

Министерство образования Российской Федерации  
Владивостокский государственный университет  
экономики и сервиса

---

**В.И. Накрайников**

**Основы конструирования  
и технологии производства РЭС**

Учебно-методическое пособие

Владивосток  
2003

ББК 32.844

Н 21

**Накрайников В.И.**

Н 21 Основы конструирования и технологии радиоэлектронных устройств: Учебно-методическое пособие. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2003. – 60с

Пособие составлено в соответствии с учебной программой курса, а также требованиями образовательного стандарта России к дисциплине «Основы конструирования и технологии производства РЭС».

Предназначено для обеспечения практических занятий и самостоятельной работы студентов специальностей 201500 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура» и 201700 «Средства радиоэлектронной борьбы».

ББК 32.844

© Издательство Владивостокского  
государственного университета  
экономики и сервиса, 2003

# Тема 1. РАСЧЕТ КОМПОНОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ И БЛОКОВ БРЭА

**Цель работы:** ознакомление с методикой расчета и экспериментальное определение компоновочных характеристик узлов и блоков БРЭА.

## Краткие теоретические сведения

Компоновка БРЭА – размещение в пространстве или на плоскости элементов, имеющих электрические соединения в соответствии с электрической схемой, и обеспечение допустимого минимума паразитных взаимодействий, которые не нарушают значения расчетных выходных параметров БРЭА.

Энергетическое несовершенство БРЭА по преобразованию энергии источников питания в энергию выходного сигнала (чаще всего  $K_{пр.} = 10^{-3} \dots 10^{-10}$ ) – причина больших тепловыделений, для отвода которых необходимы развитие поверхности конструкций и высокая эффективность теплоносителя.

Емкостные и индуктивные элементы БРЭА требуют для нормальной работы определенного объема пространства, в котором при их работе возникают электрические и магнитные поля. Их локализация требует увеличения объема конструкции БРЭА либо использования специальных экранов.

Сложные условия эксплуатации, электрическое несовершенство БРЭА, необходимость учета при компоновке «объемов» электрических и магнитных полей – причины усложнения проблем компоновки элементов БРЭА, которая может быть определяющим фактором при выборе того или иного компоновочного решения БРЭА. Поэтому компоновочными моделями элементов или БРЭА в целом являются не геометрически адекватные им модели, а модели, геометрически обобщающие всю совокупность их свойств. Такая модель называется обобщенной геометрической моделью (ОГМ).

Сложность расчета и формы ОГМ – причина использования в практике компоновочных работ упрощенных компоновочных моделей в виде установочных объемов  $U_{уст.}$  или площади  $S_{уст.}$  элементов.

$U_{уст.} (S_{уст.})$  – прямоугольный параллелепипед (или прямоугольник), описанный вокруг радиоэлемента с учетом его максимальных установочных размеров, требований по монтажу и регулировке и дополнительных объемов или пространства, обеспечивающих его нормальную

работу при данном тепловыделении, электрических и магнитных взаимодействиях.

Размеры ОГМ ( $U_{уст.}$  и  $S_{уст.}$ ) – функции геометрии радиоэлемента и его режима работы. При малых коэффициентах нагрузки по мощности (0,1.....0,3) можно использовать упрощенные соотношения для вычисления  $U_{уст.}$  и  $S_{уст.}$  по нормированным установочным размерам (рис. 1.1 а)

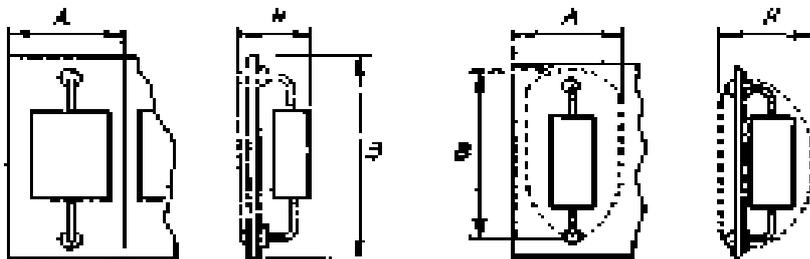


Рис. 1.1. Схема определения установочного объема  $U_{уст.}$  (а) и объема обобщенной геометрической модели ОГМ (б)

$$U_{уст.} \approx 1,5A_{\max} B_{\max} H_{\max}$$

$$S_{уст.} \approx 1,3A_{\max} B_{\max}$$

При значениях коэффициента нагрузки радиоэлементов  $K_H > 0,3 \dots 0,5$  вычисление  $U_{уст.}$  и  $S_{уст.}$  затрудняется, т.к. необходимо вычисление объемной или плоской ОГМ со сложными образующими, что требует знания начальных и граничных условий.

### Аналитическая компоновка

В ее основе лежат выражения:

$$U_{\Sigma} = K_{ув.}^U \sum_{уст.i} U_{уст.i} = \left( \frac{1}{K_{зан.}^U} \right) \sum U_{уст.i}$$

$$S_{\Sigma} = K_{ув.}^S \sum_{уст.i} S_{уст.i} = \left( \frac{1}{K_{исп.}^S} \right) \sum S_{уст.i}$$
(1)

где  $U_{\Sigma}$  и  $S_{\Sigma}$  – суммарный объем (площадь) БРЭА;

$K_{ув.}^U \left( K_{ув.}^S \right)$  – коэффициент увеличения объема (площади) БРЭА, зависящий от назначения и условной эксплуатации и равный  $5 \dots 1(3 \dots 1)$ ;

$K_{уст.i} (S_{уст.i})$  – установочный объем (площадь)  $i$ -го элемента;

$K_{зан}^U$  – коэффициент БРЭА по объему ( $0,2 \dots 1,0$ );

$K_{исп.}^S$  – коэффициент использования площади платы, массы и т.п. ( $0,33 \dots 1,0$ ).

Объемная масса БРЭА обычно лежит в пределах  $0,4 \dots 1,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

При малом разнообразии форм радиоэлементов можно (в частности, при компоновке радиоэлементов и топологических структур пленочных и гибридных микросхем) использовать единый геометрический компоновочный параметр в виде квадрата или куба, сводя площади (объемы) радиоэлементов к исходному нормированному значению и вычисляя общую площадь (объем) в нормированных значениях. Для ЭВМ и устройств обработки данных используют простые соотношения вида: число функций (объем, число элементов и площадь) и им подобные.

Аналитическими методами пользуются при ограниченном количестве типов размеров радиоэлементов на стадиях эскизного проектирования и технического проектирования.

### Графическая компоновка

Основана на упрощении графики и ускорении процесса вычерчивания радио- и электроэлементов. Используется при выполнении компоновочных эскизов и монтажных чертежей.

По современным стандартам ЕСКД допускается весьма значительное упрощение начертаний элементов БРЭА. Для ускорения выполнения графических работ используют деколи (сухие переводные изображения на прозрачной пленке), трафареты, специальные штампы т.д.

В графическую компоновку основу положено выражение:

$$A_{\Sigma} = N(A_2 - A_1) + nA_1, \quad (2)$$

где  $A_{\Sigma}$  – суммарное значение компоновочного параметра;

$N$  – число «больших» электрорадиоэлементов;

$n$  – число «малых» элементов;

$A_2$  и  $A_1$  – максимальное и минимальное значения компоновочного параметра.

Если гистограмма распределения  $U_{уст.}$  и  $S_{уст.}$  имеет два максимума (рис. 1.2а), то строится график (1.2б).

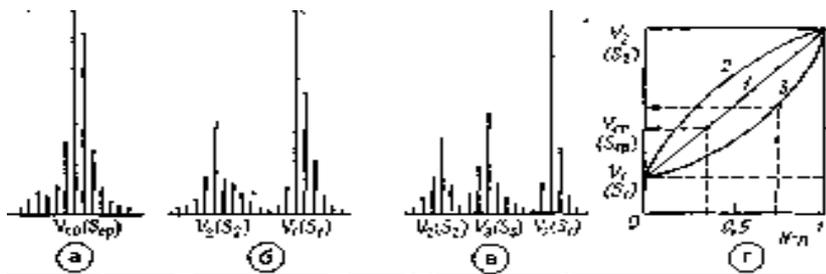


Рис. 1.2. Характер распределения компоновочных параметров и их связь с отношением  $N/n$  для графоаналитической компоновки

В зависимости  $U = f(N/n)$  или  $S = f(N/n)$  по отношению  $N/n$  находим среднее значение  $U$  или  $S$ , а затем суммарное ( $U_{\Sigma} = U_{cp} \cdot n$ ,  $S_{\Sigma} = S_{cp} \cdot n$ ).

Для технологической и измерительной БРЭА обычно  $U_1 = 2\text{см}^3$  и  $U_2 = 10\text{см}^3$ . В этом случае проще использовать формулу:

$$U_{\Sigma} = 8N + 2n,$$

которая получается после подстановки численных значений  $U_1$  и  $U_2$  в (2).

Графический метод целесообразно использовать для быстрой приближенной оценки компоновочных параметров на стадиях технического предложения и эскизного проектирования и при достаточной однородности компоновочных материалов и анализируемой БРЭА.

### Натурная компоновка

В её основе лежит разработка лабораторных макетов на реальных электро-радиоэлементах, соединенных в полном соответствии с принципиальной схемой изделия. Эта компоновка эффективна, когда компоновка элементов на макете, форма и размеры макета соответствуют техническому заданию на разработку конструкции изделия. В противном случае (особенно при высокой плотности компоновки) неизбежна длительная доводка образа до требуемых параметров.

Если выполнить элементы в виде «магнитных кубиков» (залить их в прозрачную пластмассу, армировать контакты или магнитные держатели), которые имеют  $U \cong U_{уст.}$ , то возможно быстрое моделирование достаточно сложных изделий (микросхемных видеоусилителей, измерительных приборов и т.п.).

Натурные методы целесообразны на стадии отработки принципиальной схемы и формулировки технического задания на конструкцию БРЭА.

### Номографическая компоновка

Используются нормированные значения компоновочных параметров по ряду предпочтительных чисел  $R20$

$$R20 = \sqrt[10]{10} = 1,12, \quad (3)$$

обеспечивающих при 140 значениях с точностью  $\pm 6\%$  любое значение компоновочного параметра в диапазоне значений  $10^7$  раз, специальных таблиц со значениями  $K (K_{зан.}^U, K_{исп.}^S)$ .

Номограммы строятся по формулам:

$$\begin{aligned} A_i &= f(n; A_i) & A_1 + A_2 &= f(A_1; A_2); \\ A_{\Sigma} k &= f(A_{\Sigma}; k; K); & A_0 &= (A_1; A_2) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $A$  – частные и общие значения компоновочных параметров,  
 $n$  – число элементов (компонентов).

Точность и достоверность полученных результатов, а также быстрота расчетов (5...10 мин.) делают целесообразным использование метода на стадиях технического предложения, эскизного и технического проектирования.

### Объемная компоновка

Основана на представлении упрощенных объемных моделей. Степень наглядности очень высокая. Используется для моделирования печатных плат дискретными электро- и радиоэлементами в виде условных моделей и отработки трассировки в виде моделей элементов, близких к оригиналу, для компоновки элементов модулей.

На практике объемное моделирование чаще всего используют не для компоновочных моделей ФУ, а для компоновочных моделей более крупных изделий, для посадочных и художественно-конструкторских макетов. Применяют магнитные компоновочные модели, имитирующие БРЭА в целом.

Объемные компоновочные модели используют на стадиях технического предложения и эскизного проектирования в виде весовых (габариты, форма, масса и координаты центра тяжести макета соответствуют реальному изделию), тепловых (габариты, форма, мощность тепловыделения и пространственное расположение теплонагруженных радиоэле-

ментов макета соответствуют изделию) и художественно-конструкторских (форма и цвет макета соответствуют изделию) макетов.

### **Плоскостная компоновка**

Основана на представлении упрощенных плоскостных моделей. Используются вычерченные в масштабе чертежи-аппликации на чертежной бумаге, тонком картоне, или пергаменте, их komponуют на модели платы и, добившись нужного результата, перерисовывают полученную компоновку на пергамент (чертежную бумагу марок «Д» и «Ч») или белую чертежную бумагу или делают на электрографической машине копию. Контур чертежей-аппликаций необходимо выполнять с учетом размеров ОГМ (в виде проекции  $U_{уст.}$  или  $S_{уст.}$  элемента).

Возможно выполнение магнитных аппликаций (темплетов) на окрашенной жести или бумаге с ферромагнитным покрытием. В этом случае основой компоновочной модели является магнитная доска (стол или матрица в виде ящика со шнурами магнитной резины или с плоскими магнитами), на которую накладывается заготовка печатной платы. Моделирование соединений выполняют темно-красной липкой лентой.

Плоские компоновочные модели используют при разработке конструкторской документации на подготовительной стадии технического проектирования. Разновидностью плоских компоновочных моделей являются изооптические.

### **Машинная компоновка.**

Предназначена для замены ручного труда конструктора работой ЭВМ, в которой используются принципы перебора возможных вариантов расположения элементов и возможных мест трассировки соединений с помощью ЭВМ. Так как используются несвойственные цифровой ЭВМ логические алгоритмы, то эффективность таких методов значительно ниже методов решения цифровых задач.

Эффективность методов машинной компоновки тем выше, чем выше жесткость иерархических конструкторских уровней БРЭА (стойка, рама, панель, субпанель, типовой элемент замены ТЭЗ с «гнездами» для интегральных схем или дискретных элементов). Чем ограниченной их номенклатура, тем больше степень унификации и технологических решений. Наиболее целесообразно использование комплексного подхода и решение не частных задач машинной компоновки, а машинного проектирования БРЭА в целом. В противном случае эффективность применения машинной компоновки позволяет повысить производительность конструкторского труда всего на 8...10%.

