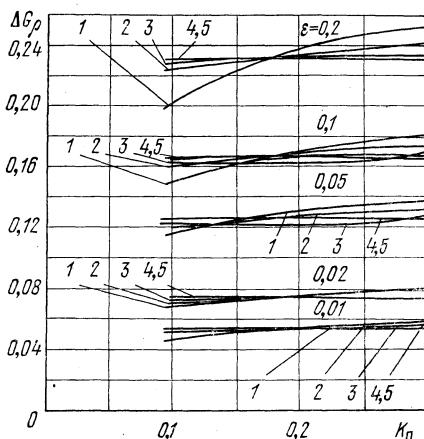


Рис. 4.39. Зависимость ΔG_p при перестановке источников тепла от h при $K_p = 0,2$ и $P_\Sigma = 100$ Вт для различных значений ε и a_0 :

1 — $a_0 = 0,005$ м; 2 — $a_0 = 0,01$ м; 3 — $a_0 = 0,02$ м; 4 — $a_0 = 0,05$ м; 5 — $a_0 = 0,1$ м.

График зависимости $\Delta G_p = f(K_p)$ при высоте модели $h = 0,8$ м и суммарной мощности тепловыделения $P_\Sigma = 100$ Вт приведен на рис. 4.39.

3. Относительное изменение расхода воздуха ΔG_p при перестановке источников с изменением высоты модели h для различных коэффициентов неравномерности тепловыделения ε и различной ширины канала a_0 , а именно: $\Delta G_p = f(h)$.

График зависимости $\Delta G_p = f(h)$ при коэффициенте перфорации $K_p = 0,2$ и суммарной мощности тепловыделения $P_\Sigma = 100$ Вт приведен на рис. 4.40.

4. Относительное изменение расхода воздуха ΔG_p при перестановке источников с изменением коэффициента неравномерности тепловыделения ε для различной ширины канала a_0 и различных коэффициентов перфорации K_p , а именно: $\Delta G_p = f(\varepsilon)$.

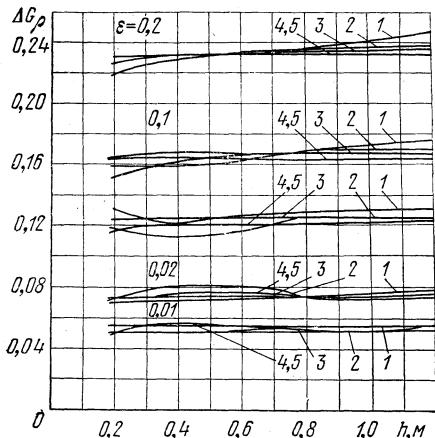


Рис. 4.40. Зависимость ΔG_p при перестановке источников тепла от K_n при $h = 0,8$ м и $P_\Sigma = 100$ Вт для различных значений ε и a_0 :
 $- a_0 = 0,005$ м; 2 — $a_0 = 0,01$ м; 3 — $a_0 = 0,02$ м;
4 — $a_0 = 0,05$ м; 5 — $a_0 = 0,1$ м.

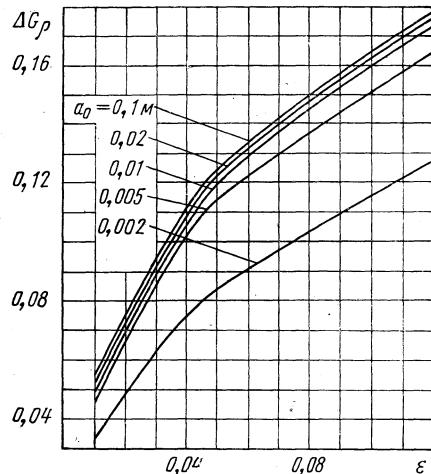


Рис. 4.41. Зависимость ΔG_p при перестановке источников тепла от ε при $K_n = 0,1$, $h = 0,8$ м и $P_\Sigma = 100$ Вт для различных значений a_0 .

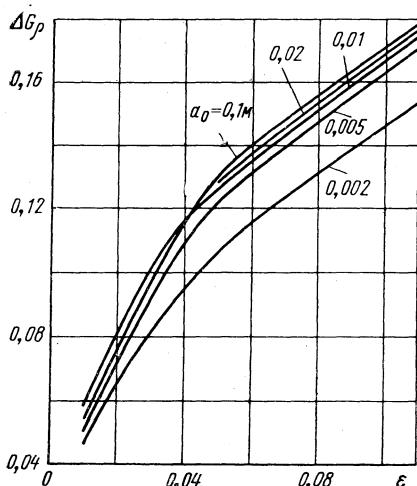


Рис. 4.42. Зависимость ΔG_p при перестановке источников тепла от ε при $K_n = 0,2$, $h = 0,8$ м и $P_\Sigma = 100$ Вт для различных значений a_0 .

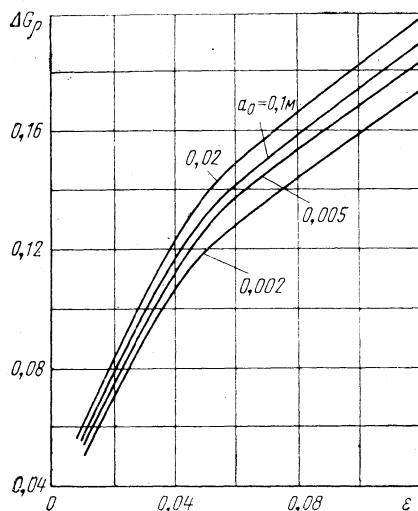


Рис. 4.43. Зависимость ΔG_p при перестановке источников тепла от ε при $K_n = 0,3$, $h = 0,8$ м и $P_\Sigma = 100$ Вт для различных значений a_0 .

Графики зависимостей $\Delta G_p = f(\varepsilon)$ при высоте $h = 0,8$ м и суммарной мощности тепловыделения $P_\Sigma = 100$ Вт для различных коэффициентов перфорации K_π приведены на рис. 4.41, 4.42, 4.43.

5. Изменение расхода воздуха G_p при равномерном тепловыделении источников с изменением температуры окружающей среды T_0 для различной ширины канала a_0 , а именно: $G_p = f(T_0)$.

График зависимости $G_p = f(T_0)$ при $K_\pi = 0,2$, $h = 0,8$ м, $P_1 = P_2$ и $P_\Sigma = 100$ Вт приведены на рис. 4.44.

