

ББК 32.844
С74
УДК 621.396.002(031)

Н. А. Барканов, Б. Е. Бердичевский, Р. Г. Варламов, П. Д. Верхопятницкий, Г. И. Веселов, И. В. Глушицкий, В. М. Городилин, А. П. Грачев, Л. А. Казаков, В. И. Казанцев, С. Г. Какоткин, В. И. Киселев, Ю. В. Маркеев, В. Н. Митрохин, О. Н. Носов, И. П. Плево, Е. С. Попова, А. И. Фефер, Г. Е. Худяков, В. Г. Шамардин, М. В. Шеремет

Рецензенты: В. А. Алексеев, И. Н. Букреев, И. П. Бушминский, Ю. С. Варганян, В. С. Латинский, К. В. Лебедев, А. И. Миклаков, Б. П. Никонов, П. И. Овсищев, А. И. Пименов, А. Г. Подольский, Ю. А. Савицкий, В. Г. Шамардин, А. В. Шитяшин

Редакция литературы по конструированию
и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры

Справочник конструктора РЭА: Компоненты, механизмы, надежность/Н. А. Барканов, Б. Е. Бердичевский, П. Д. Верхопятницкий и др.; Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с., ил.

В пер.: 2 р. 40 000 экз

Рассмотрены конструкции и монтаж дискретных компонентов и микросхем. Описаны статические, динамические и кинематические расчеты элементов механизмов и устройств РЭА. Приведены конструкции СВЧ трактов, антенн, узлов электроакустических устройств, систем охлаждения. Даны рекомендации по оптимизации, повышению надежности и качества. Данный справочник является логическим продолжением книги «Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования», выпущенного издательством «Советское радио» в 1980 г.

Для инженеров-конструкторов радиоэлектронной аппаратуры.

С $\frac{240100000-037}{046(01)-85}$ 82-84

ББК 32.844
6Ф2.1

© Издательство «Радио и связь», 1985

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ

Справочник является третьей, завершающей книгой серии справочных книг конструктора РЭА, первая из которых «Краткий справочник конструктора РЭА» была выпущена издательством «Советское радио» в 1972 г. и адресована учащимся и преподавателям вузов и техникумов, квалифицированным радиолюбителям и, частично, работникам промышленности. Положительные отзывы специалистов-конструкторов об этой книге послужили основанием для подготовки нового справочного издания в двух томах, первый из которых «Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования» вышел в свет в 1980 г.

Предлагаемое издание «Справочник конструктора РЭА: Компоненты, механизмы, надежность» посвящено в основном характерным компонентам РЭА. Материал разделен на четыре части: монтаж компонентов; механизмы РЭА; характерные узлы РЭА; оптимизация, надежность, качество.

По содержанию этот том имеет более практическую направленность, чем первый (больше таблиц, графиков, схем). Сокращения и обозначения, таблицы и иллюстрации выполнены по тому же принципу, что и раньше. Единицы физических величин приведены в СИ. В тех случаях, когда сложившаяся практика, а так-

же отраслевые директивные документы допускают применение технических систем единиц, данные в Справочнике приведены с пересчетными коэффициентами в СИ или наоборот.

Замечания и пожелания читателей помогут оценить правильность структуры справочного издания и дадут возможность в будущем более рационально планировать состав и объем отдельных частей таких изданий. Авторы надеются, что данный Справочник будет полезен конструкторам промышленности и студентам радиотехнических специальностей в их практической деятельности.

В написании книги приняли участие: Н. А. Барканов — гл. 1; Е. С. Попова, Ю. В. Маркеев, В. Г. Шамардин — гл. 2; А. П. Грачев — гл. 3; С. Г. Какоткин — гл. 4; Л. А. Казаков — гл. 5; И. П. Плево, Г. Е. Худяков — гл. 6; О. Н. Носов — § 7.1, 7.2, 7.4—7.6, 7.10, 7.11; В. И. Казанцев — § 7.8, 7.9; Г. И. Веселов, М. В. Шеремет — § 7.7 и совместно с О. Н. Носовым § 7.3; В. Н. Митрохин совместно с О. Н. Носовым — § 7.12; В. И. Киселев, И. В. Глушицкий — гл. 8; В. М. Городилин, Р. Г. Варламов — гл. 9; А. И. Фефер — гл. 10; Б. Е. Бердичевский — гл. 11; П. Д. Верхопятницкий — гл. 12.

Отзывы просьба направлять в издательство «Радио и связь» по адресу: 101000, Москва, Почтамт, а/я 693.

А. МОНТАЖ КОМПОНЕНТОВ

1. КОНСТРУКЦИЯ И МОНТАЖ МИКРОСХЕМ И ЭРЭ

Основные аббревиатуры

БИС	— большая интегральная микросхема (микросхема большой степени интеграции)
БПП	— бескорпусный полупроводниковый прибор или микросхема
ГИС	— гибридная интегральная микросхема
КМ	— керамический микрокорпус
КЭ	— конструктивный элемент (конструктив)
МИС	— микросхема малого уровня интеграции
МПП	— многослойная печатная плата
МС	— микросборка
ПП	— печатная плата (одно- и двусторонняя)
ППП	— полупроводниковый прибор
СБИС	— сверхбольшая интегральная микросхема (микросхема сверхбольшой степени интеграции)
СИС	— микросхема среднего уровня интеграции
ТУ	— технические условия
ФЯ	— функциональная ячейка
ЭРЭ	— электрорадиоэлемент (обычно навесного типа)

1.1. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ И ДИСКРЕТНЫЕ ЭРЭ

Терминология

Для интегральных микросхем основные термины регламентируются ГОСТ 17021—75 «Микросхемы интегральные. Термины и определения».

по которому они могут быть: полупроводниковыми (все элементы выполнены в объеме и на поверхности монокристаллической полупроводниковой пластины); пленочными (все элементы выполнены в виде пленок различных материалов, нанесенных на диэлектрическую подложку); гибридными (микросхемы, содержащие кроме элементов компоненты или кристаллы); корпусированными (основание микросхемы с элементами защищено внешней оболочкой); бескорпусными; аналоговыми (микросхемы, предназначенные для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции); цифровыми (микросхемы, предназначенные для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции).

Микросхемы, разрабатываемые и изготавливаемые разработчиками РЭА для собственных нужд, называются микросборками. На МС требования различных стандартов, разработанных на микросхемы, как правило, не распространяются.

Элементом микросхемы называется часть, реализующая функцию какого-либо ЭРЭ, выполненная нераздельно от кристалла или подложки и не существующая как самостоятельное изделие.

Компонент микросхемы — часть микросхемы, реализующая функции какого-либо ЭРЭ и изготавливаемая как самостоятельное изделие.

Кристалл — часть интегральной пластины (ЧИП), в объеме и на поверхности которой сформированы все элементы, межэлементные соединения и контактные площадки. Иными словами, кристалл — это бескорпусная полупроводниковая ИС без выводов (роль выводов выполняют контактные площадки).

Корпус микросхемы — часть кон-

струкции, предназначенная для защиты элементов (компонентов, кристаллов) от внешних воздействий и для соединения с внешними электрическими цепями посредством выводов.

Серия микросхем — совокупность типов микросхем, выполняющих различные функции, но имеющих одинаковое конструктивно-технологическое исполнение и предназначенных для совместного применения.

Плотность упаковки микросхемы (отношение числа элементов и компонентов микросхемы к ее объему без учета объема выводов) может достигать для корпусированных микросхем: нескольких сотен на кубический сантиметр для гибридных и нескольких тысяч на кубический сантиметр для полупроводниковых.

Степень интеграции (показатель сложности) микросхемы характеризуется числом содержащихся в ней элементов и компонентов по четырем градациям.

Интегральная микросхема малого уровня интеграции (МИС) — микросхема, содержащая элементы и (или) компоненты в следующих количествах: до 100 — для цифровых микросхем и до 30 — для аналоговых.

Интегральная микросхема среднего уровня интеграции (СИС) — микросхема, содержащая элементы и (или) компоненты в следующих количествах: свыше 100 до 1000 — для цифровых микросхем на МОП-структурах, свыше 100 до 500 — для цифровых биполярных микросхем и свыше 30 до 100 — для аналоговых.

Большая интегральная микросхема (БИС) — микросхема, содержащая элементы и (или) компоненты в следующих количествах: свыше 1000 до 10 000 — для цифровых микросхем на МОП-структурах, свыше 500 до 2000 — для цифровых биполярных и свыше 100 до 300 — для аналоговых микросхем.

Сверхбольшая интегральная микросхема (СБИС) — микросхема, содержащая элементы и (или) компоненты в следующих количествах: свыше 10 000 — для цифровых микросхем на МОП-структурах, свыше 2000 — для цифровых биполярных микросхем и свыше 300 — для аналоговых.

Термины, используемые при применении полупроводниковых приборов, регламентируются ГОСТ 15133—77 «Приборы полупроводниковые. Тер-

мины и определения». Основными терминами являются следующие.

Полупроводниковый прибор (ППП) — прибор, действие которого основано на использовании свойств полупроводника.

Полупроводниковый блок — совокупность ППП, соединенных по определенной электрической схеме и собранных в единую конструкцию.

Набор полупроводниковых приборов — совокупность ППП, собранных в единую конструкцию, не соединенных электрически или соединенных по одноименным выводам.

Бескорпусной полупроводниковый прибор — ППП, не защищенный корпусом и предназначенный для использования в ГИС, микросборках и герметизированных блоках и РЭА.