Машинные методы целесообразно использовать на стадии технического проектирования при разработке конструкторской документации для комплексных (совместно с технологическими системами) систем автоматизации проектирования РЭА.

### **Последовательность компоновки**

Сложность компоновки зависит от особенностей работы схемы и условий её эксплуатации.

Общими факторами, определяющими сложность компоновки за счет функциональных особенностей, являются: повышение требований к стабильности, увеличение числа входов и выходов, уровня дискретизирующих факторов, разницы между формой и размерами лабораторного макета и проектируемого изделия, увеличение их точности работы.

Компоновка элементов бортовой РЭА, работающей в условиях значительных по величине разнообразных дестабилизирующих факторов, наиболее трудоемка. Легче – компоновка элементов носимой или возимой, еще легче – стационарной БРЭА. Наиболее сложны по компоновке различные усилительные устройства, проще – генераторные, еще проще – логические и устройства питания.

Компоновка усилителей тем сложнее, чем выше коэффициент усиления, чем шире полоса частот, чем выше или ниже резонансная частота, чем меньше длительность импульса (для видеоусилителей). Увеличение коэффициента усиления приводит к повышению вероятности паразитных связей между входными и выходными элементами. Расширение полосы частот – причина роста верхней граничной частоты, на которой резко проявляют себя паразитные параметры, особенно индуктивных элементов. Уменьшение нижней граничной частоты – причина значительных затруднений в экранировании монтажных полей.

Рост резонансной частоты при уменьшении полосы частот – причина использования высокодобротных контуров, очень сложных в конструировании и чувствительных к наводкам. Понижение резонансной частоты (особенно в область  $0,1 \dots 10$  Гц) – причина усложнения структуры контуров, в которых часто приходится использовать электромеханические системы. Сокращение длительности импульса – причина появления весьма высокочастотных компонентов разложения, которые очень чувствительны к влиянию различных конструктивных элементов.

Компоновка элементов генераторов тем сложнее, чем выше или ниже уровень выходной мощности, выше или ниже рабочая частота, больше число рабочих каналов, меньше плотность воздуха (наиболее опасна зона  $1 \dots 3$  мм рт. ст. или  $133 - 400$  Па), выше рабочее напряжение и требуемая эффективность экранирована.

Повышение выходной мощности связано с увеличением рабочих частот напряжения и тока, что требует увеличения расстояния между элементами, увеличения сечений проводов, применения специальных систем охлаждения и мер по защите от ионизирующих излучений, возникающих при рабочих напряжениях выше 10 кВ. Понижение выходной мощности резко увеличивает влияние конструктивных вспомогательных элементов на стабильность параметров и уровень мощности. Повышение рабочего напряжения предъявляет повышенные требования как электрических, так и механических элементов конструкции БРЭА и к конструкции самих колебательных контуров (в том числе переходного типа).

Увеличение числа рабочих каналов (на каждом из которых имеется как минимум две настройки в колебательном и контуре связи) требует специальных мер по развязке контуров каналов (экраны) и сложных коммутационных устройств. Понижение плотности воздуха до 1...3 мм рт. ст. (133 – 400 Па) – причина тихого коронного разряда даже при напряжениях 100...200 В, что уменьшает выходную мощность, уменьшает стабильность работы и увеличивает уровень шумов (что не очень желательно в гетеродинах приемников и измерительных генераторах). Весьма сложно решать задачу по получению высокой степени эффективности экранирования в измерительных генераторах и мощных генераторах СВЧ.

Компоновка элементов логических устройств (ЭВМ, системы обработки данных) тем сложнее, чем больше разница между входными и выходными напряжениями или токами, чем короче длительность импульса, выше быстродействие и точность, больше количество функций и сложнее монтажные структуры.

Чем больше разница между входным и выходным напряжениями или токами, тем выше коэффициент усиления устройства. Сокращение длительности импульса, повышение быстродействия и точности – причина появления ВЧ составляющих; рост количества функций – причина увеличения числа входов и выходов, усложнения монтажных структур и роста паразитных связей (в первую очередь емкостного характера).

Компоновка элементов устройств питания тем сложнее, чем выше или ниже выходное напряжение (больше или меньше выходной ток), чем больше выходов и чем выше стабильность их параметров. Увеличение выходного напряжения или тока требует увеличения зазоров, применения прочных в электрическом отношении материалов, увеличения сечения токопроводов, применения систем охлаждения (от простейших радиаторов до сложных воздушных систем). Высокие стабильности выходных напряжений и токов требуют применения усилителей постоянного тока со значительными коэффициентами усиления, что при большом числе выходов заставляет рассматривать устройство питания в виде совокупности усилителей.

Дополнительные факторы общего характера – это количество информации, перерабатываемое в изделии; тип активных элементов (электронные, ионные, диэлектрические, магнитные, полупроводниковые); требуемая форма и размеры; вид электромонтажных соединений; технология изготовления, сборки и регулировки; заданная компоновочная схема.

Приведем последовательность анализа технического задания на разработку любой БРЭА:

1. Выяснить назначение элементов схемы и определить их электрические и тепловые режимы.

2. Проанализировать условия эксплуатации и степень влияния дестабилизирующих факторов на работу элементов и схемы в целом.

3. Выявить наиболее важные внутренние источники нестабильности схемы (её элементов) и их чувствительность к внешним электрическим, магнитным, тепловым, механическим и другим видам воздействия.

4. Определить пути возможных паразитных наводок между элементами схемы за счет гальванической паразитной связи, электрических, магнитных и электромагнитных полей.

5. Оценить величину, характер и особенности входных и выходных сигналов и напряжений питания (особенно чувствительных и высоковольтных цепей).

6. Предусмотреть наличие дополнительных, не указанных на принципиальной схеме элементов в виде контрольных точек, экранов и развязывающих цепей, повышающих качество работы изделия.

7. Вычислить координаты центра тяжести (при необходимости), проанализировать варианты координат точек крепления и характерных схемных (вход, выход, контроль, питание) точек.

8. Учесть характер смены элементов, практичность расположения подборных, подстроечных, регулировочных и индикаторных устройств и определить на основе проведенного анализа генеральную линию компоновки БРЭА.

### **Порядок выполнения работы**

1. Получить схему электрическую принципиальную функционального узла или блока БРЭА и перечень элементов схемы (по заданию преподавателя). Ознакомиться с работой схемы. Выделить наиболее слабые с точки зрения эксплуатационной надежности радиоэлементы.

2. Для заданных условий эксплуатации произвести компоновку радиоэлементов на плоскости или в пространстве в соответствии со схемой устройства (по заданию преподавателя).

3. Произвести расчет компоновочных параметров данного изделия аналитическим, затем графоаналитическим способом.

4. Рассчитать компоновочные характеристики устройства номографическим способом.

5. Сравнить полученные результаты для каждого метода компоновки, оценить быстроту выполнения и точность определения компоновочных параметров.

### Контрольные вопросы

1. Расскажите о целях и задачах компоновки радиоэлементов на плоскости и в объеме.

2. Что такое обобщенная геометрическая модель, установочный объем радиоэлемента, радиоизделия?

3. Что лежит в основе аналитической компоновки и какими параметрами она оперирует?

4. В чем преимущество графоаналитической компоновки перед аналитической и где эти методы компоновки можно использовать?

5. Проведите графическую компоновку участка схемы изделия (по заданию преподавателя) и ответьте, в каких случаях такой метод можно использовать?

6. Цель и задачи номографической компоновки. В чем ее преимущества и недостатки?

7. Какие другие виды компоновки Вы знаете? Охарактеризуйте их и приведите их сравнительный анализ.

8. Приведите последовательность анализа технического задания на разработку любой БРЭА.

### Литература.

1. Варламов Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1975.

2. Справочник. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА. 2-ое изд., перераб. и доп. / Под ред. Э.Т. Романычевой. М.: Радио и связь, 1989.

3. Усатенко С.Т., Качинюк Т.К. и др. Выполнение электрических схем по ЕСКД.: Справочник. 2-ое изд., перераб. и доп. М.:Изд. стандартов, 1992.

4. Преснухин Г.Д. и др. Основы конструирования микроэлектронных вычислительных машин. М.: Высш. шк., 1976.

5. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. М.: Высш. шк., 1985.

6. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Варламова. М.: Сов. радио, 1980.

## Тема 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ НАСТРОЙКИ РАДИОПРИЕМНИКОВ

**Цель работы:** изучить и рассчитать механизмы настройки радиоприемников.

### Краткие теоретические сведения

Механизмы плавной настройки (верньеры) применяются для плавного изменения параметров настройки исполнительного устройства и представляют собой передачу на замедление, т.к. человек не может устанавливать ручку настройки в требуемое положение. Значение передаточного отношения между ручками настройки и осью исполнительного устройства определяют из выражения

$$i = \frac{60\Delta\varphi_{0,пер.}}{\Delta\varphi_{ну}},$$

где  $\Delta\varphi_{0,пер.}$  – точность установки ручки настройки оператором, которая лежит в пределах  $1 \div 1,5^0$ ;  $\Delta\varphi_{ну}$  – требуемая точность настройки исполнительного устройства, угол мин.

По способу передачи движения от ручки настройки до исполнительного устройства механизмы бывают: с гибкой связью, фрикционные, зубчатые, червячные и винтовые.

### Механизмы настройки с гибкой связью

Механизмы настройки с гибкой связью широко применяются в бытовой радиоаппаратуре. Преимуществами их являются простота конструкции и возможность размещения исполнительных устройств в различных плоскостях и на любом расстоянии друг от друга. Такие механизмы передают вращательное движение на конденсаторы переменной емкости и ферритовые антенны и поступательное движение на катушки индуктивности и указатели шкалы. Недостатками таких механизмов являются наличие упругого мертвого хода в гибкой связи и проскальзывание ее на оси ручки настройки. Для их натяжения применяются пружины, которые вставляются в разрыве гибкой связи или одним концом закрепляются на барабане, установленном на оси исполнительного устройства.

Главной частью механизма настройки является отчетное устройство. Отсчетным устройством называется такое устройство, которое служит для определения значений измеряемой величины, визуальным на-

блюдением по положению указателя относительно штрихов шкалы. В радиоаппаратуре обычно применяются отсчетные устройства с дисковой или линейной шкалой и с оптическим отсчетом. Каждое отсчетное устройство состоит из шкалы и указателей.

Отсчетные устройства должны сочетать точность отсчета, четкость шкалы, возможность юстировки и индивидуальной градуировки.

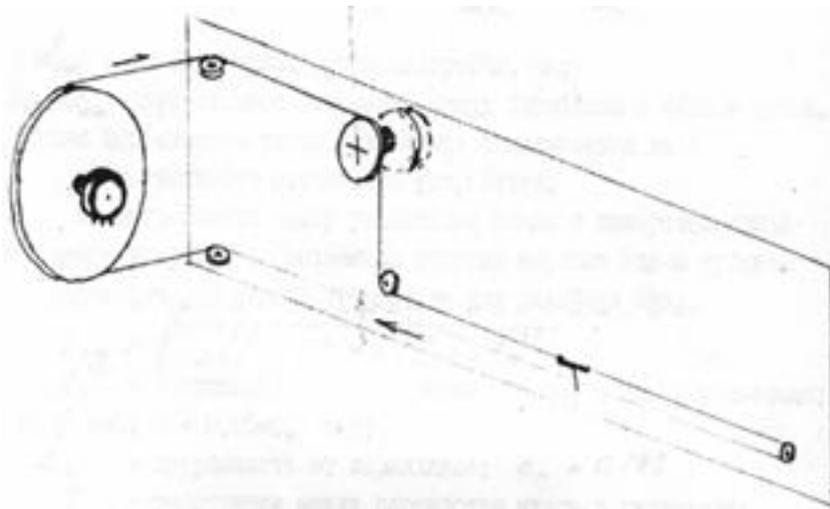


Рис.2.1. Кинематическая схема настройки с гибкой связью

Кинематическая схема механизма настройки с гибкой связью показана на рис.2.1. Вращение на барабан 1, установленный на оси конденсатора переменной емкости 2, передается со шкива ручки настройки 3 с помощью тросика 4. Поступательное движение указателя 5 шкалы 6 производится от барабана 1 тем же тросиком 4, натянутым на ролики 7. Тросик 4 на барабане 1 и шкиве ручки 3 имеет по несколько витков.

Длина шкалы для данного механизма:

$$L_M = \pi D_{бар.} \frac{\omega_{ny}}{360}, \text{ мм,}$$

где  $D_{бар.}$  – диаметр барабана, мм;

$\omega_{ny}$  – абочий угол поворота исполнительного устройства, град.

Число оборотов барабана для перестройки конденсатора переменной емкости:

$$n_{бар.} = \frac{\omega_{ny}}{360}.$$

Число оборотов ручки для перестройки механизма в пределах всей шкалы

$$n_{рл.} = \frac{L_{ш}}{\pi \cdot d_{шк}} = n_{бар.} \cdot i,$$

где  $d_{шк}$  – диаметр шкива ручки настройки, мм;

$i = \frac{D_{бар.}}{d_{шк}}$  – передаточное отношение между барабаном и шкивом ручки.

Общая погрешность таких механизмов складывается из:

- 1) погрешности отсчетного устройства;
- 2) погрешности между указателем шкалы и поворотом исполнительного устройства, вызванной упругим мертвым ходом тросика.

*Погрешность отсчетного устройства для линейных шкал:*

$$\Delta l_{0y} = \sqrt{\Delta l_c^2 + e_n^2 + \Delta l_n^2 + \Delta l_y^2},$$

где  $\Delta l_c$  – погрешность от совмещения штрихов шкалы и указателя;

$\Delta l_c = b$ , мм, ( $b = 0,05 \div 0,1$  мм);

$l_n$  – погрешность от параллакса,  $e_n = 0,12S$ ;

$S$  – расстояние между плоскостью шкалы и указателя;

$\Delta l_n$  – погрешности изготовления шкал, приведенные в табл. 9.2. учебника А.И.Пименова;

– погрешность от точности установки (принять  $\Delta l_y = 0$ ).