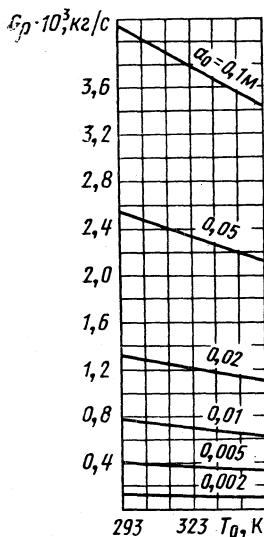


Рис. 4.44. Зависимость G_p при равномерном тепловыделении источников тепла ($P_1 = P_2 = 50$ Вт) от T_0 при $K_\pi = 0,2$ и $h = 0,8$ м для различных значений a_0 .

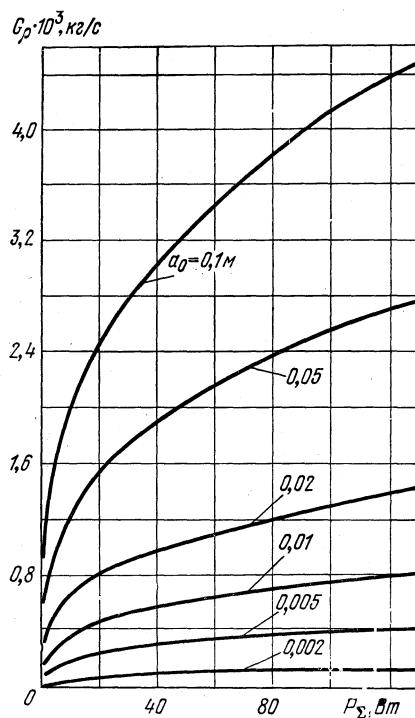


Рис. 4.45. Зависимость G_p при равномерном тепловыделении источников тепла ($P_1 = P_2$) от P_Σ при $K_\pi = 0,2$ и $h = 0,8$ м для различных значений a_0 .

6. Изменение расхода воздуха G_p при равномерном тепловыделении источников с изменением суммарной мощности тепловыделения источников P_Σ для различной ширины канала a_0 , а именно: $G_p = f(P_\Sigma)$.

График зависимости $G_p = f(P_\Sigma)$ при $K_\pi = 0,2$, $h = 0,8$ м и $P_1 = P_2$ приведен на рис. 4.45.

Указанные зависимости дали возможность провести анализ влияния теплофизических и конструктивных факторов на аэродинамический режим модели. Из анализа можно сделать следующие выводы:

1. При перестановке источников тепла для фиксированных значений коэффициентов неравномерности тепловыделения относительное изменение

ние массового расхода воздуха при ширине канала $a_0 \geq 0,01$ м незначительно и не зависит от ширины канала, коэффициента перфорации и высоты модели, т. е. массовый расход воздуха остается практически неизменным.

2. Для фиксированных габаритов и суммарной мощности тепловыделения при коэффициентах неравномерности тепловыделения по высоте канала $\epsilon \leq 0,1$ (эти значения соответствуют чаще всего встречающимся в реальных аппаратах) массовый расход воздуха незначительно зависит от расположения источников тепла и также остается практически неизменным.

Следовательно, для оптимального размещения элементов в естественно вентилируемых радиоэлектронных аппаратах с точки зрения обеспечения максимальной надежности справедливы принципы оптимального размещения, разработанные в § 4.5 для принудительно вентилируемых РЭА.

4.7. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЭА

После того как радиоэлектронный аппарат сконструирован, всегда возникает вопрос о соответствии его теплового режима допустимому. Это соответствие устанавливается расчетом или экспериментально. Тепловой режим РЭА считается допустимым (нормальным), если температуры в критических зонах элементов РЭА меньше допустимых значений в ТЗ и ТУ. На практике точные значения температур критических зон установить не представляется возможным по целому ряду причин. Мы уже затрагивали эти вопросы в § 1.5. Остановимся на них более подробно.

Критические зоны элементов обычно недоступны для измерения, поэтому в ТУ, как правило, приводятся значения допустимых температур корпуса или окружающей элемент среды. Таким образом, определенные нами экспериментально или в результате поверочного расчета температуры лишь косвенно свидетельствуют о температуре критической зоны. Последние могут быть определены только приближенно, так как тепловое сопротивление между корпусом и критической зоной элемента имеет определенный разброс по технологическим причинам при массовом производстве элементов.

При определении температур элементов мы пользуемся методикой расчета или экспериментальной установкой, имеющими определенную точность, что вносит дополнительную погрешность при определении температур элементов.

При расчете или измерении температуры элементов, как правило, невозможно выполнить расчет, а тем более измерить температуры всех элементов РЭА. Тот факт, что мы судим о соответствии температур всех элементов заданным значениям в ТУ по результатам расчета или измерения небольшого количества элементов, вносит еще одну погрешность при определении температур элементов.

Наличие трех видов погрешностей как при расчетной, так и экспериментальной проверке теплового режима РЭА, позволяет определить соответствие теплового режима РЭА заданному в ТУ только в вероятностном смысле. Методы оценки теплового режима спроектированного РЭА обсудим в этом параграфе.

На стадии технического проектирования соответствие теплового режима блока нормальному может устанавливаться по соответствию рас-

четных значений температур корпуса элемента (либо окружающей элемент среды) заданным в ТУ и ТЗ значениям.

Выбор элементов, температура поверхности (окружающей среды) которых подлежит расчету на стадии технического проектирования, может производиться при помощи методики, изложенной в § 4.4, а расчет температуры этих элементов — по одной из методик, приведенных в § 4.2 и 4.3. Задача оценки теплового режима РЭА в этом случае формулируется следующим образом; по результатам расчета температур нескольких элементов РЭА определить, является ли тепловой режим РЭА в целом допустимым. Ясно, что если расчетное значение температуры хотя бы одного из выбранных элементов больше заданного, т. е.

$$T_{\text{эл } k}^{(p)} > T_{\text{эл } k}^{(3)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, (n-m), \quad (4.204)$$

где $T_{\text{эл } k}^{(p)}$, $T_{\text{эл } k}^{(3)}$ — расчетные и заданные в ТУ значения температуры k -го элемента; $(n-m)$ — число элементов, для которых определено расчетное значение температуры, то тепловой режим РЭА будет считаться неудовлетворительным. Если же для всех $(n-m)$ элементов расчетные значения температуры меньше заданных (допустимых), т. е.