Вывод полупроводникового прибора — элемент конструкции корпуса ППП, необходимый для соединения соответствующего электрода с внешней электрической цепью.

Электрический переход — переходный слой в полупроводниковом материале между двумя областями с различными типами электропроводности или различными значениями удельной электрической проводимости. Одна из областей может быть металлом. Переходы могут быть: электронно-дырочными, электронно-электронными, дырочно-дырочными, резкими, плавными, плоскостными, точечными, планарными, сплавными, эпитаксиальными, гомогенными, гетерогенными, омическими, выпрямляющим и др.

Базовая область — область ППП, в которую инжектируются неосновные для этой области носители заряда.

Эмиттерная область — область ППП, назначением которой является инжекция (введение) носителей заряда в базовую область.

Коллекторная область — область ППП, назначением которой является экстракция (сбор, улавливание) носителей из базовой области.

Система условных обозначений

Условное обозначение микросхемы состоит из четырех элементов: первый элемент — цифра, обозначающая группу по конструктивно-технологическому исполнению; второй элемент — две или три цифры, обозначающие регистрационный номер раз-

работки серии микросхем; третий элемент — две буквы, обозначающие подгруппу и вид ИС по функциональному назначению; четвертый элемент — условный номер разработки конкретной микросхемы.

По конструктивно-технологическому признаку микросхемы делятся на три группы, которые обозначаются цифрами: 1, 5, 6, 7 — полупроводниковые, 2, 4, 8 — гибридные, 3 — прочие микросхемы (пленочные, вакуумные, керамические и др.).

Микросхемы, используемые в устройствах широкого применения, в начале обозначения имеют букву К; микросхемы, поставляемые на экспорт, с шагом 1,27 или 2,54 мм — Э; бескорпусные — Б.

Пример условного обозначения: КВ133ЛА1 — бескорпусная микросхема широкого применения 133 серии.

Условное обозначение ППП состоит из пяти элементов. Первый элемент обозначения (буква или цифра) определяет полупроводниковый материал, из которого изготовлен прибор: германий или соединения германия — Г или 1; кремний или соединения кремния — К или 2; соединения галлия — А или 3; соединения индия — И или 4. Второй элемент — буква, определяющая подкласс (или группу) приборов: диоды — Д, выпрямительные столбы и блоки — Ц, варикапы — В, стабилизаторы напряжения — С, диодные тиристоры — Н, тринодные тиристоры — У, биполярные транзисторы — Т, полевые транзисторы — П. Третий элемент — цифра, определяющая назначение (параметры или принцип действия) прибора. Четвертый элемент — двузначное (в новых разработках трехзначное) число, обозначающее порядковый номер разработки прибора. Пятый элемент — буква, определяющая классификацию по параметрам прибора.

Пример условного обозначения: КТ3148А — кремниевый транзистор малой мощности СВЧ, номер разработки 148, группа А.

Габаритно-присоединительные размеры

Габаритно-присоединительные размеры микросхем устанавливаются ГОСТ 17467—79 «Микросхемы интегральные. Основные размеры». Стаи-

дарт распространяется на все микросхемы в корпусах, кроме изделий СВЧ диапазона (СВЧ модули).

По форме проекции тела корпуса микросхем на плоскость основания и расположению выводов корпуса делятся на типы и подтипы согласно табл. 1.1.

Условное обозначение корпуса при записи в конструкторской документации должно состоять из слова «Корпус», типа корпуса (первая цифра), подтипа (вторая цифра), порядкового номера типоразмера (третья и четвертая цифры). После точки записывают число выводов, а через дефис — порядковый регистрационный номер корпуса с указанием номера ГОСТ.

Пример условного обозначения прямоугольного корпуса с двумя рядами выводов первого типоразмера, с 14 выводами, пятой модификации: Корпус 2101.14-5 ГОСТ 17467—79.

Габаритные и присоединительные размеры ППП определяются ГОСТ 18472—82 «Приборы полупроводниковые. Корпуса. Габаритные и присоединительные размеры». Он не распространяется на оптоэлектронные приборы, селеновые выпрямительные диоды, термисторы, варисторы, варикапы, диодные и транзисторные наборы, импульсные приборы с импульсным током свыше 100 А, выпрямительные диоды и тиристоры с прямым постоянным током свыше 10 А. Габаритные и присоединительные размеры выпрямительных полупроводниковых столбов и блоков регламентируются ГОСТ 19613—80 «Столбы и блоки выпрямительные полупроводниковые. Основные размеры».

Условное обозначение корпуса ППП состоит из буквы К (обозначает корпус), буквы Д или Т (для диодов и транзисторов соответственно) и цифр через дефис, определяющих порядковый номер. Пример условного обозначения: КД-27 — корпус диода, порядковый номер 27.

Современные микросхемы с высокой плотностью упаковки

Повышение функциональной сложности РЭА при сохранении ограничений по массе и габаритам предполагает расширение применения бескорпусных полупроводниковых микросхем. Одновременно предъявляются дополнительные требования к конструкции бескорпусных микросхем

Таблица 1.1

Тип	Подтип	Форма проекции тела корпуса на основание	Расположение проекции выводов на плоскость основания	Расположение выводов относительно плоскости основания	Шаг выводов, мм
1	11	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное в один ряд, в два ряда, в три ряда и более, по периметру	2,5
2	21 22	Прямоугольная — » —	За пределами проекции тела корпуса То же	Перпендикулярное в два ряда Перпендикулярное в четыре ряда в шахматном порядке	2,5 1,25 и 2,5
3	31 32 33	Круглая Овальная Круглая	В пределах проекции тела корпуса То же За пределами проекции тела корпуса	Перпендикулярное по одной окружности То же — » —	Под углом 360°/n, где n — число выводов
4	41 42	Прямоугольная — » —	За пределами проекции тела корпуса То же	Параллельное по двум противоположным сторонам Параллельное по четырем сторонам	1,25 и 0,625
5	51	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное для боковых выводов площадок; в плоскости основания перпендикулярное для нижних выводных площадок	1 и 1,25

Типы и подтипы корпусов ИС

для обеспечения автоматизации сборки и монтажа их в ГИС и микро сборки.

Современные бескорпусные микросхемы могут иметь следующие конструкции кристаллов: без выводов (функции выводов выполняют металлизированные контактные площадки кристаллов); с гибкими золотыми или алюминиевыми проволочными выводами диаметром 35...50 мкм; с гибкими ленточными выводами на диэлектрическом пленочном носителе (микросхемы на ленточном носителе); с жесткими шариковыми, балочными или столбиковыми выводами.

Наименьшую площадь для установки в ГИС или МС требуют кристаллы с жесткими выводами, удобные для автоматизированной сборки. Однако надежность таких бескорпусных микросхем не удовлетворяет современным требованиям. Отечественный и зарубежный опыт применения кристаллов с жесткими выводами показывает, что переходное сопротивление между пленочной алюминиевой контактной площадкой кристалла и выращенным гальваническим методом медным или золотым столбиком с течением времени увеличивается, что приводит к нарушению нормальной работы микросхемы или даже полному отказу. Поэтому микросхемы с шариковыми, балочными и столбиковыми выводами не могут применяться в аппаратуре, к которой предъявляются жесткие требования надежности и большого срока службы. Чаще они применяются в аппаратуре бытового назначения.

Кристаллы без выводов для соединения с другими электрическими цепями узлов и блоков РЭА требуют присоединения металлических выводов — гибких проволочных или гибких ленточных. Гибкие проволочные выводы позволяют получать высоконадежные переходные контакты на кристалле, поэтому кристаллы с гибкими проволочными выводами широко применяются при создании РЭА высокой надежности, как специальной, так и широкого промышленного и бытового применения. Чтобы присоединить гибкие проволочные выводы к кристаллу, в промышленности используются полуавтоматические сварочные установки, позволяющие производить сотни и тысячи сварок в час, обеспечивая надежное соединение. Однако изготавливать

как самостоятельные изделия кристаллы БИС и СБИС с гибкими проволочными выводами технически и экономически нецелесообразно, так как при числе выводов более 14 ... 16 затрудняется жесткая ориентация проволочных выводов в пространстве, что не позволяет автоматизировать установку бескорпусных БИС и СБИС с гибкими проволочными выводами в ГИС и МС.

Поэтому способ присоединения кристаллов с помощью гибких проволочных выводов может быть использован, когда необходимо в короткие сроки разработать узел РЭА с максимальной плотностью компоновки, используя в качестве элементной базы выпускаемые электронной промышленностью кристаллы малой степени интеграции без выводов.

Кристаллы с гибкими ленточными выводами наиболее удобны для автоматизированной сборки и монтажа ГИС и МС. Для фиксации в пространстве гибких ленточных выводов они изготавливаются в виде системы проводников, объединенных общим гибким диэлектрическим основанием.

Гибкие носители дают возможность: автоматизировать процесс сборки ГИС и МС, производить контроль и электрические испытания кристаллов непосредственно в процессе производства ГИС и МС у потребителя; значительно повысить процент выхода годных ГИС и МС, отказаться от применения дорогих золотых проводников.

К материалу ленточных носителей предъявляются весьма жесткие требования, особенно при увеличении размеров ленточных носителей, материал которых не должен давать усадки и изменять свои свойства при длительном хранении и при технологических воздействиях по установке и присоединению кристаллов. Коэффициенты термического расширения диэлектрической пленки и металлической фольги должны быть близки друг к другу.