*Погрешность, вызванная мертвым ходом тросика:*

$$\Delta \varphi_{умм} = \arctg \frac{2kL_H}{D_{бар.}}, \text{ угл. мин.},$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий изменение длины тросика в зависимости от тягового усилителя, изменения температуры и т.д. ( $k = 1,05 \div 1,40$ ).

$L_H$  – длина тросика от указателя до точки заделки его на барабане.

## Пример последовательности сборки радиоприемника «Меридиан»

1. Предварительно подвергнутый старению радиощнур завести в двойной шкив и закрепить на ветвях ( $L=186$  мм,  $L=282$  мм и  $L=380$  мм) пружины. Все длины ветвей радиощнура, указанные на рис.2.2, выдержать с усилием 0,5 кг (рабочее усилие пружин).

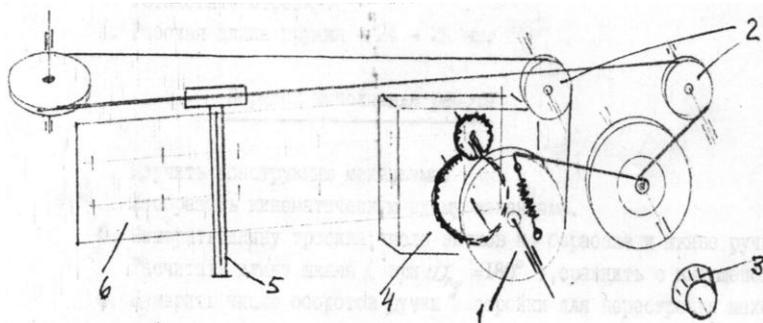


Рис. 2.2. Кинематическая схема радиоприемника «Меридиан»

2. Положить собранное основание шкального устройства шкалой вниз (ведущий валик при этом должен находиться слева).

3. Надеть двойной шкив на штырь основания. Накинуть ветви радиощнура ( $L=186$  мм и  $L=501$  мм) на два верхних ролика, ведущий валик и двойной шкив. При этом на ведущем валике и большом диске двойного шкива радиощнур должен образовывать по два витка.

4. Два витка большей ветви радиощнура ( $L=380$  мм) с пружиной намотать против часовой стрелки на малый диск двойного шкива и, полубогнув нижний третий ролик, отвести вниз. Полвитка малой ветви радиощнура ( $L=282$  мм) с пружиной навить по часовой стрелке на этот же диск и отвести вниз.

5. Положить шкив КПЕ под собранное основание на выступающую часть металлической втулки так, чтобы два малые отверстия находились внизу, а прорезь в большом диске шкива находилась сверху.

6. Завести конец пружины левой ветви ( $L=380$  мм), опускающейся с ролика, в правое отверстие шкива КПЕ, а конец пружины правой ветви ( $L=282$  мм) – в левое отверстие, и, сделав правой ветвью один оборот по часовой стрелке, развернуть шкив КПЕ на  $180^{\circ}$  вокруг вертикальной оси, после чего развернуть шкив КПЕ на  $180^{\circ}$  вокруг горизонтальной оси, закрепив его левой ветвью ( $L=380$  мм).

7. Установить стрелку.

8. Рабочая длина пружин 24–28 мм.

## Порядок выполнения работы.

1. Изучить конструкцию механизма. Изобразить кинематическую схему механизма.
2. Измерить длину тросика, число витков на барабане и шкиве ручки.
3. Рассчитать длину шкалы (при  $\omega_{ny} = 180^0$ ), сравнить с имеющейся.
4. Измерить число оборотов ручки настройки для перестройки механизма в пределах всей шкалы.
5. Рассчитать число оборотов ручки, необходимое для перестройки механизма в пределах всей шкалы (для  $\omega_{ny} = 180^0$ ). Сравнить с измеренным значением.
6. Рассчитать погрешность механизма.
7. Разобрать и собрать механизм настройки радиоприемника.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение элементов кинематической схемы радиоприемника.
2. Каким образом связана длина шкалы с диаметром барабана в механизмах настройки с гибкой связью при  $\omega_{ny} = 180^0, 270^0, 360^0$ ?
3. Какими способами можно уменьшить диаметр барабана при одной и той же длине шкалы?
4. Сколько нужно сделать оборотов ручкой настройки, чтобы указатель из одного крайнего положения перешел в другое ( $\omega_{ny} = 180^0, 270^0, 360^0$ )?
5. Какие существуют погрешности механизмов настройки радиоприемников?
6. Что такое ошибки параллакса?

## Литература

1. Пименов А.И. Механизмы настройки РЭА. М.: Высш. шк., 1979.
2. Инструкция по ремонту радиоприемника "Меридиан".

## Тема 3. РАСЧЕТ И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ (ФУ) БРЭА

**Цель работы:** научиться по известной принципиальной схеме ФУ составлять рисунок печатных проводников; с учетом конструктивных требований выбрать необходимый фольгированный материал печатной платы, рассчитать ее размеры, определить конструктивные параметры печатных проводников, диаметры монтажных отверстий и контактных площадок; уметь оформить чертеж печатной платы согласно требований ГОСТ ЕСКД.

### Краткие теоретические сведения

Функциональными узлами с печатным монтажом называются также ФУ, в которых межэлементные соединения выполняются с помощью плоских проводников, имеющих прочное соединение с изоляционным основанием по всей своей длине.

Существует 2 группы способов выполнения печатных проводников: избирательного удаления и избирательного нанесения проводящего материала. Представителями первой группы способов являются травление и фрезерование ненужных участков медной фольги с изоляционной подложки, а второй – способы осаждения меди из раствора, вжигания испарения в вакууме и прессования соединений на изоляционном основании.

В отечественной литературе метод травления фольгированного диэлектрика без металлизации отверстий называется химическим, метод гальванического насаждения меди на диэлектрик с металлизацией отверстий – электрическим, метод травления фольгированного диэлектрика с металлизацией отверстий – комбинированным (рис. 3.1).

Все эти способы дают возможность применять одно – и двусторонний печатный монтаж.

Для фольгированных изоляционных материалов используют медную фольгу толщиной от 0,02 до 0,1 мм, наклеенную на основание из гетинакса, стеклотекстолита или низкочастотного фольгированного диэлектрика толщиной 0,8...3 мм. Рекомендуемая толщина диэлектрика по нормам МЭК 0,2; 0,5; 0,8; 1,6; 2,4; 3,2; и 6,4 мм и с ограниченным применением толщиной 1,0; 1,2; 2,0 мм. Наибольшее распространение получила фольга толщиной 0,035 и 0,05 мм. При ее травлении получают проводники шириной до 3 мм, зазоры 2 мм и точность контура изображения до 0,05 мм. Ширину печатных проводников принимают равной 0,5...1 мм, а зазоры между ними – не менее 1 мм.

При механическом удалении минимальная ширина проводников получается 2...5 мм при зазорах не менее 1 мм. При сложном рисунке соединений возможны пересечения проводников, потому применяются не односторонние, а двусторонние фольгированные материалы.

Основные требования к плотности компоновки, форме и размерам печатных плат следующие. Плотность компоновки ФУ с печатным монтажом определяется шириной проводника или зазором между проводниками в узком месте, который берется равным 0,5...0,8 мм при пониженной плотности монтажа (класс А) и 0,2...0,4 при повышенной плотности монтажа (класс Б), которая применяется только на малогабаритных платах размером не более 120×180 мм.

Наивысшая плотность компоновки – у химического метода (класса А и Б), несколько уступает ему комбинированный и на последнем месте (только класс А) стоит электрохимический.

Рекомендуется прямоугольная форма плат с отношением сторон от 1:1 до 1:4 (при размере большой стороны до 180 мм) и от 1:1 до 1:3 (при размерах сторон до 240×360). Размеры плат рекомендуется брать с шагом 5 мм в диапазоне от 10 до 80 мм, 10 мм в диапазоне от 80 до 200 мм, 20 мм в диапазоне от 200 до 360 мм. Минимальный размер платы 10×10 мм, а максимальный - 240×360 мм.

За основу рекомендуется брать ряд предпочтительных чисел  $R10$  (10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315). Шаг координатной сетки равен 2,5; 1,25 мм (ГОСТ 10317-72), причем на одной плате разрешается использовать только один шаг.

ФУ на печатных платах выполняются по следующим компоновочным схемам:

- 1) с горизонтальным расположением деталей;
- 2) с вертикальным расположением деталей;
- 3) с этажерочным (двух- или трехплатным) расположением.

Наиболее распространенные в настоящее время печатные ФУ, в которых используются объемные дискретные элементы и одно- или двусторонние печатные платы.

Рассмотрим геометрические характеристики печатных проводников, определяющие их компоновочные параметры. К таким характеристикам относятся толщина, ширина, длина, форма, размещение, рисунок проводников и зазор между ними. Производные от них будут: прочность изделия, плотность тока, сопротивление, паразитные емкости и индуктивности, тепловые характеристики.

Толщина фольги на фольгированных материалах, так же как и толщина осажденного медного проводника, обычно берется равной 50 мкм. Ширина зависит от величины протекающего тока, связанного с падени-

ем напряжения и перегревом проводника. Величина допустимого тока через печатный проводник равна

$$I = 25ab, \quad (1)$$

где  $I$  – ток через печатный проводник, А;

$a, b$  – толщина и ширина печатного проводника, мм.

При  $a = 0,05$  мм можно считать величину тока в амперах равной ширине проводника в миллиметрах. В этом случае значение перегрева проводника не превышает  $25^{\circ}\text{C}$ .

Принимая величину падения напряжения в печатном проводнике не более  $0,02U$ , получаем:

$$b \geq 20I \cdot l / aU, \quad (2)$$

где  $a, b, l$  – толщина, ширина и длина печатного проводника, мм;

$I$  – рабочий ток, А;

$U$  – номинальное напряжение, В.

В напаянных цепях при  $a = 0,05$  мм;  $U = 6,3\text{В}$ ;  $b \geq 6 \cdot I \cdot l$ . Печатные проводники, как и любые проводники, подвержены влиянию скин-эффекта. Однако для ФУ, работающих на частотах до 100 МГц, увеличение сопротивления не превышает 50%, что легко можно компенсировать применением более широких проводников. Современные ФУ используются в основном в устройствах с малыми напряжениями питания (обычно до 10 В). При напряжениях выше 100 В величина зазора должна выбираться с учетом атмосферного давления.

Расчет минимального расстояния между проводниками при различных методах изготовления определяется по формуле

$$l = 0,5(d_1 + d_2) + n(b + k) + S(n + 1) + c + 2bc, \quad (3)$$

где  $l$  – расстояние между центрами монтажных отверстий, мм;

$d_1, d_2$  – диаметры отверстия или зенковки отверстий, мм;

$n$  – количество проводников;

$b$  – ширина проводника (одинаковая для всех  $n$  проводников);

$k$  – коэффициент учета ширины проводника в процессе изготовления;

$S$  – величина зазора (одинаковая для зазоров между проводниками и контактной площадкой), мм;

$c$  – коэффициент, учитывающий изменение диаметра зенковок в процессе изготовления;

$b_0$  – ширина контактной площадки в узком месте, мм.

Значения  $b, S, k, c, b_0$  берутся из табл. 3.1

Таблица 3.1.

**Диапазон значений величин для расчета  
размещения проводников**

Метод изготовления и класс	Ширина проводника $b$ , мм	Зазор $S$ , мм	Ширина контактной площадки $b_0$ , мм	$k$	$c$
Электрохимический, А	2-1 0,8	1 0,8 0,5	0,5 max	0,2	0,55
Комбинированный, А	2-1 0,6	1 0,6 0,5	0,5 0,3	0,2	0,5
Комбинированный, Б	2-1 0,3	1 0,4 0,3	0,5 0,15	0,2	0,5
Химический, А	2-1 0,5	1 0,6 0,5	0,5 0,2	0,2	0,62
Химический, Б	2-1 0,3	1 0,3 0,3	0,5 0,15	0,2	0,57

В графе  $b$  через тире даются значения ширины проводника в свободных местах, после интервала – в узких местах (минимально допустимые); первое значение  $S$  дает величину зазора между проводниками или контактными площадками в свободных местах, второе – зазор между проводниками, а третье – между контактными площадками в узких местах.

Величина адгезии печатного проводника к основанию не зависит от его формы и приближенно может быть взята равной  $200 \frac{H}{\text{см}^2}$ .

**Порядок выполнения работы**

1. Изучить схему функционального узла.
2. По схеме узла с учетом компоновочных параметров радиокомпонентов изобразить эскиз печатных проводников платы.
3. Выполнить чертеж печатной платы ФУ с учетом требований ГОСТ ЕСКД.

## Контрольные вопросы.

1. Что называется функциональным узлом?
2. Какие вы знаете методы травления фольгированного материала? Дайте определение химическому методу.
3. Когда применяется двусторонний печатный монтаж?
4. Чем определяется плотность компоновки ФУ с печатным монтажом?
5. Чем определяются минимальный и максимальный размеры сторон печатной платы?
6. Какие вы знаете размеры координатной сетки?
7. Какие геометрические характеристики печатных плат проводников вы знаете?
8. Рассчитайте величину допустимого тока через печатный проводник при толщине фольги 50 мкм, если ширина печатного проводника равна 1; 2; 5 мм. При расчете применять значение перегрева проводника, не превышающего  $25^{\circ}\text{C}$ .
9. Определить падение напряжения на печатном проводнике сечением  $50\text{ мкм}\times 1\text{ мкм}$  и длиной 100 мм.
10. Рассчитать минимальное расстояние между проводниками спроектированной печатной платы, если используется электрохимический метод изготовления, класса А.