$$T_{\text{эл } k}^{(p)} \leq T_{\text{эл } k}^{(3)} \quad (4.205)$$

то это еще не говорит о том, что остальные элементы в допуске. Следовательно, необходимо выработать критерий для правильности оценки. Поскольку оценка теплового режима носит вероятностный характер, для получения критерия воспользуемся следующими рассуждениями. Если в блоке РЭА, тепловой режим которого по результатам поверочного расчета признан нормальным, впоследствии при испытании опытного образца обнаружится один или два элемента с недопустимым тепловым режимом, то небольшими переделками (изменением места установки элемента, заменой теплоотвода и т. д.) обычно удается снизить температуру этих элементов. Если обнаружится три и более элемента с недопустимым тепловым режимом, то, как показывает многолетняя практика, это свидетельствует о ненормальном тепловом режиме отдельных узлов блока, и могут потребоваться значительные конструктивные доработки. Поэтому целесообразно в качестве критерия правильности оценки теплового режима РЭА выбрать достаточно низкую вероятность наличия трех элементов с недопустимым тепловым режимом (пусть она будет равна 0,05). Если для элементов, у которых определены температуры, вычислить разность

$$\vartheta_{\text{эл } k} = T_{\text{эл } k}^{(3)} - T_{\text{эл } k}^{(p)} \quad (4.206)$$

и составить упорядоченную последовательность

$$\vartheta_1 \leq \vartheta_2 \leq \vartheta_3 \leq \dots \leq \vartheta_{(n-m)}, \quad (4.207)$$

то наибольшую вероятность того, что при проверке будет обнаружен недопустимый перегрев элементов, имеют элементы с меньшим номером в последовательности.

Возможность обнаружения при проверке элементов с недопустимым тепловым режимом, в то время как по результатам расчета тепловой режим РЭА признан нормальным, обусловлена ошибкой расчета, которая имеет нормальное распределение с плотностью (4.117). Поэтому сформулированный выше критерий оценки правильности определения

теплового режима РЭА как вероятность наличия трех элементов с недопустимым тепловым режимом запишется в следующем виде:

$$P(T_{\text{эл1}}^{(3)} < T_{\text{эл1}}^{(d)}; T_{\text{эл2}}^{(3)} < T_{\text{эл2}}^{(d)}; T_{\text{эл3}}^{(3)} < T_{\text{эл3}}^{(d)}) = \\ = \left[1 - \Phi\left(\frac{\vartheta_1}{\sigma_e}\right) \right] \left[1 - \Phi\left(\frac{\vartheta_2}{\sigma_e}\right) \right] \left[1 - \Phi\left(\frac{\vartheta_3}{\sigma_e}\right) \right] < 0,05, \quad (4.208)$$

где

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt; \quad (4.209)$$

σ_e — среднеквадратичное отклонение ошибки расчета; (д) — индекс измеренных (действительных) температур.

Значения функции (4.209) при использовании методик расчета, изложенных в § 4.2 и 4.3 для $0 \leq \vartheta \leq 30$, приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Значения функции $\Phi(x)$ для $0 \leq \vartheta \leq 30$

ϑ	$\Phi(\vartheta/\sigma_e)$										
0	0,5	5	0,691	10	0,841	15	0,933	20	0,977	25	0,994
1	0,539	6	0,726	11	0,864	16	0,945	21	0,982	26	0,995
2	0,579	7	0,758	12	0,885	17	0,955	22	0,986	27	0,996
3	0,618	8	0,788	13	0,903	18	0,964	23	0,989	28	0,997
4	0,655	9	0,816	14	0,919	19	0,971	24	0,991	29	0,998
										30	0,999

Таким образом, оценить правильность определения теплового режима РЭА по результатам расчета можно следующим образом.

1. Для элементов, у которых расчетным путем определена температура поверхности (окружающей их среды), находятся разности (4.206).

2. Если хотя бы у одного элемента $\vartheta_k < 0$, то тепловой режим аппарата является неудовлетворительным и следует принять конструктивные меры для обеспечения нормального теплового режима (перестановка элементов, применение более термостойких элементов, применение другой системы охлаждения и т. п.).

3. Если для всех элементов справедливо неравенство

$$\vartheta_k \geq 0, \quad k=1, 2, \dots, (n-m),$$

то составляется упорядоченная последовательность (4.207).

4. Определяется по (4.208) вероятность одновременного выхода из строя первых трех элементов в упорядоченной последовательности.

5. Если вероятность, вычисленная в п. 4, меньше 0,05, то по результатам расчета делается заключение о соответствии теплового режима блока нормальному. Если вероятность, вычисленная в п. 4, больше или равна 0,05, то для решения вопроса о соответствии теплового режима блока нормальному необходима экспериментальная проверка.

Испытания радиоэлектронного аппарата осуществляются в процессе опытной эксплуатации или в специальных камерах при условиях, соответствующих наиболее напряженным по ТУ. Так как измерение темпе-

ратур всех элементов РЭА практически невозможно, то подлежащие измерению элементы выбираются на основании расчета и опыта исследования тепловых режимов подобных РЭА. Однако и после проведения испытаний нет достаточной уверенности, что температуры элементов, которые не измерялись в процессе испытаний, соответствуют ТУ.

Обычно при подготовке испытаний необходимо определить, какие элементы должны подвергаться измерению температур в первую очередь, какое количество элементов m должно быть подвергнуто измерениям в процессе испытаний ($m \leq n$), как по результатам измерения температур m элементов удостовериться, что действительные температуры остальных элементов меньше заданных в ТУ.

Математической моделью для решения этой задачи может служить широко известная в массовом производстве задача о приемке большой партии изделий по результатам измерения малой выборки из этой партии. Для нашего случая эта задача формулируется следующим образом. Имеется большая партия изделий (n элементов РЭА). Признаком качества изделия является его температура $T_{\text{эл } i}^{\text{д}}$. Изделие считается годным, если его признак качества меньше заданного в ТУ. Необходимо по результатам измерения признака качества малой выборки из m элементов ($m \ll n$) с некоторой наперед заданной вероятностью сделать заключение о пригодности всей партии (в нашем случае всех элементов РЭА).

При решении задачи приемочного контроля, как и всякой вероятностной задачи проверки гипотез, возможны два вида ошибок: ошибка первого вида есть вероятность того, что по результатам приемочного контроля будет забракован годный аппарат; ошибка второго вида есть вероятность того, что будет признан годным негодный аппарат.

Необходимо из практических соображений задаться двумя величинами: вероятностью p и уровнем значимости λ , которые характеризуют ошибки. Значение p выбирается из условия, что вероятность ошибки второго вида есть $1-p$, значение λ выбирается из условия, что вероятность ошибки первого вида есть λ . Необходимо, чтобы ошибки второго вида были маловероятны, так как признание годным фактически негодного РЭА может привести к серьезным последствиям в процессе эксплуатации. Будем пользоваться значением $p=0,99$, т. е. принятая нами процедура испытаний может допускать не более одного случая из 100, когда негодный РЭА будет признан годным. Ошибка первого вида в нашем случае может быть велика, так как РЭА, признанный негодным по результатам испытаний, не бракуется, а подвергается повторным испытаниям с увеличенным числом элементов, температура которых измениется. Уменьшение ошибки первого вида значительно усложняет процедуру испытаний, поэтому будем пользоваться уровнем значимости $\lambda=0,10$, т. е. принятая нами процедура испытаний допускает не более 10 случаев из 100, когда признанный негодным по результатам испытаний РЭА фактически является годным.