Недостатком конструкций бескорпусных ИС с ленточными выводами является повышенное тепловое сопротивление между кристаллом и платой ГИС или МС, на которую монтируются кристаллы. Поэтому использовать ленточные носители при создании бескорпусных микросхем целесообразно при малой рассеиваемой мощности в кристалле, что имеет ме-

сто только в кристаллах с малой степенью интеграции.

Ленточные носители успешно могут применяться как промежуточные конструкции при изготовлении МС с использованием кристаллов без выводов. В этом случае кристалл, установленный на ленточный носитель, может быть проверен по электрическим параметрам, как статическим, так и динамическим, что исключает возможность установки в МС дефектных кристаллов и существенно снижает требования к ленточному носителю и к защите кристалла.

Таким образом, бескорпусные микросхемы с гибкими проволочными выводами наиболее надежны, но неудобны для автоматизированного монтажа. Бескорпусные микросхемы с шариковыми, столбиковыми, балочными и ленточными выводами в настоящее время не обладают требуемой надежностью, но удобны для автоматизированного монтажа.

Поиски новых, удобных для автоматизации и обеспечивающих высокую надежность конструкций микросхем с высокой плотностью упаковки привели к созданию микрокорпусов — керамических кристаллоносителей и корпусов «миниДип». Керамические микрокорпуса обеспечивают отличную герметизацию, аналогичную металло-керамическим корпусам, и по сравнению с корпусами других типов выигрывают по массе, габаритам, коэффициенту использования объема, тепловым и электрическим характеристикам.

Наиболее очевидным преимуществом КМ является их малые размеры. Так, микросхема в КМ с 18 выводами занимает площадь на плате узла РЭА в 3 раза меньше, а с 64 выводами — в 6 раз меньше, чем аналогичные по числу выводов ИС в металло-керамических корпусах (для «безвыводных» корпусов). Высокое качество герметизации кристаллов и отсутствие на поверхности кристаллов каких-либо лаков или компаундов (в отличие от бескорпусных микросхем с проволочными или ленточными выводами) обеспечивают высокую надежность кристаллов в КМ.

Конструкция КМ удобна для автоматизированной сборки и их монтажа в МС, узлы и блоки РЭА; позволяет осуществлять автоматизированную проверку микросхемы по электрическим параметрам (статиче-

ским и динамическим) перед установкой ее на плату. При этом изменяются истинные динамические параметры микросхемы, без поправки на дополнительную длину и емкость выводов (в отличие от измерения параметров у бескорпусных ИС на ленточных носителях).

Керамический микрокорпус за счет более коротких токопроводящих дорожек, меньшего их сопротивления и межвыводной емкости улучшает электрические параметры микросхемы, позволяет реализовать более высокие быстродействие, обеспечивает лучшие тепловые характеристики микросхемы (за счет малого теплового сопротивления эвтектического (а не клевого) слоя, с помощью которого кристалл крепится к металлизированной площадке основания корпуса).

Площадь, занимаемая микросхемой в КМ на плате, при числе выводов до 16 примерно равна площади, занимаемой бескорпусной микросхемой на ленточном носителе. При увеличении числа выводов плотность установки микросхем на коммутационной плате выше для микросхем в КМ.

Аналогичными преимуществами (за исключением надежности) обладают и пластмассовые микрокорпуса («миниДип»), предназначенные в основном для герметизации микросхем широкого применения.

Возможны 20 типоразмеров керамических микрокорпусов как «безвыводных» (типа 5), так и с выводами (типа 4), с числом выводов от 14 до 84. Шаг выводов установлен 1 мм. Корпуса квадратные, размер сторон от 6,8 до 24,0 мм, толщина корпусов 2,5 мм. Два типоразмера корпусов — прямоугольные (9×12 и 12,5×17,5 мм) на 26 и 52 вывода с шагом 0,625 мм.

Предусмотрены также пластмассовые микрокорпуса 8 типоразмеров с шагом 1,25 мм. Число выводов от 4 до 16, длина корпусов от 2,5 до 10 мм, высота 2, ширина 5 мм.

При монтаже микросхем в «безвыводных» КМ в узлах и блоках РЭА могут возникать вопросы о совместимости материалов носителей и соединительных плат. При монтаже ЭРЭ на ПП давно встала проблема, связанная с различием тепловых коэффициентов расширения. Из-за этого различия в местах присоединения деталей, непосредственно запаянных в плату, могут возникать трещины и

изломы. При использовании в РЭА микросхем в корпусах типа ДИП эта проблема решена, так как достаточно прочные и упругие металлические выводы корпусов демпфируют механические напряжения в местах пайки выводов. Однако проблема совместности материалов становится актуальной при установке на ПП микросхем в «безвыводных» КМ. В настоящее время не существует однозначного мнения по этому вопросу.

Ожидается, что к концу 80-х годов «безвыводные» КМ заменят современные стандартные корпуса с двухрядным расположением выводов и станут доминирующей конструкцией БИС. Основные факторы при этом — меньшие габаритные размеры, масса и стоимость.

Керамические корпуса с выводами могут устанавливаться как на керамические, так и на стеклооксидные платы, однако при этом плотность установки микросхем на плате будет на 20...30% меньше, чем для «безвыводных» КМ.

Условия эксплуатации

Микросхемы должны сохранять электрические параметры и конструкцию в условиях воздействия на них: нижнего значения температуры, выбираемого из ряда минус 10, 45, 60°С; верхнего значения температуры, выбираемого из ряда 55, 70, 85, 100, 125°С; смены температур от верхнего до нижнего значения; влажности до 98% при температуре 35°С; давления от $2,7 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^6$ Н/м².

Полупроводниковые приборы должны сохранять электрические параметры и конструкцию в условиях воздействия на них: температуры от —40 до +55 или от —60 до +70°С для германиевых ППП; от —40 до +85, от —60 до +100 или —60 до +125°С для кремниевых и арсенид-галлиевых ППП; влажности до 98% при 40°С; давления от $2,7 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^6$ Н/м²; ускорения до 10g в диапазоне частот от 10 до 600 Гц; ударных многократных нагрузок с ускорением до 75g; линейных нагрузок с ускорением до 25g (по ГОСТ 11630—70 «Приборы полупроводниковые для устройств широкого применения. Общие технические условия»).

Стандартные конструкции корпусов

Рекомендуемые для применения корпуса микросхем показаны на рис. 1.1. Кроме них применяют и другие: 212.32—1 (размеры корпуса 39,5×12,5×5 мм; расстояние между рядами выводов $B = 12,5$ мм); 238.18—1 (21,6×7,5×4,8; $B = 7,5$); 413.48—1 ($\varnothing 15$; $H = 4,3$); 427.18—1; 2 (12,5×12×3,2); 429.42—5; 6 (26,6×16,8×3,2); 460.24—1 ($\varnothing = 15$; $H = 4,3$); 2103.16—3; 4 (19,5×7,5×5,8; $B = 7,5$); 2104.18—1; 2 (21,9×7,5×4,4; $B = 7,5$); 2121.28—2; 3 (35×15×4,4; $B = 15$); 2121.28—6 (39×15×4,4; $B = 15$); 2123.40—3; 4; 6 (50×15×4,4; $B = 15$); 4117.22—1; 2 (15×12×3,2); 4118.24—1; 2; 3; 4 (15,4×12×3,2); 4134.48—2 (30,4×16,4×3,2); 4138.42—1; 2 (26,6×19,7×3).

Наиболее применяемые стандартные конструкции корпусов для ППП показаны на рис. 1.2.

Рекомендации по конструированию узлов РЭА на микросхемах

В конструкторско-технологической документации обязательно должны быть указаны ограничения, определяемые спецификой конструкций микросхем. Так, формовку и обрезку выводов прямоугольного поперечного сечения следует производить с радиусом изгиба не менее двух толщин выводов; выводов круглого сечения — с радиусом не менее двух диаметров вывода. Расстояние от тела корпуса до центра окружности изгиба должно быть не менее 1 мм. Участок вывода при формовке и обрезке необходимо закреплять вне зоны, пригодной для монтажа, указанной в ГОСТ 17467—79. Обрезка незадействованных в электрической схеме выводов может производиться на расстоянии не менее 1 мм от тела корпуса.

В процессе формовки и обрезки выводов не допускаются сколы и насечки стекла, керамики в местах заделки выводов в корпус.

Формовка выводов ИС в корпусах типа 4, устанавливаемых на МПП с открытыми контактными площадками, должна производиться под средний слой платы. При установке на открытые контактные площадки, отличающиеся по высоте более чем на 0,4 мм от уровня среднего слоя МПП, формовка выводов

должна производиться под каждый слой.

Лужение выводов микросхемы должно выполняться в следующих режимах: температура припоя не более 250°С; время нахождения выводов в расплавленном припое не более 2 с; расстояние от тела корпуса до зеркала расплавленного припоя по длине выводов не менее 1 мм; допустимое число погружений одних и тех же выводов (для исправления дефектов лужения) не более 2; интервал между двумя погружениями одних и тех же выводов не менее 5 мин.

Установка микросхем в корпусах типа 1 на ПП в металлизированные отверстия производится без дополнительного крепления с зазором 1...0,5 мм между установочной плоскостью и плоскостью основания корпуса. Установку микросхем на плату через электроизоляционную прокладку толщиной 1...1,5 мм следует производить с дополнительным креплением прокладки к плате и всей плоскости основания корпуса заливкой клеем или обволакиванием их лаком.