## Литература.

1. Варламов Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1975.
2. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование РЭА. М.: Высш. шк., 1985.
3. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Вардамова. М.: Сов. радио, 1980.

## Тема 4. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПЕРФОРИРОВАННОГО КОЖУХА

**Цель работы:** ознакомиться с методом расчета теплового режима перфорированного кожуха коэффициентным методом.

### Краткие теоретические сведения

Перенос тепловой энергии из одной части радиоэлектронного аппарата (РЭА) в другую его часть или в окружающую среду будем называть теплообменом РЭА, а его температурное состояние, т.е. пространственно-временное изменение температуры – тепловым режимом РЭА (2).

Процесс переноса тепловой энергии из одной его части пространства в другую осуществляется тремя различными способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Обычно все три способа существуют одновременно и в своей совокупности определяют тепловой режим аппарата.

Перенос тепла в чистом виде происходит в жидкой или газообразной среде, где наблюдается перемещение объемов газов или жидкости относительно друг друга.

Теплообмен излучением характеризуется тем, что часть энергии тела превращается в лучистую энергию и в этой форме переносится в пространстве.

Интерес к проблемам теплообмена объясняется следующим: значительная часть различных форм энергии в РЭА превращается в тепловую, что приводит к повышению температуры деталей в аппарате. Известно, что надежность деталей падает с повышением их температуры. Это может привести к искажению сигнала на выходе аппарата или даже к выходу РЭА из строя. Следовательно, нормальный тепловой режим РЭА является необходимым условием его работы.

Решение вопроса о целесообразности разработки приближенных методов расчета температурных полей РЭА ускоряет создание научных основ конструирования радиоэлектронной аппаратуры. Анализ влияния различных параметров на тепловой режим герметического аппарата позволяет построить приближенную методику расчета. Одним из таких способов является метод расчета теплового режима РЭА в перфорированном кожухе коэффициентным методом.

## Методика расчета теплового режима РЭА в перфорированном кожухе

Коэффициентный метод расчета основан на некоторых закономерностях, полученных в результате множества опытов, показывающих взаимоотношения различных функций и переменных, определяющих тепловой режим РЭА. Все эти закономерности выражаются графиками, которые используются в зависимости от начальных данных и на разных этапах расчета (2).

Начальные данные определяют геометрические размеры аппарата, вентиляционных отверстий и мощность рассеяния. Перегрев нагретой зоны относительно окружающей среды является функцией, зависящей от многих факторов:

$$\Delta t_3 = f(\Delta t_p, K_t, K_K, K_l, K_\epsilon, K_{R3}, K_{R1}, K_{R2}),$$

где  $\Delta t_p$  – базовый перегрев нагретой зоны;

$K_t$  – коэффициент температуры окружающей среды  $t_c$ ;

$K_K$  – коэффициент, зависящий от степени заполненности аппарата;

$K_l$  – коэффициент эквивалентного размера основания корпуса;

$K_\epsilon$  – коэффициент степени черноты;

$K_{R3}$  – коэффициент отношения площади поверхности  $S_3$  нагретой зоны к площади излучающей поверхности нагретой зоны  $S_3$ ;

$K_{R2}$  – коэффициент отношения высоты кожуха к эквивалентному размеру основания;

$K_{R1}$  – коэффициент отношения средней площади отверстий к квадрату эквивалентного размера основания кожуха.

На основании этого методику расчета можно построить следующим образом:

1. Определяем среднюю площадь отверстий

$$S = \sqrt{\frac{3}{\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_u^2} + \frac{1}{S_2^2}}},$$

где  $S_1$  – отверстия в верхней части кожуха;

$S_u$  – отверстия в шасси;

$S_2$  – отверстия в нижней части кожуха.

2. Определяем высоту нагретой зоны

$$h_3 = K_3 h,$$

где  $K_3$  – коэффициент заполнения аппарата;

$h$  – высота кожуха.

3. Определяем реальную площадь нагретой зоны

$$S_3 = 2(h_3 L_2 + L_1 h_3 + L_1 L_2),$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – соответственно длина и ширина кожуха.

4. Определяем эквивалентный размер основания

$$l = \sqrt{L_1 L_2}$$

5. Определяем площадь излучаемой поверхности нагретой зоны

$$S_{3л} = 2l(l + 2k_3 h)$$

6. Находим отношение высоты кожуха к эквивалентному размеру основания

$$R_1 = \frac{h}{l}$$

7. Находим отношение средней площади отверстий к квадрату эквивалентного размера основания

$$R_2 = \frac{S}{l^2}$$

8. Находим отношение  $R_3$

$$R_3 = \frac{S}{S_{3л}}$$

9. Определяем удельный тепловой поток  $P_{уд}$

$$P_{уд} = \frac{P}{S_3}$$

10. Для найденных значений  $P_{уд}, l, R_3, R_1, R_2$  и для заданных  $t_c, k_3, \varepsilon$  определим значения  $\Delta t_p$  и  $K_t, K_K, K_l, K_\varepsilon, K_{R3}, K_{R1}, K_{R2}$  по графикам рис.4.1. соответственно.

11. Определяем перегрев нагретой зоны относительно окружающей среды

$$\Delta t_3 = \Delta t_p K_t K_K K_l K_\varepsilon K_{R3} K_l K_{R1} K_{R2}$$

12. Определяем температуру нагретой зоны

$$t_3 = t_C + \Delta t_3$$

13. Определяем температуру кожуха аппарата

$$t_K = t_C + 0,3\Delta t_3.$$

### Задание к практической работе

Для выполнения расчета температур кожуха и нагретой зоны необходимо задать:

- температуру окружающей среды  $t_C (^{\circ}C)$  ;
- степень черноты наружной поверхности кожуха  $\varepsilon_K$  ;
- размеры кожуха аппарата  $L_1, L_2, h_0 (M)$  ;
- мощность тепловых потерь  $P$  (Вт);
- коэффициент заполнения аппарата  $K_3$  ;
- площади отверстий нагретой зоны, верхней и нижней частей кожуха  $S_1; S_{ш}; S_2$  .

### Оформление отчета

1. Краткая теория по тепловым режимам РЭА.
2. Расчет.
3. Составить таблицу результатов расчета (4.1)
4. Выводы по результатам работы.

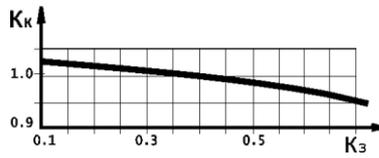
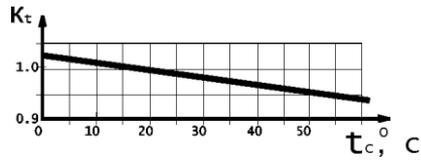
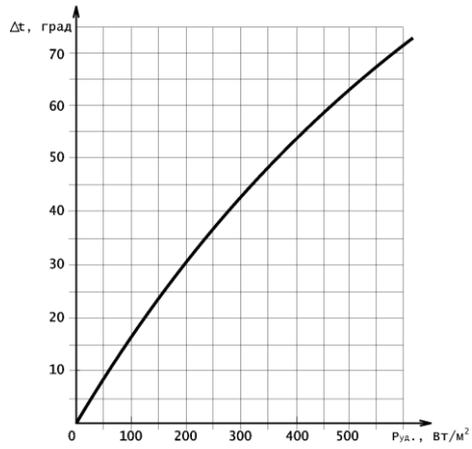
*Примечание.* В качестве примера оформления численных данных приведена таблица. В ней просчитан один из вариантов расчета теплового режима РЭА в перфорированном корпусе (кожухе) коэффициентным методом.

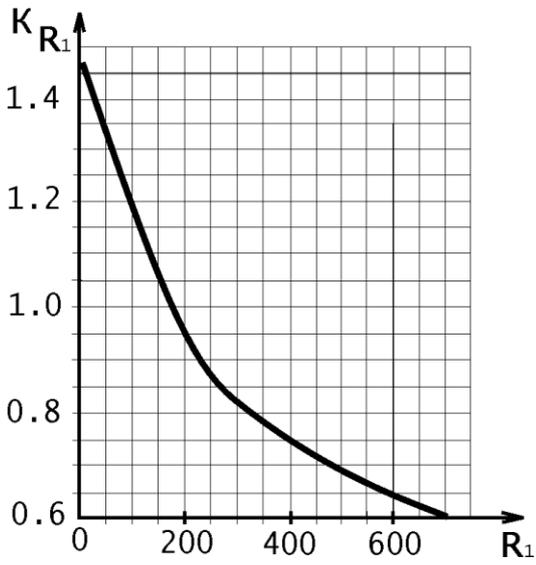
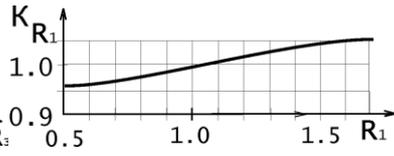
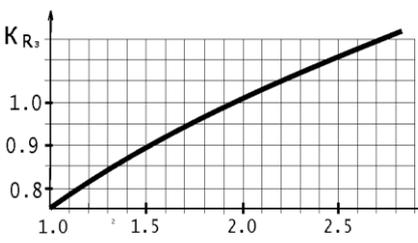
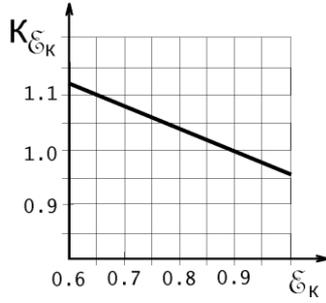
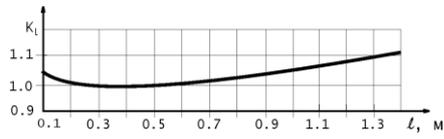
Таблица 4.1.

Таблица результатов

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$L_1$ (м)		$S_2$ ( $M^2$ )		$R_1$		$K_{\varepsilon K}$	
$L_2$ (м)		$S_{III}$ ( $M^2$ )		$R_2$		$K_{R1}$	
$h$ (м)		$\varepsilon_K$		$R_3$		$K_{R2}$	
$S_1$ ( $M^2$ )		$K_3$		$\Delta t_P$ ( $^{\circ}C$ )		$K_{R3}$	
$P$ (Вт)		$P_{вд}$ (Вт)		$K_t$		$\Delta t_3$	
$t_C$ ( $^{\circ}C$ )		$l$ (м)		$K_K$		$t_3$	
				$K_l$		$t_K$	

Рис. 4.1. Графики для расчета температуры нагретой зоны аппарата





## Тема 5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РЭА В ГЕРМЕТИЧНОМ КОЖУХЕ КОЭФФИЦИЕНТНЫМ МЕТОДОМ

**Цель работы:** ознакомиться с методами расчета теплового режима коэффициентным методом.

Коэффициентный метод расчета основан на некоторых закономерностях, полученных в результате множества опытов, показывающих взаимоотношения различных функций и переменных определяющих тепловой режим РЭА. Все эти закономерности от начальных данных и на разных этапах расчета (1).

Начальные данные определяют геометрические размеры кожуха и мощность аппарата. Перегрев кожуха относительно окружающей среды  $\Delta t_K$  определяют мощностью  $P$  и тепловым сопротивлением  $R_{KC}$

$$\Delta t_K = t_K - t_C = PR_{KC},$$

где  $t_K$  и  $t_C$  – температуры кожуха и окружающей среды.

Тепловое сопротивление зависит от множества факторов, отсюда и перегрев кожуха – сложная функция

$$\Delta t_K = \gamma(\Delta t_P, K_S, K_t, K_H, K_\epsilon),$$

где  $\Delta t_P$  – базовый перегрев, определяемый удельным тепловым потоком;

$K_S$  – коэффициент, зависящий от площади поверхности;

$K_t$  – коэффициент, определяемый температурой окружающей среды;

$K_H$  – коэффициент, определяемый величиной давления воздуха;

$K_\epsilon$  – коэффициент, определяемый степенью черноты кожуха.

На основании этих данных методику расчета можно построить следующим порядком.

1. Определяем площадь поверхности кожуха  $S_K$

$$S_K = 2L_1L_2 + 2L_3(L_1 + L_2),$$

где  $L_1, L_2, L_3$  – соответственно высота, ширина и длина кожуха.

2. Определяем удельный тепловой поток  $P_{уд.}$

$$P_{уд.} = \frac{P}{S_K}.$$

3. Далее по графикам на рис.4.1 (а, б) определим базовый перегрев  $\Delta t_P$  и коэффициенты  $K_S, K_t, K_\epsilon, K_H$ .

4. Определяем перегрев кожуха  $\Delta t_K$

$$\Delta t_K = \Delta t_p \cdot K_S \cdot K_l \cdot K_\varepsilon \cdot K_H$$

5. Определяем температуру кожуха  $t_K$

$$t_K = t_C + \Delta t_K$$

Разница температур  $\Delta t_3 = t_3 - t_K$  между нагретой зоной и кожухом является функцией теплового потока, размеров кожуха, его температуры, размеров воздушных зазоров  $h_1$  и  $h_2$  с одной и с другой стороны нагретой зоны, приведенной степени черноты  $\varepsilon_{II}$  и давления  $H$ .

Следовательно, разность температур

$$\Delta t_3 = \gamma(\Delta t_{3p}; K_l; K_h; K_{K3}; K_{h/l}; K_H; K_{\varepsilon II}; K_{t_K}),$$

где  $\Delta t_{3p}$  – базовый перегрев нагретой зоны;

$K_l$  – коэффициент размера основания нагретой зоны;

$K_h$  – коэффициент нагретой зоны;

$K_{K3}$  – коэффициент заполнения кожуха;

$K_{h/l}$  – коэффициент отношения расстояния от кожуха до нагретой

зоны к приведенному размеру основания;

$K_H$  – коэффициент давления;

$K_{\varepsilon II}$  – коэффициент приведенной степени черноты;

$K_{t_K}$  – коэффициент температуры стенок кожуха.