Опыт применения приведенных выше вероятностных оценок показывает, что с их помощью можно правильно выбрать процедуру испытаний РЭА.

При подготовке испытаний обычно располагают следующими исходными данными: заданными в ТУ значениями температур элементов РЭА — $T_{\text{эл } i}^{\text{з}}$, $i=1, 2, \dots, n$; расчетными значениями температур элементов РЭА — $T_{\text{эл } k}^{\text{р}}$, $k=1, 2, \dots, (n-m)$, выполненными по методике рас-

чета с известными значениями систематической и случайной ошибки:

$$m_{\varepsilon} = M(\varepsilon), \quad \sigma_{\varepsilon} = \sqrt{M(\varepsilon - m_{\varepsilon})^2}. \quad (4.210)$$

Если для каждого элемента РЭА определить разность (4.206) и составить упорядоченную последовательность (4.207), то при испытаниях необходимо измерять температуру элементов с номерами 1, 2, 3, ..., l ($l \ll n$) в упорядоченной последовательности. Количество элементов, подлежащих измерению при испытаниях, должно быть достаточным, чтобы по результатам измерения можно было с вероятностью $p=0,99$ и уровнем значимости $\lambda=0,10$ сделать заключение о соответствии теплового режима РЭА техническим условиям.

Ошибки расчета ε для данного РЭА распределены нормально со статистикой, отличной от (4.210). Если в процессе испытаний измерены температуры m элементов, можно оценить средние значения ошибок и их дисперсий по формулам

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_{\text{эл } i}^{(\text{д})} - T_{\text{эл } i}^{(\text{р})}), \quad (4.211)$$

$$S^2 \leq \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (T_{\text{эл } i}^{(\text{д})} - T_{\text{эл } i}^{(\text{р})} - \bar{\varepsilon})^2. \quad (4.212)$$

При выборе числа элементов, подлежащих измерению, мы еще не располагаем результатами измерений. Однако поскольку элементы исследуемых РЭА являются выборкой из совокупности всех типов, то в качестве этих оценок можно принять значения (4.210) как наиболее вероятные.

Оценка среднего значения распределена по закону Стьюдента, а оценка дисперсии — по закону хи-квадрат. Их совместное распределение позволяет найти распределение случайной величины ошибки по оценкам статистик. Это распределение не является центральным распределением Стьюдента. По нему можно определить односторонние толерантные (допустимые) пределы ошибки ε . Задача формулируется следующим образом. Необходимо определить температуру скольких элементов РЭА следует измерить ($m=?$) из упорядоченного ряда (4.207), чтобы для ($m+1$) элемента можно было с вероятностью $p=0,99$ и уровнем значимости $\lambda=0,10$ считать справедливым выражение

$$T_{m+1}^{(\text{з})} - T_{m+1}^{(\text{д})} > 0. \quad (4.213)$$

Это определение необходимо выполнить, пользуясь оценками статистик по m измерениям, соответствующим (4.210).

Если выражение (4.213) имеет место для ($m+1$) элемента, то подобное неравенство тем более справедливо для всех остальных элементов упорядоченного ряда $i=m+2, m+3, \dots, n$.

Далее для ($m+1$) элемента можно записать

$$p[(T_{m+1}^{(\text{з})} - T_{m+1}^{(\text{д})}) > 0] = p(\varepsilon < \theta_{m+1}) = 0,99. \quad (4.214)$$

Значения ошибок, для которых справедливо (4.214), определяются с помощью одностороннего толерантного предела по выражению

$$(\bar{\varepsilon} + KS) < \theta_{m+1}, \quad (4.215)$$

Таблица 4.11

Значения коэффициента K для нецентрального распределения Стьюдента при $p = 0,99$ и $\lambda = 0,10$

m	K	m	K	m	K	m	K	m	K	m	K	m	K
2	48,43	13	4,04	24	3,48	35	3,27	46	3,16	64	3,05	110	2,91
3	12,86	14	3,95	25	3,46	36	3,26	47	3,15	66	3,04	115	2,90
4	8,29	15	3,88	26	3,43	37	3,25	48	3,14	68	3,03	120	2,89
5	6,63	16	3,81	27	3,41	38	3,24	49	3,13	70	3,02	130	2,88
6	5,77	17	3,75	28	3,39	39	3,23	50	3,12	75	3,00	140	2,87
7	5,25	18	3,70	29	3,37	40	3,21	52	3,11	80	2,99	150	2,86
8	4,89	19	3,66	30	3,35	41	3,20	54	3,10	85	2,97	160	2,85
9	4,63	20	3,61	31	3,33	42	3,19	56	3,09	90	2,96	170	2,84
10	4,43	21	3,58	32	3,32	43	3,18	58	3,08	95	2,94	180	2,83
11	4,28	22	3,54	33	3,30	44	3,17	60	3,07	100	2,93	190	2,82
12	4,15	23	3,51	34	3,29	45	3,16	62	3,06	105	2,92	200	2,81

где ε и S — оценки статистик нормального распределения для ошибки расчета, которые при выборе числа элементов принимаются равными (4.210), $m = 1, 2, \dots, n$; K — коэффициент, определяемый по таблицам нецентрального распределения Стьюдента. (Значения коэффициента при $p = 0,99$ и $\lambda = 0,10$ для различного количества m элементов в соответствии с [12] приведены в табл. 4.11.)

Таким образом, выбор числа элементов, подлежащих измерению при испытаниях, следует производить так:

1. Элементы РЭА нумеруются в соответствии с упорядоченным рядом (4.207).

2. Для каждого элемента упорядоченного ряда (4.207), начиная со второго, проверяется выражение (4.215) до тех пор, пока для некоторого j -го элемента оно перестанет быть справедливым.

3. j -й элемент по определению есть $(m+1)$ -й, следовательно, элементы с номерами 1, 2, 3, ..., $(j-1)$, предшествовавшие j -му в упорядоченном ряде (4.207), подлежат измерению при испытаниях.