Микросхемы в корпусах типа 2 следует устанавливать на плату с металлизированными отверстиями с зазором, который обеспечивается конструкцией выводов.

Микросхемы в корпусах типа 3 с неформуемыми (жесткими) выводами должны устанавливаться на плату с металлизированными отверстиями с зазором 1...1,5 мм с использованием жесткой прокладки, которая должна быть приклеена к плате и основанию корпуса микросхемы. Микросхемы в корпусах типа 3 с формуемыми выводами должны устанавливаться на плату с зазором 3,2...3,8 мм с использованием жесткой прокладки из электроизоляционного материала, которая должна быть приклеена к плате и основанию корпуса.

Микросхемы в корпусах типа 4 с отформованными выводами следует устанавливать на плату: вплотную без приклейки, при этом допускается зазор до 0,3 мм; вплотную с приклейкой или на электроизоляционную прокладку толщиной до 0,3 мм, с зазором до 0,7 мм, при этом зазор между плоскостью основания ИС и установочной плоскостью платы должен быть заполнен мастикой

или прокладкой. Приклеивание микросхем должно производиться по всей плоскости основания корпуса. Не допускается наносить клей и мастику отдельными точками. Крепление прокладки также следует производить по всей плоскости основания корпуса. Рекомендуется использовать мастику У-9М, клей АК-20, ВК-9 или другие, указанные для типовых технологических процессов. Температура сушки не должна превышать 70°С.

Допускается заливка микросхем пенопластом ПЭ-9, ЖТ-2, ПУ-101 и пенополиуретаном ППУ-305А, ППУ-3.

Пайка микросхем на ПП одножальным паяльником должна производиться для корпусов с плоскими (планарными) выводами (корпуса типа 1, 2 и 4) по следующему режиму: температура жала паяльника не более 265°С, время пайки каждого вывода не более 3 с; интервал между пайками соседних выводов не менее 3 с, интервал между пайками одних и тех же выводов не менее 20 с; для корпусов со штырьковыми выводами температура жала паяльника не более 280°С с теми же ограничениями.

Пайка микросхем на ПП групповым или механизированным способом должна производиться для корпусов с плоскими выводами по следующему режиму: температура жала паяльных стержней не более 265°С, время воздействия не более 2 с, интервал между двумя повторными пайками одних и тех же выводов одной микросхемы не менее 5 мин; для корпусов со штырьковыми выводами температура расплавленного припоя не более 265°С, время пайки не более 3 с, интервал между повторными пайками одной микросхемы не менее 5 мин.

При пайке не допускаются касание припоем изоляторов выводов и затекание припоя под основание корпуса. Жало паяльника не должно касаться корпуса. Расстояние от тела корпуса до края расплавленного припоя по длине выводов должно быть не менее 0,7 мм.

Для влагозащиты плат с микросхемами следует применять лак УР-231 или ЭП-730. Оптимальная толщина слоя лака УР-231 35...55 мкм; лака ЭП-730 — 35...100 мкм при трехкратном покрытии. Температура сушки не выше 70°С.