6. Определяем площадь поверхности нагретой зоны  $S_3$

$$S_3 = 2l_1l_2 + 2h(l_1 + l_2),$$

где  $h, l_1, l_2$  – геометрические размеры нагретой зоны.

7. Определяем удельный тепловой поток нагретой зоны

$$P_{уд.з} = \frac{P}{S_3}.$$

8. По графику на рис.4.1 определяем базовый перегрев зоны  $\Delta t_{3p}$  «в» и «г» соответственно горизонтальное и вертикальное шасси.

9. Определяем приведенный размер основания нагретой зоны

$$l = \sqrt{l_1l_2}.$$

10. Определяем отношение высоты нагретой зоны к приведенному размеру:  $\alpha = h_1/l$ .

11. По графику на рис.4.1. определяем коэффициент  $K_{h/l}$ .

12. Определяем объемы кожуха  $V_K$  и нагретой зоны  $V_3$

$$V_K = L_1 L_2 L_3$$

$$V_3 = l_1 l_2 h$$

13. Находим коэффициент заполнения кожуха  $K_{зпл} = \frac{V_3}{V_K}$ .

14. По графику на рис.4.1. определяем коэффициент  $K_{кз}$ , зависящий от  $K_{зпл}$ .

15. Определим приведенную степень черноты  $\varepsilon_{п.} = \varepsilon_K \varepsilon_3$ , где  $\varepsilon_K$  и  $\varepsilon_3$  – соответственно степени черноты кожуха и нагретой зоны.

16. По графику на рис.4.1. определяем коэффициент  $K_{\varepsilon_{п.}}$ .

17. По графикам на рис.4.1. определяем коэффициенты  $K_H, K_{t_K}, K_l, K_h$ .

18. Определяем перегрев нагретой зоны относительно кожуха

$$\Delta t_3 = \Delta t_{зр} K_H K_{t_K} K_l K_{h/l} K_{\varepsilon_{п.}} K_{кз} K_{h_2}$$

19. Определяем температуру нагретой зоны  $t_{H.3.}$

$$t_{H.3.} = t_K + \Delta t_3$$

Теперь, зная температуру нагретой зоны, можно судить, в каком тепловом режиме работают элементы, входящие в пространство нагретой зоны. Тепловой режим во многом определяет надежность, долговечность и качество работы элементов и, следовательно, всего, устройства. При несоответствии температуры нагретой зоны диапазону температур элементов необходимо провести конструктивные изменения аппарата, включая перекомпоновку элементов, изменение размеров кожуха и нагретой зоны, до того случая пока не обеспечится нормальный режим работы аппаратуры.

## Тема 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ И ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

**Цель работы:** ознакомиться с экспериментальными методами определения допусков на выходные параметры электрических схем; исследовать влияние температуры на изменение параметров электрических схем; получить навыки по расчету производственной погрешности и допусков, учитывающих действие температуры.

### Краткие теоретические сведения

Для обеспечения высокой надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) необходимо обеспечить стабильность выходных параметров схем, входящих в ее состав. Под стабильностью понимается минимальное изменение выходных параметров в пределах заданных допусков. Электрические допуски – это такие пределы, в которых должны находиться электрические параметры РЭА согласно требованиям технических условий. Понятие электрического допуска может быть отнесено как к электрическим параметрам устройства в целом, так и к отдельным его составляющим: функциональным узлам, блокам, отдельным схемам. Для установления допуска необходимо оценить отклонение выходного параметра схемы от номинального значения. Если обозначить через  $N$  некоторое значение параметра, а  $N_0$  – номинальное значение этого параметра, то абсолютное отклонение определяется так:

$$\Delta N = N - N_0. \quad (1)$$

Относительное отклонение параметра будет равно

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N - N_0}{N}. \quad (2)$$

Отклонения параметров от номинальных значений вызываются целым рядом причин, обусловленных производственной погрешностью и действием эксплуатационных факторов: температуры, влаги, механических нагрузок, радиации и т. д.

Поэтому отклонение параметров и соответственно допуски принято подразделять на производственные и эксплуатационные.

Производственные погрешности выходных параметров схем являются следствием влияния нестабильности технологических процессов изготовления радиодеталей, а также процессов сборки монтажа схем на этапе производства радиоаппаратуры, производственные отклонения, входящие в схему элементов, будут определять разброс выходных характеристик схемы (устройства) от заданных значений. Для электриче-

ских схем основными источниками производственных погрешностей являются:

- 1) отклонения фактических величин параметров ламп и полупроводниковых приборов от их расчетных значений в данной рабочей точке;
- 2) отклонения фактических величин емкостей, индуктивностей и резисторов от их номинальных значений;
- 3) дополнительные паразитные проводимости, емкости и индуктивности, возникающие при монтаже схем;
- 4) отклонения напряжений источников питания от расчетных (номинальных значений).

Производственным допуском выходного параметра схемы (устройства) называется допуск, ограничивающий поле рассеяния параметра при номинальных условиях.

Эксплуатационные погрешности вызываются действием эксплуатационных факторов. Практика показывает, что основные влияния на изменение параметров схем в период их эксплуатации оказывают температура, влага и старение. Установлено, что температурная нестабильность параметров радиодеталей составляет 60-70%, а нестабильность за счет совместного действия температуры, влаги и старения – 95-98% от общей нестабильности.

Эксплуатационными допусками называются допуски на выходные параметры схемы (устройства), заданные техническими условиями (ТУ) и характеризующие точность работы схемы (устройства) в условиях эксплуатации за определенный промежуток времени.

## **Методы анализа отклонений параметров схем**

Анализ отклонений параметров схем может проводиться статистическим, расчетно-аналитическим и коррекционным методами.

### **1. Статистический метод**

Статический метод основан на статистическом анализе параметров и позволяет получить данные, характеризующие погрешность, обусловленную совместным действием ряда факторов в целом. При этом нельзя получить оценку влияния каждого параметра схемы в отдельности. Статистический метод позволяет оценить погрешность, но не дает возможности раскрыть ее, т.е. определить причинные зависимости. Существенным недостатком этого метода является то, что он применим только для статистической оценки уже существующих схем (конструкций) и не пригоден при разработке новых схем. Это значит, что с помощью статистического метода нельзя решить задачу прогнозирования и обоснованного установления допусков на параметры схем РЭА.

## 2. Расчетно-аналитический метод

Расчетно-аналитический метод основан на влиянии (аналитическим или экспериментальным путем) функциональных зависимостей отклонений выходного параметра от изменения параметров и воздействующих факторов. При этом находится зависимость исследуемого параметра схемы от первичных параметров

$$N = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \quad (3)$$

где  $N$  – исследуемый параметр;

$\alpha_n$  – параметры элементов и воздействующих факторов.

По известной функции (3) определяется зависимость отклонений выходного параметра от отклонений независимых первичных параметров и факторов

$$\Delta N = \alpha(\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_n). \quad (4)$$

Эта зависимость называется уравнением отклонений и позволяет определить погрешность выходного параметра. Анализ и расчет производственной погрешности (по известной зависимости) (4) может производиться тремя методами:

- 1) предельным или методом максимума – минимума,
- 2) вероятностным,
- 3) квадратичного сложения.

Сущность предельного метода заключается в том, что отклонение выходного параметра схемы  $\Delta N$  определяется как арифметическая сумма предельных отклонений. Расчет по этому методу ведется для наихудших сочетаний всех предельных отрицательных отклонений параметров от номинальных значений. Основной недостаток метода в том, что не учитывается случайный характер отклонений, а производится арифметическое сложение максимально возможных предельных отклонений. Поэтому получаются завышенные значения отклонений исследуемого параметра схемы в 1,5-10 раз.

В методе квадратичного сложения отклонения исследуемого параметра определяется путем суммирования квадратов предельных отклонений независимых параметров, т.е.

$$\Delta N = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta\alpha_i)^2}. \quad (5)$$

Недостаток метода заключается в трудности учета и правильного суммирования величин, характеризующих центры группировки отклонений параметров в поле допуска, а также в квадратичном суммировании предельных, а не среднеквадратических отклонений параметров элементов.

Вероятностный метод расчета отклонений параметров оперирует со случайными величинами, что реально отражает процессы возникновения отклонений как результата действия случайных причин в производстве и в процессе эксплуатации. Результаты расчета этим методом весьма близки к фактическим отклонениям выходных параметров схем.

### **3. Корреляционный метод**

Корреляционный метод применяется при наличии корреляционной взаимосвязи первичных параметров, а также в случае, когда имеется корреляционная зависимость выходного параметра от параметров схемы. Для проведения расчетов используется теория корреляции. Этим методом можно с определенной вероятностью определить возможные отклонения, в которых будет находиться исследуемый параметр, если другие статически связанные с ним параметры получают определенные значения.

При анализе корреляционной связи выходного параметра с параметрами входящих в схему элементов корреляционные методы позволяют определить коэффициенты влияния элементов и воздействующих факторов на входной параметр, а также с определенной степенью установить зависимость достоверности параметра от изменения параметров схемы. Корреляционная зависимость характеризуется такой связью между двумя случайными параметрами, когда на изменение одной другая реагирует изменением своего математического ожидания. Корреляционным методом можно проводить анализ отклонений параметров схем, когда удастся выявить корреляционные связи. Этот метод позволяет определить величины отклонений и их рассеяния, а также характер и степень взаимосвязи между ними. Характеристики корреляционной связи вычисляются на основе статистических данных по взаимосвязанным параметрам.

Из рассмотренных методов можно сделать такие выводы:

1) наиболее рациональным способом определения производственных и эксплуатационных отклонений является расчетно-аналитический метод с вероятностным определением числовых характеристик рассеяния параметра в поле допуска;

2) при наличии корреляционной связи необходимо использовать корреляционный метод определения отклонений на основе обработки статистических данных по взаимосвязанным параметрам схемы.

Расчетно-аналитический метод определения производственной погрешности параметров элементов как случайных величин основан на основных положениях теории вероятностей.

Используются следующие положения теории вероятностей:

Любая случайная величина определяется законом распределения, который характеризует связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими вероятностями. Основными характеристиками закона распределения являются: математическое ожидание (центр рассеяния) отклонений величин  $\alpha_i$

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^n \alpha_i P(\alpha_i), \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  – отдельные значения отклонений или середина интервалов в таблице записи изменений;

$$P(\alpha_i) = \frac{m_i}{n} \text{ – частота появления данного отклонения (отношение}$$

$m_i$  данных значений  $\alpha_i$  к общему числу значений  $n$ ).

Среднеквадратическое отклонение или дисперсия, являющееся мерой рассеивания отклонений случайной величины от центра рассеяния, определяют так

$$\sigma(\alpha) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2 P(\alpha_i)}.$$

Удобнее оценивать отклонения параметров в безразмерных величинах, поэтому в качестве характеристики рассеивания целесообразно принять нормированные значения математического ожидания и дисперсии:

$$M\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) = \sum \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i} P\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right),$$

$$D\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) = \sigma^2\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) = \left[\frac{\sigma(\alpha)}{\bar{\alpha}}\right]^2,$$

$$\sigma\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) = \frac{\sigma(\alpha)}{\bar{\alpha}}. \quad (7)$$

Для расчета допусков воспользуемся уравнением для определения отклонений (4) выходного параметра от параметров элементов.

При известной функциональной зависимости  $N = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  для отклонения выходного параметра от номинального значения можно записать

$$N + \Delta N = f(\alpha_1 \pm \Delta\alpha_1, \alpha_2 \pm \Delta\alpha_2, \dots, \alpha_n \pm \Delta\alpha_n) \quad (8)$$

$$\Delta N = \varphi(\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_n). \quad (9)$$

Предположим, что функция (8) имеет все непрерывные производные по  $\alpha_i$  порядка  $n+1$ , ее можно разложить в ряд Тейлора.

$$\begin{aligned} f(\alpha_1 \pm \Delta\alpha_1, \alpha_2 \pm \Delta\alpha_2, \dots, \alpha_n \pm \Delta\alpha_n) &= \\ &= f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \pm \frac{1}{1!} \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i \pm \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \Delta\alpha_i \Delta\alpha_j \pm R_n, \end{aligned}$$

где  $R_n$  – остаточный член ряда Тейлора

$$R_n = \frac{1}{(n+1)!} \alpha^{n-1} f(\alpha_1 \pm m\Delta\alpha_1, \alpha_2 \pm m\Delta\alpha_2, \dots, \alpha_n \pm m\Delta\alpha_n), \quad (10)$$

где  $m$  – некоторое число  $0 < m < 1$ .

Пусть отклонения параметров малы, т. е.  $\Delta\alpha_i \ll \alpha_i$ , тогда в уравнении (10) можно пренебречь членами второго и более высокого порядка и ограничиться двумя членами разложения. В этом случае

$$\begin{aligned} f(\alpha_1 \pm \Delta\alpha_1, \alpha_2 \pm \Delta\alpha_2, \dots, \alpha_n \pm \Delta\alpha_n) &= \\ &= f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) - f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \pm \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i. \end{aligned}$$

Поскольку  $f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , а

$$\begin{aligned} N \pm \Delta N &= f(\alpha_1 \pm \Delta\alpha_1, \dots, \alpha_n \pm \Delta\alpha_n), \\ \Delta N &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial N}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i = \frac{\partial N}{\partial \alpha_1} \Delta\alpha_1 + \frac{\partial N}{\partial \alpha_2} \Delta\alpha_2 + \dots + \frac{\partial N}{\partial \alpha_n} \Delta\alpha_n. \end{aligned} \quad (11)$$

Это уравнение в общем случае называется уравнением чувствительности и практически может быть использовано для расчета отклонений (погрешностей) в абсолютных значениях. Удобнее всего использовать уравнения (11) на величину  $N\alpha_i/\alpha_i$ .

$$\text{Тогда, } \frac{\Delta N \alpha_i}{N \alpha_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial N}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{N} \cdot \frac{\Delta \alpha_i}{\alpha_i}$$

или, обозначив коэффициенты при относительных приращениях параметров элементов через  $B_{\alpha i}$ , получим:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum B_{\alpha i} \frac{\Delta \alpha_i}{\alpha_i}. \quad (12)$$

Коэффициенты являются коэффициентами влияния, характеризующими степень влияния  $\alpha_i$  – того параметра на выходной параметр.