В процессе испытаний мы получаем результаты измерения температуры m элементов РЭА из упорядоченного ряда (4.207). Необходимо по результатам этих измерений сделать выводы о соответствии теплового режима РЭА техническим условиям. Если для одного из измеренных m элементов не соблюдается условие (4.205), то РЭА признается негодным. Если для всех m элементов соблюдается условие (4.205), то необходимо доказать, что для $(m+1)$ -го элемента при $p = 0,99$ и $\lambda = 0,10$ условие (4.205) также соблюдается и, следовательно, как мы уже доказали выше, для всех $(m-n)$ элементов это условие соблюдается. Для этой цели воспользуемся выражением (4.215) с учетом того, что теперь мы можем делать оценку среднего значения и дисперсии по результатам m измерений элементов в соответствии с (4.211) и (4.212).

Итак, обработку результатов измерения следует проводить в такой последовательности:

1. Результаты измерения температуры m элементов сравнить со значениями, заданными в ТУ, и если хотя бы для одного элемента измеренное значение больше заданного в ТУ, РЭА необходимо забраковать.

2. Если все m измеренных элементов соответствуют ТУ, то определить статистики для m элементов в соответствии с (4.211) и (4.212).

3. По табл. 4.11 найти значения K для m элементов и проверить условие (4.215) для $(m+1)$ -го элемента.

4. Если неравенство (4.115) для $(m+1)$ -го элемента соблюдается, то РЭА признается годной. В противном случае необходимо увеличить число измеряемых элементов и повторить испытания. Если имеется группа одинаковых элементов с одинаковой мощностью рассеивания, то измерению температуры подлежит только один элемент — любой при естественном воздушном охлаждении и последний по направлению потока воздуха при принудительном воздушном охлаждении.

Таблица 4.12

Результаты расчета числа элементов в блоке РЭА, для которых необходимо вычислить и измерить температуры

Наименование элементов	Количество штук	P , Вт	q , Вт/м ²	$T_{\text{эл}}^{\text{з}}$, К	$T_{\text{эл}}^{\text{р}}$, К	$\theta_{\text{эл}}$	Упорядоченная последовательность	Элементы, подлежащие измерению	$T_{\text{эл}}^{\text{д}}$, К	$\Delta\theta$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Трансформатор	1	0,2	30	358	354	4,0	1	1	355,5	1,5
Дроссель	1	2,0	250	358	353,5	4,5	2	2	354,0	0,5
	2	3,0	375	358	351	7,0	3	3	350	-0,4
Конденсатор	111	—	—	358	348	10	4	4	351	3,0
Предохранитель	5	0,15	45	373	361,5	11,5	5	5	363	1,5
Дроссель	3	0,32	90	393	378,0	15,0	6	6	380	2,0
	4	0,53	112	393	371	22,0	7	7	370	-1,0
	1	0,55	115	393	370	23,0	8	8	370	0,0
	2	0,49	100	393	372,5	20,5	9	9	371	-1,5
Диод	50	0,15	850	393	365	28,0	10	10	368	3,0
	2	0,10	278	393	354,4	37,6	14	14	355	0,6
Транзистор	2	0,01	21	393	349,4	43,6	21	—	—	—
	1	0,8	790	393	363	30,0	11	11	373	10,0
	1	0,5	197	393	350,2	42,8	19	—	—	—
	1	0,5	139	393	352	41,0	18	—	—	—
	1	4,0	1100	393	369,8	33,2	13	13	370	0,2
	2	0,8	220	393	353,4	39,6	15	—	—	—
	2	2,5	695	393	362	31,0	12	12	358	-4,0
	2	0,1	250	393	353	40,0	16	—	—	—
	1	0,02	42	393	349,8	43,2	20	—	—	—
	1	0,05	105	393	352,4	40,6	17	—	—	—

Пример. Для блока РЭА, исходные данные которого приведены в примере § 4.4, определить число элементов, для которых необходимо провести расчет и измерения температуры. Данные элементов приведены в табл. 4.12 (графы 1, 2, 3, 4 и 5).

1. Выбираем вероятность того, что температура среды у не подлежащего расчету элемента не превысит предельно допустимого значения $p=0,99$.

2. На рис. 4.22 по оси абсцисс откладываем значение среднего перегрева воздуха. Из полученной точки на оси абсцисс проводим прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривой, соответствующей выбранной в п. 1 вероятности. Из полученной точки на вероятностной кривой проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с осью ординат. Полученное значение $\theta_{\text{эл}}^{(d)}=70$ К характеризует допустимое значение перегрева окружающей элемент среды.

3. Выбираем элементы, для которых справедливо неравенство $\vartheta_{3,k}^{(3)} < 70$ К. Допустимая температура окружающей среды у элементов, подлежащих расчету, равна $T_{3,k}^{(3)} = -393$ К ($+120^{\circ}\text{C}$). В данном блоке предстоит рассчитать температуру окружающей среды у 21 группы элементов.

4. Температуры окружающей элементы среды находим по методике, изложенной в § 4.2. Эти значения температур приведены в графе 6 табл. 4.12.

5. Определяем разности $\vartheta_{\text{эл},k}$ для каждого из рассчитанных элементов (4.206). Они приведены в графе 7 табл. 4.12.

6. Составляем упорядоченную последовательность (4.207). Порядковые номера этой последовательности записаны в графе 8 табл. 4.12.

7. Определяем вероятность p выхода из строя первых трех в ряду последовательности элементов по (4.208) и табл. 4.10. Получаем $p=0,028 < 0,05$.

8. По результатам расчета делаем вывод о соответствии теплового режима блока нормальному и возможности изготовления опытного образца, исключая стадию макетирования.

9. На стадии испытания опытного образца выбираем вероятность $p=0,99$ и уровень значимости $\lambda=0,10$. Пусть

$$m_{\varepsilon} = 0, \sigma_{\varepsilon} = 10.$$

10. С помощью табл. 4.11 для различных значений K проверяем выражение (4.215). Выясним, что (4.215) справедливо до 15-го элемента упорядоченной последовательности. Измерению подлежат элементы упорядоченной последовательности с номерами 1, 2, 3, ..., 14. В графе 9 табл. 4.12 записаны порядковые номера упорядоченной последовательности элементов, подлежащих измерению, а в графе 10 — действительные значения измеренных на этих элементах температур.

11. Результаты измерения температуры элементов сравниваем со значениями, заданными в ТУ. Все температуры измеренных элементов соответствуют ТУ. В графе 11 табл. 4.10 приведены значения разностей расчетных и измеренных температур.

12. Оцениваем средние значения ошибки и дисперсии для 14 элементов по (4.211) и (4.212): $\bar{\varepsilon}=1,1$, $S=2,85$.

В табл. 4.11 находим значения K для 14 элементов, $K=3,95$. Проверяем неравенство (4.215) для элемента № 15: $(1,1+2,85 \times 3,95) < 39,6$. Следовательно, блок можно признать годным.