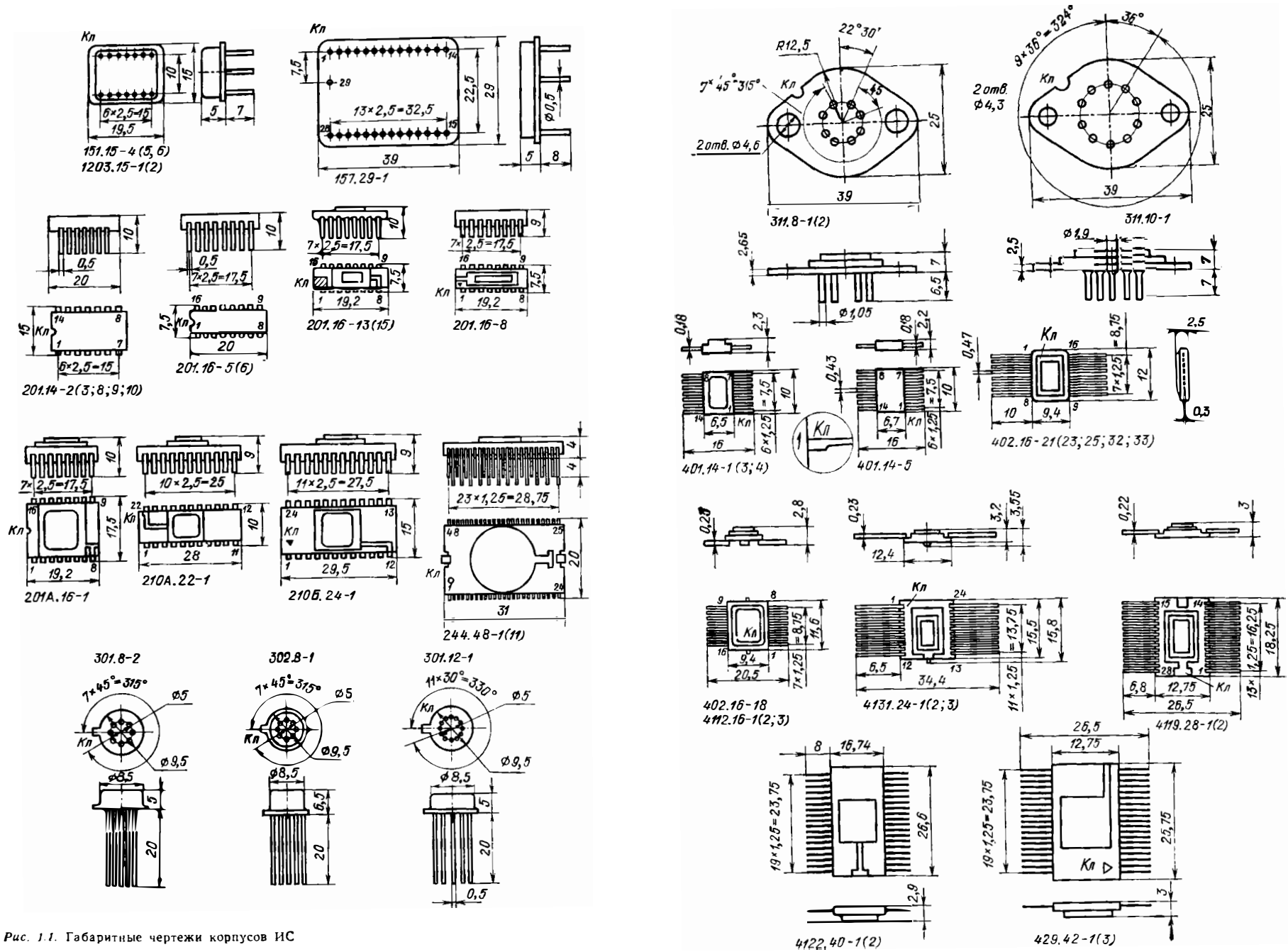


Рис. 1.1. Габаритные чертежи корпусов ИС

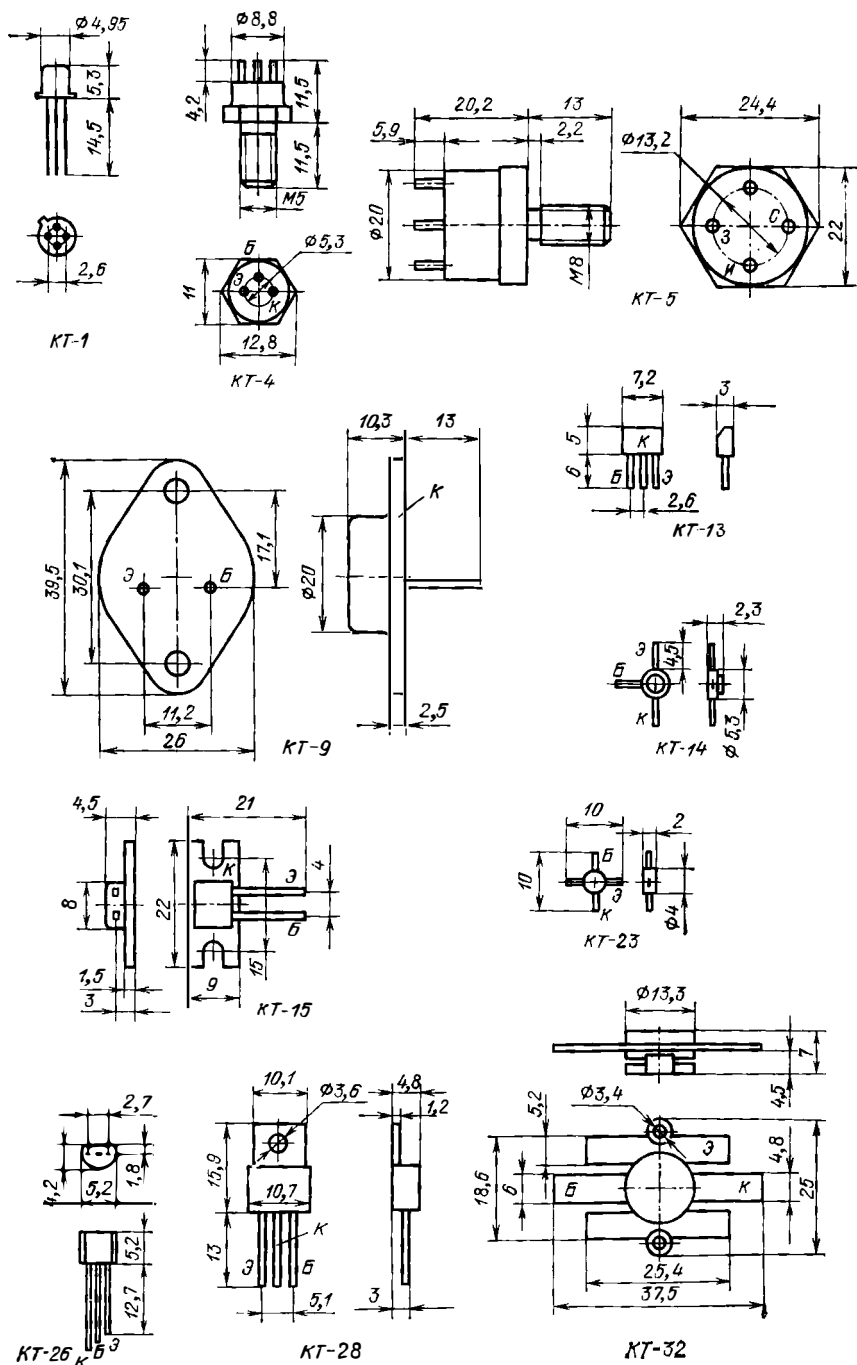


Рис. 1.2. Габаритные чертежи корпусов ППП

При демонтаже микросхем не допускается применять методы, приводящие к образованию насечек, сколов стекла, керамики, деформации выводов и корпуса, а также чрезмерные тепловые воздействия.

Рекомендации по конструированию узлов РЭА с полупроводниковыми приборами

При конструировании РЭА необходимо обеспечивать нормальные тепловые режимы ППП и стремиться к максимальному снижению их перегрева.

При рихтовке, формовке и обрезке участок вывода у корпуса ППП должен быть закреплен так, чтобы в месте выхода из корпуса (изолятора) вывод не испытывал изгибающих или растягивающих усилий. Металлическая оснастка для формовки выводов должна быть заземлена. Расстояние от корпуса ППП до центра радиуса изгиба вывода при формовке должно быть не менее 2 мм. Радиус изгиба вывода при диаметре выводов: до 0,5 мм — более 0,5 мм; от 0,6 до 1,0 мм — более 1 мм; свыше 1 мм — более 1,5 мм.

Установку и приклеивание ППП необходимо производить в соответствии с типовыми технологическими процессами сборки узлов РЭА. Температура сушки материалов, используемых для крепления ППП на платы, не должна превышать предельно допустимую температуру эксплуатации ППП. В конструкции узла необходимо обеспечить расстояние от корпуса ППП (изолятора) до места лужения или пайки (по длине вывода) не менее 3 мм. Для ППП допускается пайка без теплоотвода и групповая пайка, при этом температура припоя должна быть $260 \pm 5^\circ\text{C}$, время пайки не более 3 с, время лужения выводов 2 с.

Очистку ПП с ППП от флюса следует производить жидкостями, не влияющими на покрытие, маркировку и материал корпуса. Рекомендуемая температура сушки плат после очистки не выше 65°C .

Для влагозащиты плат с ППП рекомендуется применять лак УР-231 или ЭП-730. Допускается применять другие лаки, не оказывающие отрицательного химического, механического и термического влияния на

ППП. Заливку плат с ППП также следует производить компаундами, не влияющими на ППП химически, механически или термически.

При проектировании РЭА с применением заливки, а также РЭА, работающей при пониженном атмосферном давлении, следует учитывать возможное ухудшение теплообмена между ППП и окружающей средой.

Допускается применение ППП в газовых средах: инертных газах, азоте до 98%, кислороде до 50%, азодороде до 20%, углекислом газе до 5%, смеси указанных газов при условии, что их содержание не превышает данных норм. Допускается применение ППП в условиях инея и росы, если приборы в РЭА защищены от непосредственного воздействия влаги общей герметизацией РЭА или покрытием плат влагозащитными лаками. Допускается применение ППП в РЭА, предназначенной для эксплуатации в тропических условиях. При этом платы и смонтированные на них ППП покрывают изоляционным лаком (УР-231 или ЭП-730) в три слоя с просушкой каждого слоя. Замена ППП в процессе ремонта и наладки узлов РЭА допускается только при обесточенной РЭА. Демонтаж отказавших ППП проводят методами, указанными в типовых технологических процессах.

Рекомендации по конструированию гибридных микросхем и микросборок

При применении БПП необходимо руководствоваться ТУ на их конкретные типы, отраслевыми и государственными стандартами ГОСТ 18725—73 или СТ СЭВ 300—76, ГОСТ 11630—70 или СТ СЭВ 299—76.

При расчете надежности ГИС или МС необходимо пользоваться данными по эксплуатационной надежности БПП, указанными в отраслевых справочниках. При отсутствии данных по надежности конкретных типов БПП для расчета надежности БИС и МС можно считать, что эксплуатационная надежность полупроводниковых приборов и интегральных схем определяется величиной не ниже 10^{-7} 1/ч при условии правильного применения БПП.

Для повышения выхода годных ГИС и МС в конструкторско-технологической документации целесооб-

разно предусматривать входной контроль БПП, который должен производиться по типовому технологическому процессу и в соответствии с ОТУ и ТУ на конкретные типы БПП.

При входном контроле, если иное не оговорено в ТУ, должны соблюдаться следующая последовательность проверок: контроль внешнего вида; измерение электрических параметров. В тех случаях, когда позволяет конструкция тары, контроль внешнего вида и измерение параметров БПП должны производиться без изъятия их из тары.

При извлечении БПП из тары изготовителя и измерении параметров должны быть приняты меры, исключающие возможность повреждения их, в том числе статическим электричеством. При контроле параметров приборов для предотвращения повреждения БПП статическим электричеством необходимо принимать следующие меры: оператор должен быть полностью одет в хлопчатобумажную одежду и обувь на кожаной подошве; сиденье и спинка стула, на котором работает оператор, должны иметь хлопчатобумажную обивку; вся измерительная и испытательная аппаратура должна быть заземлена; закорачивающие приспособления, в которых БПП поступают на измерение, не должны удаляться до начала измерений; оператор, перед тем как брать БПП, должен прикоснуться рукой к заземленному приспособлению или же работать в резиновых перчатках; запрещается вставлять прибор в контролержатель измерительной аппаратуры при поданных на контакты напряжениях.

Эксплуатационная надежность БПП в составе ГИС и МС обеспечивается не только качеством изготовления самих БПП, но и правильным обращением с ними в процессе их монтажа. Поэтому в конструкторско-технологической документации должны быть предусмотрены следующие ограничения: не допускать механических, электрических и тепловых повреждений БПП, которые в дальнейшем могут привести к их отказам; исключить возможность действия статического электричества на БПП; обеспечивать высокое качество герметизации и влагозащиты БПП в составе ГИС и МС; стремиться про-

водить технологические (отбраковочные) испытания БПП в составе ГИС и МС, а также в составе узлов и блоков РЭА.

При разработке технологического процесса монтажа БПП в ГИС и МС необходимо руководствоваться следующими рекомендациями по режимам и условиям монтажа: используемые при монтаже инструменты, клен, лаки, припой, компаунды не должны оказывать вредного химического, термического или механического воздействия на БПП; недопустимы неоднократные присоединения (термокомпрессия, пайка, сварка и др.) к выводам и контактными площадкам БПП, если иное не указано в ТУ; соединение гибких и жестких выводов приборов с контактными площадками микросхемы может быть осуществлено ультразвуковой сваркой, термокомпрессией с разогревом нглы, пайкой припоями, сваркой расплавленными электродами, сваркой косвенным нагревом, пайкой в струе горячего газа, комбинированной пайкой; крепление приборов с жесткими выводами к контактной площадке рекомендуется производить в защитной атмосфере аргона, гелия, азота или в атмосфере сухого воздуха, или применять материалы, стойкие к окислению; пайка контактных соединений припоями должна исключать повреждение приборов и нарушение адгезии металлизированных участков подложки из-за перегревов (для предотвращения перегревов приборы следует охлаждать, обдувая холодным воздухом); остатки флюса на месте пайки не должны быть гигроскопичными, вызывать коррозию и осыпаться под действием механических нагрузок; качество монтажа приборов с гибкими выводами проверяют визуально с помощью микроскопа, приспособленного для измерения размеров деталей как в фокальной плоскости, так и в глубину, при этом не допускается подергивание гибких выводов для проверки качества соединения; разделение полупроводниковых пластин на кристаллы, а также присоединение выводов к контактными площадкам необходимо производить в соответствии с указаниями, содержащимися в ТУ; обрезку или формовку выводов необходимо производить в соответствии с требованиями, указанными в ТУ, при

этом каждый вывод должен быть закреплен так, чтобы в месте присоединения вывода к БПП не возникало механических усилий; в процессе монтажа, при «прозвонке» БПП, испытаниях и эксплуатации ГИС и МС не должны превышать предельные режимы и условия, установленные в ТУ на БПП; в период изготовления ГИС или МС БПП, извлеченные из упаковки изготовителя, должны находиться в следующих условиях: температура окружающей среды $20 \dots 23^\circ\text{C}$, влажность окружающей среды $45 \pm 5\%$, чистота окружающей среды 1000 (максимальное число частиц в одном литре воздуха).