Первый множитель  $\frac{\partial N}{\partial \alpha_i}$  в коэффициенте влияния характеризует ско-

рость изменения параметра  $N$  по отношению  $\alpha_i$ , второй  $\frac{\alpha_i}{N}$  – сравнительную величину этих параметров. В случае сложных функциональных зависимостей вычисление  $B_{\alpha_i}$  становится трудоемким. Тогда можно применить экспериментальный способ определения  $B_{\alpha_i}$ . Из линейности уравнения (12) следует принцип независимости действия отклонений, т.е. возможность оказывать оценку действия каждого отклонения отдельно, полагая, что другие параметры неизменны. Действительно, если  $\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i} = 0$  для всех  $i$ , кроме  $k$ , то уравнение отклонений (погрешностей) примет вид

$$\frac{\Delta N}{N} = B_1 \cdot 0 + B_2 \cdot 0 + \dots + B_n \frac{\Delta\alpha_k}{\alpha_k} + \dots + B_n \cdot 0,$$

$$\frac{\Delta N}{N} = B_n \frac{\Delta\alpha_k}{\alpha_k}; \quad B = \frac{\frac{\Delta N}{N}}{\frac{\Delta\alpha_k}{\alpha_k}}.$$

Имея уравнение отклонений, можно определить дисперсию и математическое ожидание отклонения выходного параметра по формулам (7). Однако для этого нужны численные характеристики распределения погрешностей для каждого из входящих в схему элементов, которые как правило имеются для ограниченного количества элементов. В настоящее время на параметры активных и пассивных элементов задаются допуски в виде половины и среднего значения поля допуска

$$\delta_i \left( \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i} \right) \quad \text{и} \quad \Delta \left( \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i} \right).$$

Для расчета допусков вероятностным методом необходимо связать численные характеристики законов распределения с характеристиками поля допуска. Из рис. 6.1 видно, что среднее значение распределения отклонений

$$M \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) = \Delta \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) + a_i \cdot \delta \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right), \quad (13)$$

где  $a_i$  – коэффициент относительной асимметрии распределения отклонений в поле допуска.

$\delta_i \left( \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i} \right)$  и  $\Delta \left( \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i} \right)$  – половина поля допуска и его среднее значение.

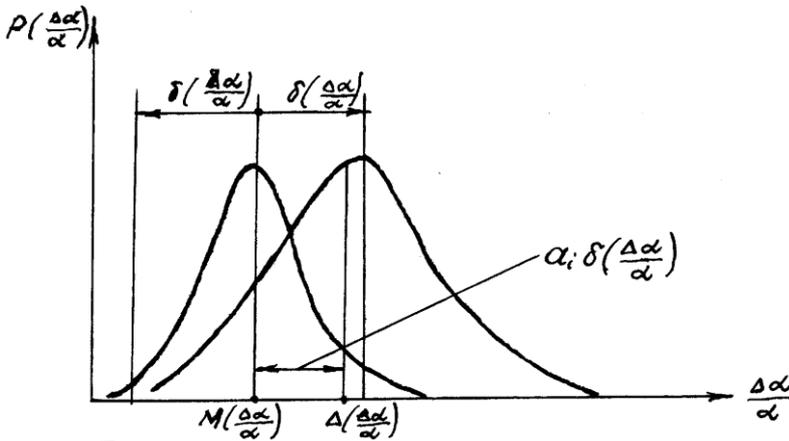


Рис. 6.1. График зависимости нормированных значений частоты и появления данного отклонения от нормированных значений отклонений

$$a_i = \frac{M\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) - \Delta\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)}{\delta\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)}. \quad (14)$$

Из уравнения (12) по правилам суммирования средних значений случайных величин получим для относительной погрешности

$$M\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \sum B_{\alpha i} M\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right). \quad (15)$$

Выразим среднее значение  $M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$  через половину поля допуска

$$M\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \Delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) + a_{\Sigma} \delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \sum_{i=1}^n B_{\alpha i} \left[ \Delta\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right) + a_i \delta\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right) \right]. \quad (16)$$

Из теории вероятностей известно, что при суммировании любого числа ошибок, распределенных по любому симметричному закону, распределение результирующей ошибки тоже будет симметричным. При суммировании ошибок с несимметричными законами распределения результирующее распределение достаточно быстро стремится к симметричному распределению. Поэтому для практических расчетов допусков электрических схем можно принимать значения коэффициента

относительной асимметрии  $a_{\Sigma} = 0$ . Тогда центр группирования отклонений выходного параметра

$$M\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \Delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right),$$

а уравнение (16) примет вид

$$\Delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = M\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \sum_{i=1}^n \left[ \Delta\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right) + a_i \delta\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right) \right]. \quad (17)$$

По правилам суммирования случайных отклонений из уравнения (12) получим формулу для относительной стандартной погрешности

$$\sigma\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n B_{\alpha i}^2 \sigma\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right)}. \quad (18)$$

Обозначив отношение  $\sigma_i/\delta_i$  через  $b_i$  получим

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) b_{\Sigma} = \sqrt{\sum B_{\alpha i}^2 \delta^2\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right) b_i^2}. \quad (19)$$

Ввиду большого разнообразия законов распределения, входящих в схему элементов, целесообразно сравнение этих законов с определенным (эталонным) распределением, в качестве которого принято брать нормальное распределение. Для такого сравнения вводится коэффициент относительного рассеивания  $\alpha_i = b_i/b_{\Sigma}$ ,

где  $b_i$  – относительное рассеивание этой величины;

$b_{\Sigma}$  – относительное рассеивание эталонного (нормального) распределения с центром группирования, совпадающим с серединой поля допуска  $\Delta i$  и со значением  $\sigma_{\Sigma} = \delta_{\Sigma}/3$  с вероятностью 0,997.

Для нормального закона распределения  $b_i = b_{\Sigma} = \frac{1}{3}$ ,  $k_i = k_{\Sigma} = 1$ .

Подставим выражения  $b_i = k_i b_{\Sigma}$  и  $b_{\Sigma} = k_{\Sigma} b_{\Sigma}$  в уравнение (19)

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = k_{\Sigma} b_{\Sigma} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_{\alpha i}^2 \delta^2\left(\frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i}\right) k_i^2 b_{\Sigma}^2}.$$

Сократим на  $b_{\Sigma}$ , получим для  $\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \frac{1}{k_{\Sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_{\alpha i}^2 \delta^2\left(\frac{\Delta \alpha_i}{\alpha_i}\right) k_i^2}. \quad (20)$$

Поскольку распределение величины выходного параметра электронной цепи является суммой распределений параметров элементов (минимальное количество которых для одного каскада равно 4-5), то результирующее распределение выходного параметра схемы будет подчинено нормальному закону (закону Гаусса).

В этом случае при значениях  $\delta_i = 3\sigma_i$  в пределах поля допуска содержится 99,7% всех отклонений параметра от номинального значения, т.е. гарантируется вероятность (надежность) соответствия поля рассеивания расчетным допускам, равная 0,9973. Коэффициент относительного рассеивания при этом  $k_{\Sigma} = 1$ .

В ряде случаев требуется определение допусков с вероятностью, отличной от 0,9973. Тогда половина поля допуска будет отличаться от  $3\sigma$ . Коэффициент  $\frac{1}{k_{\Sigma}}$  в формуле (20) корректирует величину  $\delta$  для

заданной вероятности. Обозначим  $\frac{1}{k_{\Sigma}}$  через  $\gamma$ . Величина  $\gamma$  называется коэффициентом гарантированной надежности обеспечения допусков, значения которого приведены к табл. 6.1.

Таблица 6.1

### Значения гарантированной надежности

$P$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,9973	0,999	0,999	0,999
$\gamma$	0,343	0,383	0,427	0,48	0,55	0,653	0,685	0,718	0,777	0,857	1,0	1,1	1,167	1,3

Определив из уравнений (17) и (20) среднее значение и половину поля допуска, находим пределы поля рассеивания производственных отклонений (погрешностей) выходного параметра, которые и являются пределами производственного допуска.

$$\Delta n_p = M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{np} \pm \delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{np}. \quad (21)$$

Практика показывает, что основное влияние на изменение параметров РЭА в период эксплуатации оказывает температура. Поэтому важно оценить и установить правильный допуск на температурную нестабильность. Решение этой задачи основано на определении температурного ухода выходного параметра схемы за счет температурных уходов параметров элементов. Учет температурных воздействий при расчете электрических допусков схем сводится к определению температурных коэффициентов выходного параметра как функции температурных коэффициентов элементов, входящих в схему. Затем определяется максимально возможная погрешность (температурный допуск) на выходной параметр в диапазоне температур, заданных техническими условиями. Температурные коэффициенты радиоэлементов (ТК) – величины случайные.

В качестве примера на рис. 6.2 приведены гистограммы распределений температурного коэффициента для конденсаторов типа КСО и резисторов типа ВС, построенные по экспериментальным данным.

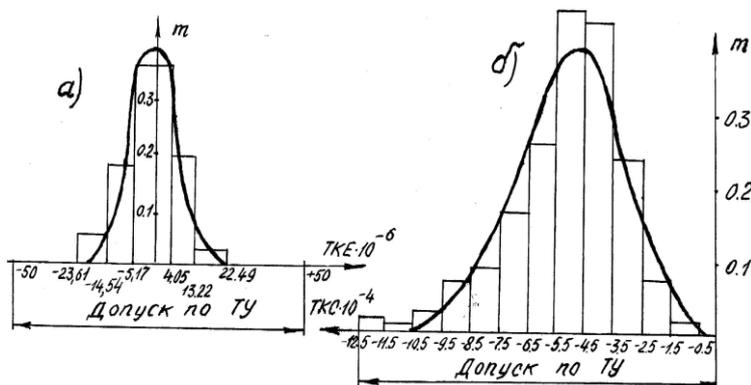


Рис. 6.2. Гистограмма распределения температурного коэффициента:  
а – конденсаторов типа КСО-1-250-Г-680-1; б – резисторов типа ВС-1.

Для сопоставления на гистограммах показаны кривые нормального распределения. Сравнивая практические распределения ТК с нормальным законом, можно сделать вывод, что рассеяние ТК подчинено нормальному закону. Причем поле рассеяния ТК партии элементов всегда меньше поля, оговоренного в ТУ выходного параметра, применение метода «максимум-минимум» приводит к завышенным значениям ТК выходных параметров, а следовательно, к неоправданному увеличению температурных допусков.

Более правильно рассчитывать ТК выходного параметра схемы вероятностным методом. При этом законы распределения температурных коэффициентов можно считать нормальным. Однако на практике нет данных по законам распределения радиоэлементов, в ТУ задаются только предельные значения температурных коэффициентов. В этом случае расчет следует вести из предположения, что распределение температур-

ных коэффициентов радиоэлементов в заданных пределах соответствует нормальному закону. Это предположение несколько снижает точность расчета допусков вероятностным методом. Однако результаты значительно лучше, чем при расчете по методу «максимум-минимум».

Выходной параметр каскада при нормальных условиях (температура окружающей среды  $+20 \pm 5^{\circ}C$ , относительная влажность  $60 \div 70\%$ ) можно рассматривать как функцию многих переменных

$$N = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n).$$

При воздействии температуры величина отклонения параметров схемных элементов  $\Delta\alpha$  от первоначального значения  $\alpha_0$  равна

$$\Delta\alpha_{\phi} = \alpha_0 \beta_{\alpha} \Delta t, \quad (22)$$

где  $\beta_{\alpha}$  – температурный коэффициент параметра;

$\Delta t = t - 20$  – разность между заданной температурой и нормальной ( $= 20^{\circ}C$ ). Выходной параметр получит приращение за счет температурного отклонения параметров элементов, т. е.

$$N_0 + \Delta N = f(\alpha_{1T}, \alpha_{nT}, \alpha_{n0} + \alpha_{nT} - \alpha_{10}). \quad (23)$$

Разложив уравнение (23) в ряд Тейлора и, ограничившись первыми членами разложения для относительного изменения выходного параметра за счет действия температуры, получим

$$\left[ \frac{\Delta N}{N} \right] = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})}{\partial \alpha_{i0}} \cdot \frac{\alpha_{i0}}{f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})} \right] \Delta t, \quad (24)$$

где сомножитель в квадратных скобках представляет собой температурный коэффициент выходного параметра схемы.

Вероятностный метод определения температурных коэффициентов (ТК) выходного параметра схемы основан на представлении температурных коэффициентов (ТК), входящих в схему элементов как случайных величин. При этом определяются численные характеристики температурного коэффициента выходного параметра.

Тогда математическое ожидание ТК выходного параметра, для оценки которого выбрано среднее значение, определяется

$$M \left( \beta_{\Sigma} \right) = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})}{\partial \alpha_{i0}} \cdot \frac{\alpha_{i0}}{f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})} \right] M \left( \beta_{\alpha_{i0}} \right), \quad (25)$$

где  $\beta_{\Sigma}$  – температурный коэффициент выходного параметра;

$M \left( \beta_{\alpha_{i0}} \right)$  – среднее значение температурного коэффициента  $i$ -того параметра.