Пример. Выполнить те же расчеты, что и в предыдущем примере, для блока РЭА с естественным воздушным охлаждением и следующими исходными данными: рассеиваемая мощность $P=117$ Вт; горизонтальные размеры кожуха блока $L_1=0,27$ м, $L_2=0,45$ м; вертикальный размер блока $L_3=0,32$ м; коэффициент заполнения $K_3=0,3$; температура окружающей среды $T_c=313$ К; давление окружающей среды $H_1=0,1$ МПа. Параметры элементов блока приведены в табл. 4.13 (графы 1, 2, 3, 4 и 5). Средняя расчетная температура воздуха в блоке 345 К, перегрев 32 К.

1. Выбираем вероятность ($p=0,99$) того, что температура среды у любого не подлежащего расчету элемента не превысит предельно допустимого значения. На рис. 4.22 по оси абсцисс откладываем значение среднего перегрева воздуха. Из полученной точки на оси абсцисс проводим прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривой, соответствующей выбранной вероятности.

Из полученной точки на вероятностной кривой проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с осью ординат. Полученное значение $\vartheta_{\text{эл}}^{(\mu)} = 64,5$ К характеризует допустимый перегрев среды у элемента.

2. Выбираем элементы, для которых справедливо неравенство $\vartheta_{\text{эл}}^{(3)} < 64,5$ К. Допустимая температура окружающей среды у элементов, подлежащих расчету, $T_{\text{эл}}^{(3)} < 377,5$ К. В данном блоке подлежит расчету 21 группа элементов (табл. 4.13).

3. Температуру среды у элементов рассчитываем по методике, изложенной в § 4.2. Рассчитанные значения температур среды у элементов приведены в графе 6 табл. 4.13.

4. Для каждого из рассматриваемых элементов определяем разность между заданной в ТУ допустимой температурой и расчетной. Их значения приведены в графе 7 табл. 4.13.

5. Составляем упорядоченную последовательность (4.207). Порядковые номера последовательности записаны в графе 8 табл. 4.13.

Таблица 4-13

Результаты расчета числа элементов в блоке РЭА, для которых необходимо провести вычисление и измерение температуры

Наименование элементов	Коли- чество, шт.	P , Вт	q , Вт/м ²	$T_{\text{эл}}^{(3)}$, К	$T_{\text{эл}}^{(p)}$, К	$\delta_{\text{эл}}$	Упорядо- ченная по- следователь- ность	$T_{\text{эл}}^{(d)}$	$\Delta\delta$	
	1									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Резистор	1	0,05	40	333	332,5	0,5	1	329,5	-3	
Конденсатор	1	—	—	333	332,5	0,5	2	330	-2,5	
"	20	—	—	343	332,5	10,5	7	326,5	-6	
Индикаторные лампы	7	0,5	23	343	333	10	5	332	-1	
То же	28	0,13	210	343	336	7	4	339	3	
Разъемы	15	—	—	343	332	11	8	336,5	4,5	
Конденсатор	16	—	—	343	332	11	9	334	2	
Транзистор	3	0,2	500	343	342	1	3	339	-3	
Резонатор	1	—	—	343	332	11	10	335	3	
Унифицированный узел	3	0,03	10	343	332	11	11	331	-1	
То же	5	0,2	25	343	333	10	6	330	-3	
"	8	0,02	6	343	332	11	12	331	-1	
Трансформатор	1	0,1	12	358	333	25	16	338	-5	
"	1	2,5	207	358	336	22	13	338	2	
Дроссель	3	0,3	90	358	334	24	15	335	1	
Электродвигатель	1	0,5	150	358	335	23	14	333	-2	
Переключатель	1	0,1	21	358	333	25	17	333	0	
"	1	—	—	358	332,5	25,5	18	332	-0,5	
Разъем	4	0,1	50	373	332,5	40,5	21	333	0,5	
Потенциометр	1	0,01	10	373	333	40	20	335	2	
Термореле	6	0,02	100	373	339,5	33,5	19	338	-1,5	

6. Определяем вероятность p выхода из строя первых трех в ряду последовательности элементов по формуле (4.208) и табл. 4.10. Получаем $p=0,086>0,05$. По результатам расчета делаем вывод о том, что тепловой режим данного блока не соответствует нормальному. Необходимо изготовить тепловой макет блока.

7. Производится оценка теплового режима блока на стадии макетирования. Выбираем вероятность $p=0,99$ и уровень значимости $\lambda=0,10$. Заданы $\bar{m}_e=0$, $\sigma_e=10$. По табл. 4.9 для различных значений K и $p=0,99$, $\lambda=0,10$ проверяем выражение (4.215). Оно справедливо для 20-го элемента упорядоченной последовательности. Следовательно, измерению подлежат элементы упорядоченной последовательности с номерами 1, 2, 3, ..., 19 (табл. 4.13).

В графе 9 табл. 4.13 приведены действительные значения температур элементов, полученных при измерении.

8. Результаты измерения температуры 19-ти элементов сравниваем со значениями, заданными в ТУ. Все измеренные температуры соответствуют ТУ. В графе 10 табл. 4.13 приведены значения разностей расчетных и измеренных температур.

9. Оцениваем средние значения ошибки дисперсии для 19-ти элементов по (4.211) и (4.212)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} (T_{\text{эл}i}^{(\text{д})} - T_{\text{эл}i}^{(\text{п})}) = -0,64,$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{18} \sum_{i=1}^{19} (T_{\text{эл}i}^{(\text{д})} - T_{\text{эл}i}^{(\text{п})} - \bar{\varepsilon})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{18} \sum_{i=1}^{19} (T_{\text{эл}i}^{(\text{д})} - T_{\text{эл}i}^{(\text{п})} + 0,64)^2} = 7,25.$$

В табл. 4.11 находим значение $K=3,61$ для 20-го элемента. По (4.215) проверяем соответствие теплового режима 20-го элемента ТУ: $(-0,64 + 3,61 \cdot 7,25) < 40$. Следовательно, тепловой режим РЭА можно признать допустимым.