Рекомендации по монтажу дискретных электрорадиоэлементов

Наиболее распространенными видами дискретных ЭРЭ, которые используются совместно с ИС, БИС и МС, являются малогабаритные постоянные резисторы и конденсаторы с проволочными (круглыми) и ленточными (сечение в виде тонкого параллелепипеда) выводами.

Форма таких ЭРЭ либо цилиндрическая, либо в виде параллелепипеда. При малой массе их механическое крепление осуществляется электрическими выводами к контактными площадкам ПП, при массе более ~ 10 г или в жестких условиях эксплуатации используют специальные приспособления. Они могут быть: клен и компаунды, отгибаемые или впаиваемые элементы корпуса, специальные скобы или резьбовые шурупы, отверстия, винты.

Для надежной работы дискретных ЭРЭ очень важна правильная формовка выводов. Выводы не должны изгибаться ближе 2...3 мм от корпуса, а радиус изгиба должен быть в 1,2-2 раза больше диаметра или толщины вывода.

При использовании дискретных ЭРЭ для ручного или автоматизированного монтажа необходимо учитывать конкретные рекомендации ГОСТ, общих или частных ТУ.

1.2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ РЭА НА МИКРОСХЕМАХ И МИКРОСБОРКАХ

Общие положения

1. Возможность выполнения сложной РЭА в виде одноблочных устройств. Плотность компоновки РЭА на микросхемах и МС при использовании современных КЭ может достигать до сотен тысяч штук в одном кубическом сантиметре одной монтажной платы, что позволяет создавать в виде одного блока или платы целые вычислительные комплексы, системы числового программного управления станками, автоматизированные системы управления технологическими процессами и др.

2. Высокая надежность работы. Построение РЭА на БИС и СБИС резко сокращает число холодных, паяных и сварных соединений, позволяет широко применять резервирование и дает возможность создавать сложную малогабаритную РЭА с высокой надежностью. Реально создание устройств, содержащих десятки и сотни тысяч элементов и компонентов, имеющих эксплуатационную интенсивность отказов не больше чем $10^{-7} \dots 10^{-8}$ 1/ч.

3. Возможность увеличения тепловых напряженностей в 3-5 раз по сравнению с обычной РЭА.

4. Значительное увеличение вибро- и ударопрочности, виброустойчивости конструкций. Ввиду отсутствия или малого числа крупногабаритных деталей наиболее вероятными отказами при механических воздействиях являются поломка выводов микросхемы или МС, которые из-за малой массы имеют высокую собственную частоту и допускают перегрузки в 2 и более раз больше, чем обычные ЭРЭ.

5. Повышенная герметичность. Возможность выполнения одноблочных устройств позволяет создавать абсолютно герметичные (в том числе и паяные) конструкции с ИС, БИС, СБИС и МС, обладающими собственной высокой герметичностью.

Абсолютные показатели конструкций

1. Надежность. При отсутствии резервирования расчетная интенсивность отказов определяются по формуле

$$\lambda_p = \sum K_1 \lambda_1 + \sum K_2 \lambda_2 + \sum K_3 \lambda_3 + \sum K_4 \lambda_4 + \sum K_5 \lambda_5,$$

где K — коэффициенты запаса, зависящие от соотношения фактических условий применения и условий, указанных в нормативно-технической документации (в худшем случае $K=1$); λ_1 — интенсивность отказов электросхем БИС, СБИС, МС (берется из справочников по надежности, в худшем случае $\lambda_1=10^{-7}$ 1/ч; λ_2 — интенсивность отказов ЭРЭ; λ_3 — интенсивность отказов одного холодного контакта разъемов и переходных колодок (берется равной $10^{-5} \dots 10^{-6}$ 1/ч в зависимости от типа разъема и условий работы); λ_4 — интенсивность отказов паяного контакта (берется равной $10^{-8} \dots 10^{-9}$ 1/ч в зависимости от площади и способа получения контакта); λ_5 — интенсивность отказов сварного контакта (берется равной $10^{-10} \dots 10^{-11}$ 1/ч в зависимости от способа получения контакта).

2. Сложность. Как правило, определяется суммарным числом элементов, компонентов и радиодеталей, входящих в изделие:

$$C_p = N_p = \sum_{i=1}^{i=KTE} N_i,$$

где N_p — общее число ЭРЭ; N_i — число ЭРЭ в i -й конструктивно-технологической единице (КТЕ); n_{KTE} — число КТЕ и РЭА.

3. Объем. Зависит от сложности, допустимых перегревов и рациональности конструкции (числа и типа КТЕ, плотности компоновки, несущих конструкций и теплоотводящих элементов). Для уменьшения объема следует использовать ИС с максимальной степенью интеграции и наивысшей плотностью упаковки элементов в единице объема.

Наилучшие показатели обеспечивают безвыводные и бескорпусные ИС, а также перспективные КЭ.

4. Масса. Определяется массами

КТЕ, несущих конструкций, элементов соединений, корпуса, теплоотводов и т. п. Ограничивается требованиями технического задания.

5. Потребляемая мощность. Зависит от мощности, потребляемой каждой КТЕ, их числа, требуемого быстродействия или рабочей частоты. Практически вся потребляемая мощность рассеивается в виде тепла внутри РЭА, поэтому ею определяется тепловой режим и перегревы КЭ, ЭРЭ, микросхем и МС, которые имеют предельно допустимые рабочие температуры в виде односторонних ограничений.

Таким образом, мощность потребления и мощность рассеяния имеют ограниченные верхние пределы, определяемые экономичностью энергопотребления и допустимыми перегревами.

6. Собственная резонансная частота. Определяет прочность и устойчивость конструкции к механическим воздействиям, эффективность которой оценивается коэффициентами вибро- и удароизоляции. Коэффициент виброизоляции γ_1 без учета демпфирования определяют по формуле:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 - (f/f_0)^2},$$

где f/f_0 — отношение вынужденной и собственной частот конструкции.

Коэффициент удароизоляции $\gamma_2 = g_2/g_{доп}$, где g_2 и $g_{доп}$ — перегрузки при ударе и допустимая.

Чем меньше значения γ_1 и γ_2 , тем эффективнее амортизация блока.

Для неамортизируемой аппаратуры оговариваются линейные перемещения и изменения скорости элементов при вибрациях.

7. Степень герметичности. Оценивается величиной истечения газа из объема РЭА в течение срока службы

$$D = V_{бл} \Delta P / \tau_{сл},$$

где ΔP — избыточное давление газа в блоке; $\tau_{сл}$ — срок службы блока.

Удельные и относительные показатели конструкции

При сравнении РЭА одного назначения, но различной сложности абсолютные показатели не дают объективной оценки, что заставляет использовать удельные и относительные показатели.

1. Плотность упаковки. Используется формула $K_y = N/V$, где N — общее число ЭРЭ в РЭА с объемом V .

2. Коэффициент дезынтеграции. Определяют как отношение объема, q_v , массы q_m или площади q_s всей конструкции соответственно к общему объему, массе или площади кристаллов (полупроводниковых ИС). Оптимальные с точки зрения плотности упаковки, значения q_i стремятся к единице.

3. Удельная масса. Подсчитывается по формуле $m'_{бл} = m_{бл}/V_{бл}$. Во многом зависит от соотношения масс КТЕ и остальных КЭ и при уменьшении $m'_{бл}$ обычно увеличивается. Значения $m'_{бл}$ для некоторых видов РЭА могут иметь односторонние ограничения (не более).

4. Удельная тепловая мощность рассеяния. Для блока, имеющего форму куба со стороной a , она равна

$$q_{тп} = \frac{\alpha S \Delta \theta}{V_{бл}} = \frac{6 \alpha \Delta \theta}{a},$$

где α — суммарный коэффициент теплообмена ($Вт/м^2 K$); $S=6a^2$ — площадь теплообмена, $м^2$; $\Delta \theta$ — допустимый перегрев блока, $^{\circ}C$. С уменьшением размеров блока и при сохранении потребляемой мощности $q_{тп}$ увеличивается.

Для оценки взаимозаменяемости, технологичности и других свойств конструкций используют универсальные удельные показатели: процент выхода годных, коэффициенты утилизации, полезного действия и др.

Сравнение конструктивных показателей РЭА на микросхемах и микросборках

Для оценки конструктивных показателей сравним шесть вариантов перспективных и отработанных инженерных реализаций гипотетического цифрового микроэлектронного устройства, выполненного на одной плате 50×40 см, без учета дальнейшего пакетирования подобных ячеек в блоки.

Вариант 1 (непрерывная СБИС) выполнен на бескорпусных полупроводниковых СБИС размером 30×30 мм (исходя из прогноза на 1985—2000 гг.). Кристаллы СБИС

располагаются на соединительной плате вплотную без зазоров, образуя одну гигантскую СБИС ($q_s=1$). Толщина кристалла 0,2 мм.

Соединительная керамическая коммутационная плата ($\rho_1=2,5$ г/см³) толщиной 0,1 мм и имеет стальное основание ($\rho_2=8$ г/см³) толщиной 0,5 мм. Число элементов на кристалле 10^6 при $S_k=10^3$ мм² и $S_3=10^{-3}$ мм²; плотность размещения 10^3 эл/мм²; общее число кристаллов 200. Тактовая частота 200 МГц. Общее число элементов $N=200$ млн. шт. Объем одного кристалла $V_k=0,2$ см³. Общий объем кристаллов $V_N=40$ см³. Объем стального основания вместе с кристаллами и керамической подложкой $V_{\Sigma}=160$ см³. Таким образом, коэффициент дезынтеграции объема $q_v = V_{\Sigma}/V_N = 160/40 = 4$.