Среднеквадратическая погрешность температурного коэффициента выходного параметра схемы

$$\sigma_{\beta_{\Sigma}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})}{\partial \alpha_{i0}} \cdot \frac{\alpha_{i0}}{f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})} \right]^2 \sigma_{\alpha_{i0}}^2} \quad (27)$$

При значениях  $\delta_i = 3\sigma_i$  в пределах поля допуска находится 99,73% всех отклонений ТК и 0,27% выходят из них, т. е. гарантируется надежность (вероятность) соответствия поля рассеяния температурного коэффициента расчетным допускам, равная 0,9973. В этом случае выбирается половина допуска  $\delta$ , отличная от  $\sigma$ , а новое значение надежности  $P$ , с которой гарантируется обеспечение расчетных допусков, определяется по формуле интеграла вероятности, который для нормального закона распределения случайных величин имеет вид:

$$P = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \partial\delta. \quad (28)$$

Значения интеграла вероятности определяются по таблицам, приведенным в справочниках по математике.

Однако практически при расчете допусков необходимо определять не гарантированную надежность  $P$  обеспечения допусков, а решать обратную задачу, т.е. находить допуски при заданной надежности. Поэтому удобнее в формулу допусков ввести поправочный коэффициент, учитывающий надежность, с которой должны обеспечить данный допуск. Тогда уравнение (27) примет вид

$$\delta_{\beta_{\Sigma}} = \gamma \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})}{\partial \alpha_{i0}} \cdot \frac{\alpha_{i0}}{f(\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{n0})} \right]^2 \sigma_{\alpha_{i0}}^2} \quad (29)$$

где  $\gamma$  – коэффициент гарантированной надежности обеспечения допусков, значения которого для различных  $P$  приведены в табл. 6.1.

Рассчитав допуски и средние значения температурных коэффициентов выходного параметра схемы по формулам (25) и (28), можно определить предельные значения ТК из соотношения

$$\beta_{\Sigma_{пред}} = M_{\beta_{\Sigma}} \pm \delta_{\beta_{\Sigma}} \quad (30)$$

Крайние значения поля рассеяния температурных погрешностей, соответствующие крайним значениям рабочего (эксплуатационного) температурного диапазона, определяются как

$$\Delta nm_{\pm} = \beta_{\Sigma_{пред}} \cdot \Delta t$$

Затем по полям рассеяния устанавливается величина температурного допуска на выходной параметр схемы по формуле

$$\Delta_{nt} = \left[ \Delta_{T_+} + \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right) \right] \div \left[ \Delta_{T_-} - \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right) \right], \quad (31)$$

где  $\Delta_{nt}$  – предельные отклонения параметра схемы от номинального значения при колебаниях температуры в заданном диапазоне;

$\Delta_{T_+}$  – середина поля температурного допуска при крайней положительной температуре;

$\Delta_{T_-}$  – середина поля температурного допуска при крайней отрицательной температуре;

$\delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)$  – половина поля температурного допуска.

**Пример:** Пусть значение температурного коэффициента

$$\beta_{\Sigma_{npeo}} = (+2 \pm 5) \cdot 10^{-2} \% / \text{град}.$$

Необходимо найти температурный допуск на выходной параметр в диапазоне рабочих температур от  $-60^{\circ}C$  до  $+80^{\circ}C$ .

Определим поля рассеяния:

а) при  $t = -60^{\circ}C$

$$\begin{aligned} \Delta_{nT_-} &= \Delta_{T_-} \pm \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_T = \beta_{\Sigma_{npeo}} \cdot \Delta t = \\ &= (+2 \pm 5) \cdot 10^{-2} (-60 - 20) = (-1,6 \pm 4)\%; \end{aligned}$$

б) при  $t = +80^{\circ}C$

$$\begin{aligned} \Delta_{nT_+} &= \Delta_{T_+} \pm \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_T = \beta_{\Sigma_{npeo}} \cdot \Delta t = \\ &= (+2 \pm 5) \cdot 10^{-2} (+80 - 20) = (-1,2 \pm 3)\%, \end{aligned}$$

отсюда величина температурного допуска

$$\begin{aligned} \Delta_{nT_+} &= \left[ \Delta_{T_+} + \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_+} \right] \div \left[ \Delta_{T_-} - \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_-} \right] = \\ &= \left[ 1,2 + 3 \right] \div \left[ 1,6 - 4 \right] = 4,2 \div -5,6 \%. \end{aligned}$$

В данном примере при колебаниях температуры в заданном диапазоне среднее значение поля рассеяния температурных погрешностей будет изменяться в пределах от  $+1,2$  до  $-1,6\%$ , а половина поля допуска меняться от  $3$  до  $4\%$ .

Распределение температурных погрешностей будет иметь вид, показанный на рис. 6.3.

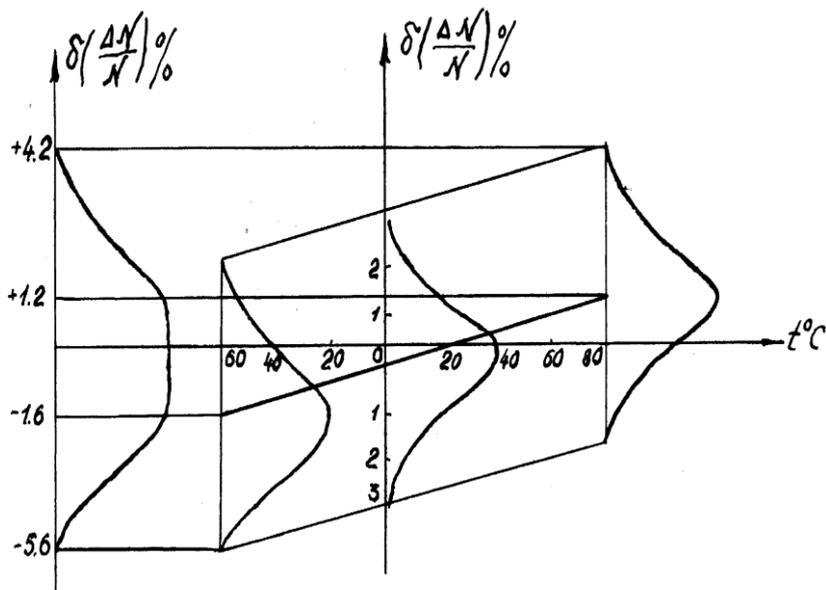


Рис. 6.3. Распределение температурных погрешностей.

Статистический метод анализа отклонений параметров схемы за счет производственных погрешностей и температурных воздействий

Метод основан на использовании аппарата математической статистики. Первым этапом статистического анализа является изучение исследуемого процесса, вторым – выбор контролируемых параметров, объема экспериментов, а также средств технологического контроля. Вопрос о назначении средств технического контроля должен решаться так, чтобы соотношение между предельными погрешностями измерения и допуском на определенный параметр было порядка  $1 \div 10$  и даже  $1 \div 20$ . Измерительные средства должны быть просты в обращении и стабильны во времени. Достоверность результатов исследований зависит не только от средств и методов измерений, но и от техники их выполнения. Необходимо соблюдение идентичности проведения опытов и измерений.

После проведения указанных подготовительных работ производится:

- 1) измерение выходных параметров схемы (узла);
- 2) группирование полученного при измерениях статистического материала;

3) вычисление параметров распределения исследуемой схемы (узла) по данным измерений;

4) анализ полученных параметров распределения.

В большинстве случаев при анализе параметров схем РЭА наиболее часто встречается нормальное распределение отклонений выходного параметра (распределение Гаусса).

Распределение отклонений параметра, как случайных величин, характеризуется математическим ожиданием  $M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$  и дисперсией

$D\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$ . Математическое ожидание случайных величин может оцениваться средним их значением, которое может характеризовать номинальное значение параметра. Дисперсия  $D\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$  или среднеквадратическое отклонение  $\sigma\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$  является мерой рассеяния случайных величин от номинального (среднего) значения.

В заключении покажем, как производится расчет температурного допуска на примере схемы ждущего мультивибратора, схема которого приведена на рис. 6.4.

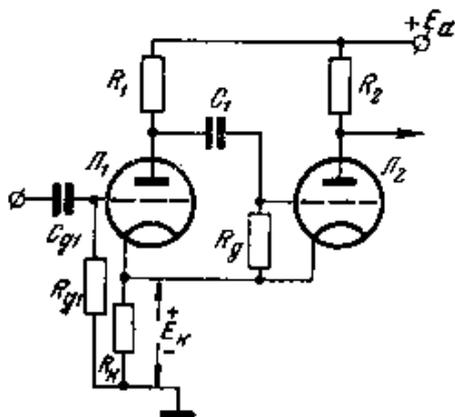


Рис. 6.4. Схема ждущего мультивибратора

$C_1$  – конденсатор КТ-1а-П120-27пФ;

$C_2$  – конденсатор КТ-1а-П120-51пФ;

$R_k$  – резистор МЛТ-1-6,8 кОм;

$R_{a1}$  – резистор МЛТ-1-22 кОм;

$R_{C1}$  – резистор МЛТ-0,5-1 мОм;

$R_{a2}$  – резистор МЛТ-0,5-68 кОм;

$R_{C2}$  – резистор МЛТ-0,5-240 кОм.

Режим работы схемы:  $E=120В$ , анодный ток  $I_{a1} = 3,4mA$ ,  $I_{a2} = 1,4mA$ , коэффициент усиления  $\mu = 21$ , сопротивление постоянному току  $R_{i0} = 30кОм$ , напряжение запираия  $E_{C02} = -5В$ , длительность импульса  $\tau = 34мкС$ . Температурный диапазон от  $-60^0С$  до  $+80^0С$ .

Длительность импульса для такой схемы

$$\tau_u \cong C1 \cdot R_{C1} \cdot \ln \frac{E_a + i_{a1} \cdot R_{a2} - i_{a2} R_k}{E_a - i_{a1} \cdot R_k + E_{C02}} \quad (32)$$

Считая длительность импульса выходным параметрам схемы, по выражению (32) сопоставляем уравнение отклонений (погрешности) по ранее изложенной методике. В результате имеем

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = \frac{\Delta C1}{C1} + \frac{\Delta R_{C1}}{R_{C1}} + 0,85 \frac{\Delta E_a}{E_a} + 0,825 \frac{\Delta R_{a2}}{R_{a2}} + 0,98 \frac{\Delta I_{a1}}{I_{a1}} - 0,134 \frac{\Delta R_k}{R_k} - 0,2 \frac{\Delta I_{a2}}{I_{a2}} - 0,08 \frac{\Delta E_{C02}}{E_{C02}}.$$

Из уравнения видно, что влиянием погрешности  $\Delta E_{C02}$  можно пренебречь, так как ее коэффициент влияния на порядок меньше других. Рассчитаем температурный допуск, который будет определяться изменением емкости конденсатора  $C1$  типа КТ и резисторов  $R_{C1}$ ,  $R_{a2}$ ,  $R_k$  типа МЛТ. Для этих элементов температурные коэффициенты следующие:

$$\beta_{C1} = (\pm 1,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-2} \% \text{ на } 1^0С$$

$$\beta_R = \pm 12 \cdot 10^{-2} \% \text{ на } 1^0С.$$

Ввиду того, что параметры лампы и напряжение источника питания не зависят от температуры, исходное уравнение для расчета имеет вид

$$\left[ \frac{\Delta \tau}{\tau} \right]_T = \frac{\Delta C1}{C1} + \frac{\Delta R_{C1}}{R_{C1}} + 0,825 \frac{\Delta R_{C2}}{R_{C2}} - 0,134 \frac{\Delta R_k}{R_k}.$$

Считая распределение температурных коэффициентов элементов схемы нормальным, определим среднее значение и половину допуска для температурного коэффициента выходного параметра  $\beta_{au}$

$$M \beta_{au} \cong M \beta_{C1} \cong +1,2 \cdot 10^{-2} \% \text{ на } 1^0С;$$

$$\delta \beta_{ai} = 1,1 \sqrt{\delta^2 \beta_{C1} + \delta^2 \beta_{RC1} + \delta^2 \beta_{RC2} + 0,134^2 \delta^2 \beta_{Rk}} =$$

$$= 1,1 \sqrt{(0,3 \cdot 10^{-2})^2 + (1,2 \cdot 10^{-2})^2 + (0,134 \cdot 12 \cdot 10^{-2})^2} = 17,2 \cdot 10^{-2} \%$$

на  $1^0 C$ .

Значение коэффициента  $\gamma = 1,1$  для надежности определения допусков 0,999.

Определим предельное значение ТК выходного параметра

$$\beta_{\text{аннре}} M(\beta_{ai}) \pm \delta(\beta_{ai}) = (+1,2 \pm 17,2) \cdot 10^{-2} \% \text{ на } 1^0 C.$$

Поле рассеяния температурных погрешностей для крайних значений температур

при  $t = -60^0 C$

$$\Delta \text{пред}_- = \beta_{\text{аннре}} \Delta t = (+1,2 \pm 17,2) \cdot 10^{-2} \cdot (-60 - 20) =$$

$$= (-0,96 \pm 13,8) \% = \begin{pmatrix} +11,02 \\ -9,58 \end{pmatrix} \%$$

$$\Delta \text{пред}_- = \beta_{\text{аннре}} \Delta t = (+1,2 \pm 17,2) \cdot 10^{-2} \cdot (80 - 20) =$$

$$= (+0,72 \pm 10,3) \% = \begin{pmatrix} +11,02 \\ -9,58 \end{pmatrix} \%$$

Температурный допуск необходимо рассчитывать для наибольшего поля рассеяния, т. е.

$$\Delta_{nm} = \left[ \Delta T_- + \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_-} \right] \div \left[ \Delta T_- - \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_-} \right] =$$

$$= \left[ 0,96 + 13,8 \right] \div \left[ 0,96 - 13,8 \right] = 12,84 \div -14,76 \%$$

а) Для мультивибратора на полупроводниковых приборах данные таковы:

$T1, T2 - MП41A; R2, R6 - MПТ - 0,5 - 2,2\kappa \pm 5\%$ ;

$R3, R4 - MПТ - 1 - 24\kappa \pm 5\%$ ;

$C1, C2 - MБМ - 0,033 \pm 20\%$ .