Список литературы

1. Фролов А. Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Высшая школа», 1970.
2. Пестряков В. Б. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. М., «Сов. радио», 1969.
3. Воллернер Н. Ф. Конструирование и технология изготовления радиоэлектронной аппаратуры. Киев, «Вища школа», 1970.
4. Надежность радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. А. С. Груничева. М., «Сов. радио», 1963.
5. Месяцев П. П. Введение в теорию проектирования и производства радиоаппаратуры. М., «Высшая школа», 1961.
6. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М., «Сов. радио», 1975.
7. Сотиков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., «Высшая школа», 1970.
8. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронной аппаратуре. Л., «Энергия», 1968.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1958.
10. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. М., Физматгиз, 1959.
11. Роткоп Л. Л., Гидалевич В. Б. Определение допустимой погрешности инженерной методики расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1969, вып. 2.
12. Янко Я. Математико-статистические таблицы. М., Госстатиздат, 1961.
13. Алексеев В. А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. М., «Энергия», 1975.
14. Волохов В. А., Хрычиков Э. Е., Киселев В. И. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. М., «Сов. радио», 1975.
15. Кремнев О. А., Семилет З. В., Буцкий М. Д. Исследование теплообмена и сопротивлений элементов оребренных пластинчатых теплообменников с перфорированными и волнистыми насадками. — В кн.: Теплообмен и газодинамика. Киев. Институт теплоэнергетики АН УССР, 1962.
16. Кремнев О. А., Духненко Н. Т. Теплоотдача гофрированных полосок в продольном потоке воздуха. В сб. докладов АН УССР, № 1. Киев. Изд-во АН УССР, 1961.
17. Кисленко А. Н., Раппопорт С. Р., Гречишников В. А. Система охлаждения металлокерамических ламп в генераторах СВЧ. — «Обмен опытом в радиопромышленности», 1971, вып. 4.
18. Заринов Н. В. Электронные лампы с принудительным воздушным охлаждением. — «Вестник связи», 1955, № 8.
19. Алексеев Ю. А., Нечитайло В. Ф. Радиатор для охлаждения полупроводниковых приборов. — «Обмен опытом в радиопромышленности», 1972, вып. 1.
20. Самодед А. С. Блоки охлаждения полупроводниковых приборов. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 3.
21. Агалова М. Г. Характеристики теплоотводов для полупроводниковых приборов, работающих в различных условиях эксплуатации. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетехническая», 1971, вып. 12.
22. Пакелис В. Г., Сенин В. В., Симхес В. Я. Охлаждение мощных транзисторов в трубчатом воздуховоде. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника», 1968, вып. 4.
23. Варламов Р. Г. Компоновка РЭА. М., «Сов. радио», 1975.
24. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1956.
25. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М., Госэнергоиздат, 1962.
26. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.—Л., «Энергия», 1976.
27. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло- и массообмена. М., Госэнергоиздат, 1961.
28. Прасолов Р. С. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. Л., «Энергия», 1964.

29. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М., Госэнергоиздат, 1959.
30. Гидалевич В. Б. Теплообмен в вертикальной плоской щели в условиях естественной конвекции. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1968, вып. 1.
31. Дульнев Г. Н., Прасолов Р. С., Шарков А. В. Конвективный теплообмен в условиях разрежения. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1971, вып. 1.
32. Аксенов А. И., Глушкова Д. Н., Иванов В. И. Отвод тепла в полупроводниковых приборах. М., «Энергия», 1971.
33. Мочалов Б. В. Оптимальный расчет ребристых радиаторов полупроводниковых триодов. — «Электроника», 1970, № 11.
34. Смирнов А. И. Номограммический метод выбора радиаторов для охлаждения полупроводниковых приборов. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетехническая», 1971, вып. 16.
35. Ройзен Л. И., Дулькин И. Н., Ракушина Н. И. Тепловой расчет радиаторов силовых полупроводниковых вентиляй. — В кн.: Силовые полупроводниковые приборы. М., 1969.
36. Агапова М. Г., Гальперин В. И. Основы тепловых расчетов полупроводниковых приборов с радиаторами. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение. Вып. 14. М., «Сов. радио», 1965.
37. Дульнев Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
38. Легкий В. М. Обобщение данных по теплоотдаче одиночных цилиндров с плоскими несимметричными ребрами на случай кольцевых несимметричных ребер. — В кн.: Теплофизика и теплотехника. Вып. 20. Киев, «Наукова думка», 1970.
39. Орнатский А. П., Смагина Е. М. Теплоотдача пластины с петельно-приводочным обребением при различных степенях заполнения сечения канала. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1969, вып. 1.
40. Шлыков Ю. Г., Ганин Е. А. Контактный теплообмен. М., Госэнергоиздат, 1963.
41. Холодов Н. М. К расчету контактного термического сопротивления КТС. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1968, вып. 2.
42. Перепека В. И., Холодов Н. М. Некоторые вопросы контактного теплообмена элементов РЭА. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1967, вып. 2.
43. Боскис И. А. К расчету тепловых режимов гибридных интегральных схем с радиальным отводом тепла. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 3.
44. Спокойный Ю. Е., Боскис И. А. Оценка стационарных тепловых режимов гибридных интегральных схем. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 1.
45. Спокойный Ю. Е., Боскис И. А. О проектировании топологии гибридной интегральной схемы, соответствующей заданному тепловому режиму. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 2.
46. Конструирование микромодульной аппаратуры. Под ред. Н. А. Барканова. М., «Сов. радио», 1968.
47. Оптимальные задачи надежности. Под ред. И. А. Ушакова. М., Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1968.
48. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М., «Наука», 1965.
49. Борщенко Е. И., Зайденберг М. Г. К вопросу об исследовании надежности сложных радиоэлектронных систем. — «Труды Ленинградского института авиационного приборостроения», 1971, вып. 70.
50. Зайденберг М. Г. Оптимальная загрузка радиоэлементов в процессе проектирования с целью обеспечения надежности. Сер. «Приборы и устройства радиоэлектронной техники и автоматики», ЛДНТИ, 1968.
51. Дмитриев Г. А. Влияние конструктивных факторов на процессы теплообмена в РЭА кассетного исполнения. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 2.
52. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н., Трудкова Э. Ф. Расчет теплового режима многоблочных радиоэлектронных аппаратов с общей принудительной вентиляцией. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1967, вып. 1.
53. Володин Ю. Г. Инженерный метод расчета тепловых характеристик радиоэлектронных аппаратов. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. XII», 1963, вып. 26.
54. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н., Семяшкин Э. М. Коэффициентный метод расчета теплового режима радиоэлектронного аппарата в герметичном кожухе. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1967, вып. 2.
55. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Тепловой режим радиоэлектронных аппаратов с перфорациями. — «Изв. вузов СССР. Приборостроение», 1963, № 2.
56. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы одноблочных радио-

электронных аппаратов при естественной вентиляции. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1968, вып. 1.

57. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М., Колтунова Е. Н. Коэффициентный метод расчета теплового режима одноблочного радиоэлектронного аппарата с перфорированным корпусом. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1967, вып. 1.

58. Дульнев Г. Н., Карапетян А. М. Тепло- и массообмен в радиоэлектронных аппаратах кассетной конструкции. — «Изв. вузов СССР, Приборостроение», 1964, № 4.