Масса кристаллов $m_N=120$ г, стального листа $m_c=800$ г, керамической подложки $m_k=50$ г, суммарная масса КЭ $m_{\Sigma} = m_N + m_c + m_k = 970$ г; коэффициент дезынтеграции массы

$$q_m = m_{\Sigma}/m_N \cong 8,1.$$

Плотность упаковки элементов в КЭ

$$\gamma = N/V_{\Sigma} = 2 \cdot 10^8 / 160 = 10^6 \text{ эл/см}^3.$$

Вариант 2 (мозаика СБИС) подобен 1, но кристаллы СБИС расположены с зазорами 6 мм по отношению друг к другу, тогда $q_s=2$. Число кристаллов сокращается до 100, общее число элементов в конструкции уменьшается до 10^8 . Установочный размер изделия по габаритным размерам остается прежним. Остальные показатели определяются аналогично предыдущему расчету.

Вариант 3 (мозаика БИС) выполнен также на керамической коммутационной плате со стальным основанием, но с использованием современных БИС размером 4×5 мм. При возможном размере элементов $S_3 = 5 \cdot 10^{-3}$ мм² их число на кристалле БИС $N_{эж} = 4 \cdot 10^3$ и плотность упаковки $\gamma_k = 200$ эл/мм³.

Принимаем зазор между кристаллами равным 3 мм, тогда $q_s=5,4$ и число размещаемых на плате кристаллов БИС $N_k=1800$.

Таблица 1.2

Основные конструктивные показатели шести вариантов РЭА на микросхемах и микросборках

Вариант	Характер реализации	N	$N_{ЭК}$	$S_K, мм^2$	q_S	N_K	$m_{\Sigma}, г$	$V_{\Sigma}, см^3$	q_m	q_U	$\gamma, эл/см^2$
1	Непрерывная СБИС	$2 \cdot 10^8$	10^6	10^3	1	200	970	160	8,1	4	10^6
2	Мозаика СБИС	10^8	10^6	10^3	2	100	910	160	15	8	$7 \cdot 10^5$
3	Мозаика БИС	$7 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^3$	20	5,4	1800	870	160	40	22	$4,5 \cdot 10^4$
4	Непрерывная МС	$3 \cdot 10^6$	400	4	7,5	6600	870	440	54	83	$6 \cdot 10^3$
5	Крупноформатная ФЯ 3-го поколения	$2 \cdot 10^5$	400	4	100	500	1000	970	100	1600	$2 \cdot 10^2$
6	Стандартная ФЯ 3-го поколения	$3 \cdot 10^4$	400	4	100	66	140	145	110	1800	$2 \cdot 10^2$

Плотность упаковки БИС на плате примерно равна 1 БИС/см².

Вариант 4 (непрерывная МС) построен на широко применяемой в настоящее время элементной базе (размер кристалла $S_K=2 \times 2$ мм, число элементов на кристалле $N_{ЭК}=400$).

Вариант 5 (крупноформатная функциональная ячейка ФЯ 3-го поколения) построен на обычных корпусированных ИС.

Вариант 6 (ФЯ 3-го поколения стандартных размеров) представляет собой печатную плату с установленными на ней микросхемами в корпусах типа 201.14-1 ($7,5 \times 19,5$ мм), соединителем типа ГРППЗ и контрольной колодкой. Масса корпуса 0,9 г, объем корпуса $0,55$ см³, занимаемая корпусом площадь с учетом зазоров между микросхемами равна $1,46$ см². Общее число микросхем, устанавливаемых на стандартной плате 170×170 мм, равно 66. Принимая $S_K=4$ мм² и $N_{ЭК}=400$ элементов, определяем площадь всех кристаллов $S_N=264$ мм², площадь платы $S_{\Sigma}=300$ см² и коэффи-

циент дезинтеграции площади $q_S \approx \approx 100$. Общее число элементов на плате $N=3 \cdot 10^4$.

Основные показатели рассмотренных шести вариантов приведены в табл. 1.2, из которой видно, что перспективные конструкции на крупноформатных многослойных керамических подложках с металлическим основанием позволяют увеличить сложность систем на 1-2 порядка и выполнить их в одном, приемлемом по размерам и технологии, КЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы проектирования МЭА/ Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977.

2. О выборе конструктивов МЭУ и систем на БИС/А. А. Васенков, Б. Ф. Высоцкий, А. С. Назаров и др. — Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 1980.

3. Компонировка и конструкция МЭА/ Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Радио и связь, 1982.

2. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Основные аббревиатуры

ПП — печатная плата
 ПР — проводящий рисунок
 ДПП — двусторонняя печатная плата
 КП — контактная площадка
 МК — микрокорпус
 МКП — многослойная керамическая плата
 МПП — многослойная печатная плата
 ОПП — односторонняя печатная плата
 БИС — большая интегральная микросхема
 ПС — проводящий слой
 ЭРЭ — электрорадиоэлементы (обычно навесного типа)

В разделе приведены данные по наиболее используемым конструкциям ПП. Гибкие ПП выполняются по требованиям, аналогичным требованиям к ОПП и ДПП. ПП на металлическом основании по конструкции рисунка соединений аналогичны ОПП, но пока не нашли широкого применения. Многослойные керамические платы имеют достаточно отработанную технологию и могут быть сконструированы по приведенным данным. Терминология и определения соответ-

ствуют ГОСТ 2308—79, 17467—79, 20406—75, стандарту СЭВ 301—76, стандарту МЭК (публикация 194), ОСТ 11.027.902—82 и 11.073.924—81.

2.1. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ НА СЛОИСТЫХ И ВОЛОКНИСТЫХ ОСНОВАНИЯХ

Типы печатных плат

По размещению проводящего рисунка ПП делятся на односторонние, двусторонние и многослойные (рис. 2.1). Односторонние (рис. 2.2) и двусторонние печатные платы без соединения ПС (рис. 2.3, а) просты по конструкции и несложны в изготовлении. Коммутационная способность одной ДПП без межслойных соединений не может быть больше двух ОПП той же площади. Двусторонние печатные платы без соединения слоев целесообразно применять при использовании безвыводных элементов или элементов с планарными выводами.

Соединение проводящих слоев ДПП может осуществляться отрезками проводящего материала (штырями, отрезками провода, пустотельными

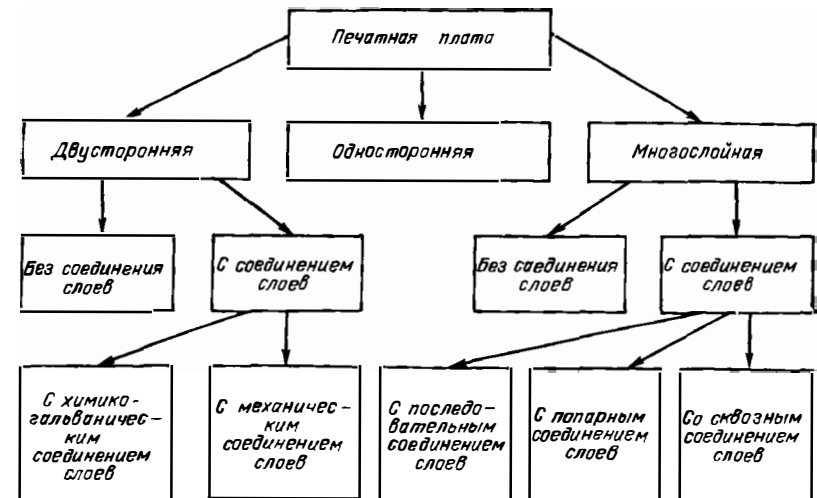


Рис. 2.1. Классификационная схема типов ПП

заклепками), гальванически осажденной медью (рис. 2.3, б, в).

Двусторонние печатные платы с соединением ПС отрезками проводникового материала имеют больше коммутационные преимущества и явля-

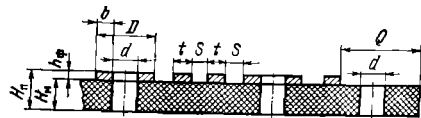


Рис. 2.2. Схема конструкции ОПП: $H_{\text{д}}$, $H_{\text{м}}$, $h_{\text{ф}}$ — толщины ПП, ее основания и фольги; b — гарантийный пояс; D , d — диаметры контактной площадки и отверстия; S — расстояние между краями соседних элементов ПР; t — ширина печатного проводника; Q — расстояние от края платы, выреза, паза до элементов ПР

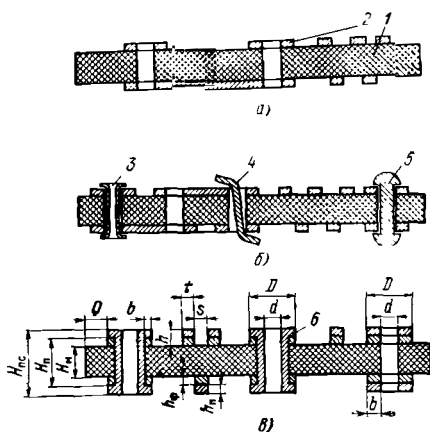


Рис. 2.3. Схемы конструкций ДПП без соединения ПС (а), с соединением ПС отрезками проводникового материала (б) и с соединением ПС гальванически осажденной медью (в): 1 — материал основания; 2 — проводящий рисунок; 3 — пустотелая заклепка; 4 — отрезок проводникового материала; 5 — медный штырь; 6 — гальваническая медь; $H_{\text{п.с}}$ — суммарная толщина ПП; h и $h_{\text{д}}$ — толщины ПР и химико-гальванического покрытия

ются перспективными для ДПП малой и средней сложности из-за отсутствия трудоемких гальванических процессов и наличия автоматов для установки штырей и заклепок.