б) Для мультивибратора на электронных приборах:

$R1, R4 - MПТ - 0,5 - 1,1\kappa \pm 5\%$ ;  $R2, R3 - MПТ - 1 - 18\kappa \pm 10\%$ ;

$C1, C2 - БМ - 2 - 1000 \pm 20\%$ ;  $C3 - MБМ - 0,1 \pm 10\%$ .

Измерение частоты следования импульсов мультивибраторов производится по фигурам Лиссажу по следующей блок-схеме (рис. 6.5)



Рис. 6.5. – Схема измерения частоты импульсов мультивибраторов

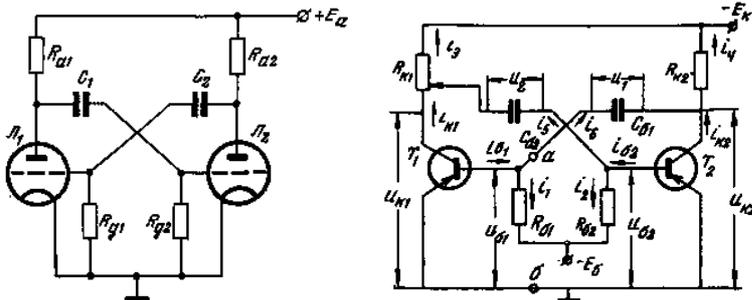


Рис. 6.6. Схемы симметричных мультивибраторов на электронных лампах и транзисторах

Принципиальная электрическая схема лабораторного макета приведена на рис. 6.6. Здесь:

ЛМВ – сборка ламповых мультивибраторов.

ТМВ – сборка транзисторов мультивибраторов.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторным макетом.
2. Зарисовать принципиальную электрическую схему для двух видов мультивибраторов, обозначить на ней элементы с указанием номинальных значений и класса точности.
3. Составить уравнения производственной погрешности на изменение длительности импульсов мультивибраторов на основании следующих расчетных формул:

а) для лампового варианта

$$T = 2R_g \cdot C_g \ln \frac{E_a + I_{a0} \cdot R_a}{E_a + I_{g0}};$$

б) для транзисторного варианта

$$T = 2R_g \cdot C_g \ln \frac{2E_k + I_{k0} \cdot R_g}{E_k + I_{k0} \cdot R_g},$$

где  $R_g, C_g$  – резистор и емкость в цепи сетки лампы 6Н2П,

$E_a$  – напряжение источника питания анода,

$R_a$  – сопротивление нагрузки в цепи анода,

$|E_{g0}|$  – абсолютная величина напряжения смещения,

$I_{a0}$  – постоянная составляющая тока в цепи анода лампы,

$R_{\beta}, C_{\beta}$  – резистор и емкость в цепи базы транзистора,

$E_k$  – напряжение источника питания транзисторов,

$I_{k0}$  – обратный ток коллектора транзисторов (для транзисторов ти-

па МП41А) составляет 4мкА при  $t = 20 \pm 5^{\circ}C$ .

4. Рассчитать среднее значение и половину поля допуска на изменение длительности импульсов мультивибраторов за счет производственной погрешности (предельным или вероятностным методом), а также температурный допуск при изменении температуры от  $20 \pm 5^{\circ}C$  до  $50 \pm 2^{\circ}C$ , считая законы распределения для отклонений выходного параметра схемы (Т) нормальным. Для подключения лабораторного стенда и снятия выходного параметра

5. Включить стенд в сеть 220В.

6. Тумблером «сеть, вкл-откл» включить питание мультивибраторов ламповой и транзисторной схем. Тумблер «обогрев, вкл-откл» поставить в положение «откл».

7. Тумблером «выход, ламповый – транзисторный» включить нужную схему мультивибратора.

8. Для выбранной схемы мультивибратора записать напряжение на аноде 6Н2П или коллекторе транзисторов МП41А, выполнив соответствующее переключение тумблером «0-200В, 0-20В».

9. Выбирая соответствующий номер мультивибратора переключателем «0-10», снять показания термометра.

10. После того как показания для всех мультивибраторов будут сняты, включить обогрев тумблером «обогрев ламповый – транзисторный» нужных схем и снять показания по фигурам Лиссажу на осциллографе, предварительно дав 10-15 минут прогреться схемам и нагреть их до  $30 - 40^{\circ}C$ .

11. Переключив тумблер «обогрев ламповый – транзисторный» в другое положение, проделать то же по п. 4.10. Довести температуру мультивибраторов до  $+50 \pm 2^{\circ}C$ . Провести измерение частот.

12. По результатам измерений в нормальных условиях и при  $t = 50 \pm 2^{\circ}C$  определить числовые характеристики для изменения частоты следования импульсов мультивибраторов, считая закон распределения отклонений и температурных коэффициентов нормальным, т. е. определить  $M_{\left(\frac{T}{T}\right)}$  и  $\sigma_{\left(\frac{T}{T}\right)}$ .

13. Рассчитать поле допуска, обусловленное действием производственных погрешностей и температуры.

14. Рассчитать суммарный допуск на выходной параметр, учитывающий производственную погрешность и воздействие температуры.

15. Сравнить результаты теоретических расчетов с экспериментальными результатами, сделать выводы по работе.

### Содержание отчета

1. Исследуемые схемы.
2. Результаты измерений, представленные в виде статистического ряда.
3. Расчеты производственной погрешности и температурных отклонений выходного параметра схемы (теоретические и экспериментальные).
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие вы знаете методы расчета допусков схемы, дайте им сравнительную характеристику.
2. Дайте определение производственных и эксплуатационных допусков.
3. Как проводится расчет производственных и температурных допусков?
4. В чем сущность экспериментальной оценки отклонений выходного параметра схемы?

### Литература

Гусев В.П., Фоминых А.В. и др. Расчет электрических допусков РЭА. М.: Изд. «Советское радио», 1963.

Фоминых А.В., Обнукин Ю.Г. и др. Надежность радиоустройств летательных аппаратов. М.: Изд.: «Машиностроение», 1968.

Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В. Допуски в РЭА. М.: Изд. «Советское радио», 1978.

# Тема 7. ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА, БЛОКА БРЭА

**Цель работы:** изучить процесс расчета надежности узла, блока БРЭА

## Краткие теоретические сведения

Расчет надежности с использованием экспоненциальной модели отказов. Экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad t > 0. \quad \lambda > 0.$$

Экспоненциальный закон определяется одним параметром  $\lambda$ , представляющим постоянную интенсивность отказов. Верно и обратное утверждение: если интенсивность отказов постоянна, то вероятность безотказной работы как функция времени подчиняется экспоненциальному закону.

Среднее время безотказной работы в этом случае

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda},$$

т.е. равно величине, обратной интенсивности отказов.

Для экспоненциальной модели может быть определена интенсивность отказов последовательно соединенных элементов

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j,$$

где  $\lambda_j$  – интенсивность отказов  $\lambda$ -го элемента.

Расчет вероятности безотказной работы по хаотическим внезапным отказам на основе экспоненциальной модели осуществляется в следующей последовательности:

$I$  – составляется перечень элементов, входящих в узел, блок. ( $j = 1, \bar{n}$ ).

1. Для каждого элемента по справочной литературе определяется интенсивность отказов (минимальное и максимальное значение), задается, а затем рассчитывается значение интенсивности отказов в номинальном режиме.

2. Рассчитываются коэффициенты нагрузки для элементов электрической цепи. Коэффициент нагрузки определяется по формуле  $K_H = \frac{H}{H_H}$  ( $H$  и  $H_H$  – соответствующая электрическая нагрузка в реальном и номинальном режимах).  $K_H$  может быть больше или мень-

ше 1. Для каждого типа элемента он устанавливается по такому параметру, который наиболее влияет на надежность работы исследуемой системы. Для транзисторов  $K_H$  может быть принят как отношение тока коллектора, напряжение К-Б и мощность, рассчитываемая прибором.

3. Определяются поправочные коэффициенты  $K_{j\lambda}$  и рассчитываются интенсивности отказов радиоэлементов с учетом условий их эксплуатации.

4. Рассчитываются интенсивность отказов узла, блока и вероятность безотказной работы БРЭА.

### Содержание отчета

1. Краткая теория расчета надежности.
2. Составная таблица типонаименований элементов.
3. Значение коэффициентов нагрузки для каждого типонаименования.
4. Значение поправочных коэффициентов.
5. Значение полученных результатов расчета среднего времени безотказной работы при минимальной, средней и максимальной интенсивности отказов (табл. 7.1).
6. Обоснование выбора программы из «Меню».
7. Результаты корректировки данных.
8. Графики зависимостей  $P(t)$ .
9. Рекомендации по улучшению надежности блока.

Таблица 4

### Значения вероятностей безотказной работы радиоэлементов в зависимости от интенсивностей отказов

Тип элемента		0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Конденс. негерм слюдян. герм.	20			0,08	0,11	0,22	0,27			
	20			0,06	0,09	0,18	0,23			

Окончание табл. 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Конденсаторы Стекл., плен., металлобум.	20			0,36	0,49	0,64	0,80			
	30			0,38	0,50	0,70	0,94			
Электрич. с алю- мин. анодом	20			0,46	0,40	0,48	0,65			
	30			0,60	0,48	0,60	0,82			
С таланов. анодом	20			0,20	0,20	0,20	0,39			
	30			0,22	0,22	0,22	0,41			
Резисторы непров.	20	0,20	0,26	0,35	0,42	0,50	0,60	0,72	0,84	1,00
	30	0,27	0,34	0,43	0,51	0,62	0,75	0,88	1,07	1,26
Резисторы проволочные	20	0,02	0,02	0,05	0,10	0,20	0,34	0,51	0,73	1,00
	30	0,04	0,04	0,08	0,14	0,26	0,43	0,60	0,81	1,10
Моточные изделия	20		0,10	0,10	0,10	0,20	0,30	0,60	0,80	1,00
	30		0,10	0,10	0,20	0,30	0,60	1,00	1,40	1,60

Таблица 7.2

**Поправочные коэффициенты  $K_{\lambda}$  интенсивностей  
отказов для различных условий эксплуатации**

Условия эксплуатации	вибрации	Уд. нагрузки	При сум. воздействии
лабораторные	1,0	1,0	1,0
стационарные	1,04	1,03	1,07

Таблица 7.3

**Поправочные коэффициенты  
(в зависимости от влажности и температуры)  $K_{\lambda 1}$**

Влажность, %	$C^0$	K
60-70	20-40	1,0
90-98	20-25	2,0
90-98	30-40	2,5

Таблица 7.4

**Поправочные коэффициенты для интенсивностей  
отказов ЭРЭ в зависимости от коэффициента нагрузки  $K_{\alpha \lambda}$**

Наименование, тип элемента		$C^0$	Коэффициенты нагрузки									
транзисторы	кремниевые	20	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
		30	-	0,19	0,22	0,37	0,46	0,55	0,67			
	германиевые	20	0,23	0,26	0,35	0,42	0,5	0,59	0,7			
		30	0,27	0,32	0,45	0,52	0,65	0,83	0,95			
	кремниевые	20	0,77	0,78	0,79	0,81	0,83	0,85	0,88			
		30	0,85	0,85	0,86	0,88	0,9	0,92	0,97			
	германиевые	20	0,15	0,22	0,3	0,39	0,5	0,62	0,74			
		30	0,19	0,26	0,35	0,45	0,55	0,66	0,79			

## Литература

1. Половко А.М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1965.
2. Фролов А.Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Высш. шк., 1970.
3. Астафьев А.В. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. М.: Энергия, 1965.
4. Кузнецов И.А. Основные вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1965.
5. Сыйсков Б.С. Инженерные основы надежности. М., 1969.
6. Широков А.М. Надежность радиоэлектронных устройств. М.: Энергия, 1972.

## СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Расчет компоновочных параметров узлов и блоков БРЭА .....	1
Краткие теоретические сведения .....	3
Контрольные вопросы .....	12
Литература.....	12
Тема 2. Исследование механизмов настройки радиоприемников.....	13
Краткие теоретические сведения .....	13
Порядок выполнения работы.....	17
Контрольные вопросы .....	17
Литература.....	17
Тема 3. Расчет и основы конструирования печатных плат функциональных узлов (ФУ) БРЭА.....	18
Краткие теоретические сведения .....	18
Порядок выполнения работы.....	21
Контрольные вопросы .....	22
Литература.....	22
Тема 4. Расчет теплового режима перфорированного кожуха .....	23
Краткие теоретические сведения .....	23
Задание к практической работе .....	26
Оформление отчета .....	26
Тема 5. Методика расчета теплового режима РЭА в герметичном кожухе коэффициентным методом .....	30
Тема 6. Исследование выходных характеристик при нормальном режиме и при повышенной температуре	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Краткие теоретические сведения .	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Содержание отчета .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Контрольные вопросы .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Литература.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Тема 7. Исследование надежности узла, блока БРЭА	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Краткие теоретические сведения .	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Содержание отчета .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Литература.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

Учебное издание

**Накрайников Владимир Иванович**

**ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА РЭС**

Учебно-методическое пособие

Редактор Л.И. Александрова  
Корректор Л.З. Анипко  
Компьютерная верстка А.С. Головченко

Лицензия на издательскую деятельность ИД № 03816 от 22.01.2001

Подписано в печать 11.04.2003. Формат 60×84/16.  
Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,49  
Уч.-изд. л. 2,9 Тираж экз. Заказ

---

Издательство Владивостокского государственного  
университета экономики и сервиса  
690600, Владивосток, ул. Гоголя, 41  
Отпечатано в типографии ВГУЭС  
690600, Владивосток, ул. Державина, 57