59. Дульнев Г. Н., Кайданов А. И., Егорова В. И., Кондратьев В. С. Тепловой режим одноблочного радиоэлектронного аппарата кассетной конструкции в герметичном корпусе. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1969, вып. 1.

60. Дульнева Н. М., Колтунова Е. Н., Кондратьев В. С. Коэффициентный метод расчета максимальной температуры РЭА кассетной конструкции с большой плотностью монтажа. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1969, вып. 1.

61. Дульнева Н. М. Инженерный метод расчета перегревов, возникающих при работе радиоэлектронных блоков на микромодулях. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1964, вып. 4.

62. Тарновский Н. Н., Буц Э. Ф. Приближенный метод расчета теплового режима одноблочного радиоэлектронного аппарата кассетной конструкции в герметичном корпусе. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 1.

63. Дмитриев Г. А. К расчету тепловых режимов радиоэлектронной аппара-

туры кассетного исполнения. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1968, вып. 1.

64. Дульнев Г. Н., Кайданов А. И., Трудкова Э. Ф. К вопросу об определении допустимой погрешности методов расчета тепловых режимов РЭА. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 2.

65. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е., Рейзин И. И. Влияние размещения радиоэлектронной аппаратуры с принудительным охлаждением на ее надежность. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1971, вып. 1.

66. Спокойный Ю. Е. Оптимизация конструктивных характеристик принудительно вентилируемой микроэлектронной аппаратуры, обеспечивающая эффективный отвод тепла. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1975, вып. 3.

67. Роткоп Л. Л., Гидалевич В. Б. Оптимальное размещение радиоэлектронной аппаратуры с принудительным охлаждением. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1970, вып. 1.

68. Роткоп Л. Л. и др. Оценка влияния тепловых режимов РЭА на ее надежность. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1972, вып. 1.

69. Спокойный Ю. Е. Оптимизация конструктивных характеристик естественно вентилируемой радиоэлектронной аппаратуры, обеспечивающая эффективный отвод тепла. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО», 1976, вып. 1.

70. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аккумулятор тепловой 32
Аэродинамическая модель аппарата 207
Действительное значение температуры 20
Дисперсия температуры 9
- Зона:**
влияния 92
защиты 133
нагретая 20, 142
- Интенсивность отказов** 16
- Кипение:**
пленоочное 30
пузырьковое 30
- Коэффициент:**
заполнения 53
конвективного теплообмена 65, 171
надежности 190, 195
неравномерности тепловыделений 211
эффективности ребра 64
- Кризис кипения** 30
- Математическое ожидание:**
мощности рассеивания для элементов 22, 108, 147
температуры 9
- Мощность рассеивания** 7
- Охлаждение:**
элементов РЭА воздушное 47
естественное воздушное 27
естественное жидкостное 29
естественное испарительное 29
принудительное воздушное 28, 51
принудительное жидкостное 29
принудительное испарительное 31
- Ошибка:**
первого вида 21, 219
второго вида 21, 219
- Погрешность методики** 145, 146, 151
- Принципы повышения надежности при теплофизическом конструировании:**
принудительного вентилируемой РЭА 201
РЭА с естественной вентиляцией 215
- Радиатор** 48
- Расположение:**
блоков 197
элементов 192
- Распределение потока теплоносителя** 196
- Система обеспечения теплового режима (СОТР)** 6
Среднеквадратическое отклонение 22, 108, 147
- Теплоноситель** 29
- Теплофизическое конструирование:**
РЭА 15
СОТР 15
элементов 14
- Термическое сопротивление** 130
- Универсальность методики** 151

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3	
Г л а в а 1. Общие вопросы конструирования	5	
1.1. Основные понятия и определения	5	
1.2. Условия эксплуатации РЭА	7	
1.3. Теплофизическое конструирование радиоэлектронных комплексов	13	
1.4. Тепловые режимы РЭА и ее надежность	16	
1.5. Способы задания теплового режима РЭА	18	
Г л а в а 2. Способы охлаждения РЭА	27	
2.1. Классификация способов охлаждения	27	
2.2. Конструктивные особенности РЭА с воздушным охлаждением	33	
2.3. Выбор способа охлаждения на ранней стадии конструирования	53	
Г л а в а 3. Теплофизическое конструирование элементов РЭА	64	
3.1. Расчет теплового режима «больших» элементов	64	
3.2. Влияние тепловых параметров дискретных элементов на тепловой режим РЭА	73	
3.3. Расчет теплового режима микроминиатюрных элементов	84	
3.4. Определение оптимальных коэффициентов нагрузки элементов РЭА	99	
3.5. Обеспечение заданного теплового режима при проектировании микроминиатюрных элементов	127	
Г л а в а 4. Теплофизическое конструирование РЭА	141	
4.1. Основные положения, используемые при расчетах теплового режима РЭА	141	
4.2. Расчет теплового режима РЭА при естественном воздушном охлаждении	154	
4.3. Расчет теплового режима РЭА при принудительном воздушном охлаждении	170	
4.4. Выбор элементов, для которых необходимо проведение подробного расчета теплового режима	179	
4.5. Вопросы конструирования РЭА с принудительным воздушным охлаждением	189	
4.6. Вопросы конструирования РЭА с естественной вентиляцией	206	
4.7. Методы оценки тепловых режимов РЭА	216	
Список литературы	226	
Предметный указатель	229	

**Леонид Львович Роткоп
Юрий Ефимович Спокойный**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ
ПРИ
КОНСТРУИРОВАНИИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ**

Редакторы В. И. Киселев
К. И. Кучумова

Художественный редактор А. Н. Алтунин

Обложка художника Б. Л. Николаева

Технический редактор Г. З. Кузнецова

Корректоры Е. А. Чесакова,

Л. А. Максимова

Сдано в набор 31/V 1976 г.

Подписано в печать 10/IX 1976 г.

Т-16186

Формат 70×100/16 Бумага машиномелованная

Объем 18,85 усл. п. л., 17,405 уч.-изд. л.

Тираж 12 000 экз. Зак. 689 Цена 1 р. 16 к.

Издательство «Советское радио», Москва,
Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 10 «Союзполиграф-
прома» при Государственном Комитете Сове-
та Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли. Москва,
М-114, Шлюзовая наб., 10.

Роткоп Л. Л. и Спокойный Ю. Е.

P79 Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М., «Сов. радио», 1976.

232 с., с ил.

Изложены особенности обеспечения тепловых режимов при конструировании РЭА. Приведены методы расчета тепловых режимов элементов, блоков и стоек РЭА, примеры расчета и конструкции РЭА.

Книга предназначена для инженеров и научных работников, занятых конструированием РЭА.

P 30406-077
046(01)-76 34-76

6Ф2.1