Двусторонняя печатная плата с гальваническим соединением ПС в настоящее время является самой распространенной конструкцией. Она позволяет обеспечить наибольшую по-

сравнению с другими типами ДПП плотность размещения ЭРЭ при высокой надежности соединений.

Многослойные печатные платы без соединения ПС могут быть двух видов: МПП с открытыми КП (представляют собой ряд склеенных перфорированных слоев, подсоединение к КП любого слоя производится через окна вышележащих слоев, что позволяет размещать ЭРЭ с планарными и штыревыми (рис. 2.4, а) и МПП с выступающими выводами (пред-

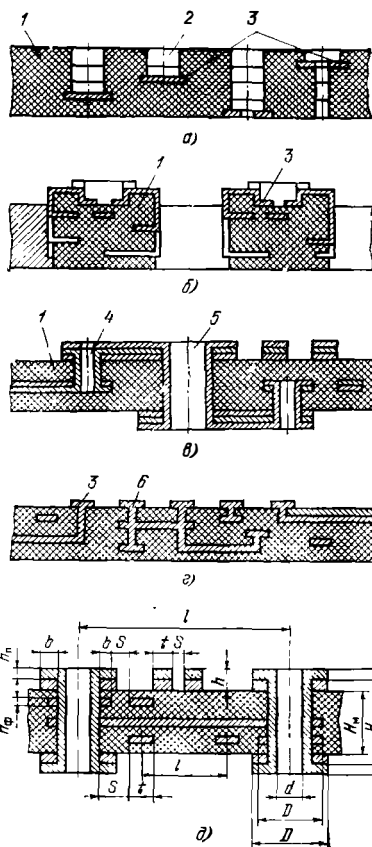


Рис. 2.4. Схемы конструкций МПП с открытыми контактными площадками (а), с выступающими выводами (б), с попарным соединением слоев (в), с последовательным соединением слоев (г) и со сквозным соединением слоев (д): 1 — материал ПП; 2 — колодец; 3 — контактная площадка; 4 — металлизированные отверстия для межслойных соединений; 5 — сквозное монтажное отверстие; 6 — межслойное соединение; l — расстояние между центрами (осями) элементов конструкции ПП

(представляют собой ряд склеенных перфорированных слоев, в окна которых выходят отрезки печатных проводников, которые подгибаются к верхнему слою, группируются на нем в систему КП и закрепляются, обеспечивая размещение ЭРЭ только с планарными выводами) (рис. 2.4, б). Из-за сложности изготовления последний вид в настоящее время практически не применяется.

Многослойные печатные платы с соединением ПС могут быть трех видов. Многослойные печатные платы с попарным соединением слоев применяются только как четырехслойные платы и представляют собой конструкцию, в которой ПС соединяются парами: сначала отдельно соединяются 1 и 2, 3 и 4 проводящие слои, затем после склеивания МПП соединяются 1 и 4 проводящие слои. Преимуществом данной конструкции являются: надежность межслойных соединений, однотипность технологии с ДПП. К недостаткам следует отнести большую длительность технологического процесса, высокую себестоимость и коммутационные сложности. Конструкцию с попарным соединением слоев целесообразно использовать под элементы с планарными выводами (рис. 2.4, в).

Многослойные печатные платы со сквозным соединением слоев — соединение элементов ПР, расположенных на различных слоях, осуществляется с помощью металлизации сквозных отверстий. Число ПС в такой плате может достигать 12 и более, увеличение числа слоев незначительно удлиняет технологический процесс изготовления и себестоимость. Оптимальное число ПС — 6—8 (рис. 2.4, д).

Многослойные печатные платы с последовательным соединением ПС — соединение ПС осуществляется гальванически в местах, не защищенных разделительным диэлектрическим слоем. Эта конструкция МПП очень сложна в изготовлении и имеет высокую себестоимость (рис. 2.4, г).

Основные материалы для печатных плат

Для изготовления ПП используют фольгированный и нефольгированный листовые диэлектрики. Исходными для изготовления фольгированных диэлектриков могут быть бумага или стеклоткань, пропитанные синтетиче-

скими смолами, или полимерные пленки из лавсана, фторопласта и др. На поверхность этих материалов приклеивается металлическая фольга.

Нефольгированные материалы изготавливаются из тех же компонентов. При изготовлении ПП на нефольгированном материале ПР формируют осаждением металла из растворов или приклеиванием вырубленных из фольги элементов ПР. Материалы, рекомендуемые для изготовления ПП, приведены в табл. 2.1. Их рабочие температуры: ГФ от -60 до $+85^{\circ}\text{C}$; СФ, ФТС и СТФ от -60 до $+120^{\circ}\text{C}$; СФПН от -60 до $+160^{\circ}\text{C}$; СТПА от -60 до $+150^{\circ}\text{C}$ и ФДМ от -60 до $+100^{\circ}\text{C}$.

Конструирование печатных плат

Основной целью процесса конструирования является создание коммутационного устройства для объединения группы ЭРЭ в функциональный узел с обеспечением требуемых механических и электрических параметров в заданном диапазоне эксплуатационных характеристик при минимальных затратах.

Для этого необходимо: выбрать тип ПП; определить класс точности; установить габаритные размеры и конфигурацию; выбрать материал основания для ПП; разместить известные элементы; разделить размеры элементов рисунка; разместить их на плате и осуществить трассировку; обеспечить автоматизацию процессов изготовления и контроля платы, процессов сборки, пайки и контроля узлов; изготовить конструкторскую документацию.

Только комплексное решение этих задач обеспечивает оптимальный вариант конструкции ПП. Базовые конструкции ПП позволяют получить существенный экономический эффект за счет упрощения процесса конструирования, уменьшения номенклатуры оснастки и инструмента, уменьшения объемов конструкторской документации, упрощения аппаратуры контроля и диагностики.

При создании базовых конструкций ПП в качестве объектов унификации используют: габаритные размеры; тип и размещение применяемого разъема и других ЭРЭ; диаметры и размещение отверстий; размеры и форму элементов ПР; конструктивные покрытия.

Марка материала	Толщина фольги, мкм	Толщина материала с фольгой, мм	Прочность сцепления, гс/3 мм	Область применения
ГФ-1-35 ГФ-2-35	35	1,5; 2; 2,5; 3 1; 1,5; 2; 2,5; 3	220	Одно-двухсторонние платы без гальванического соединения ПС
СФ-1-35, СФ-2-35	35	0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3	300	Одно-двухсторонние платы с гальваническим соединением слоев
СФ-1-50, СФ-2-50	50	0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3	300	То же
СФ-1Н-50, СФ-2Н-50	50	0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3	350	То же
СФПН-1-50, СФПН-2-50	50	0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3	450	Одно-двухсторонние платы с повышенной нагревостойкостью
СТФ-1	35	0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,35; 0,5 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5 0,25; 0,35; 0,5 0,8; 1; 1,5; 2; 3	400 450 400 450	Одно-двухсторонние, МПП и гибкие ПП с повышенной нагревостойкостью и влагостойкостью
СТФ-2	35	0,08; 0,15 0,1; 0,12; 0,19 0,18; 0,27; 0,5 0,14; 0,23; 0,5	300 360 300 360	Гибкие и многослойные печатные платы
ФДМ-1, ФДМ-2	35	0,25; 0,35	100	Гибкие ПП
СТФ-1-2ЛК	—	1; 1,5	—	Одно-двухсторонние ПП
СТП-3, СТП-0,25	—	0,025; 0,06	—	Прокладки для МПП
СТПА-5-1, СТПА-5-2	5	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2	360	Одно-двухсторонние и многослойные ПП

Примечание. Материалы марок СФ-1-35Г и СФ-2-35Г в отличие от СФ-1-35 и СФ-2-35 имеют прочность сцепления 360 гс/3 мм; СФ-1-50Г и СФ-2-50Г — 420 гс/3 мм; СФ-1Н-50Г и СФ-2Н-50Г — 420 гс/3 мм

Конструирование ПП начинают с подробного изучения ТЗ, принципиальной электрической схемы и компоновки изделия, в состав которой должна входить проектируемая ПП. На основании требований, заложенных в ТЗ, определяют условия эксплуатации, хранения и транспортировки проектируемой ПП.

Знание компоновки изделия позволяет определить размеры и форму ПП, способы и точки крепления, конфигурацию пазов, вырезов отверстий и т. п. Сведения об элементной базе и электрических характеристиках принципиальной схемы определяют компоновку ЭРЭ, размещение элементов рисунка ПП и их параметры, количество ПС, класс точности.

Эксплуатационные характеристики изделия определяют выбор типа материала основания и его толщину, тип конструктивных покрытий. При выборе типа ПП следует обратить особое внимание на технико-экономические показатели, зависящие от сложности ПР, числа слоев и типа материала основания. Сложность ПР определяется расстоянием между его элементами, шириной и числом проводников, числом, формой и размерами отверстий, допустимыми отклонениями от номинальных значений.

В зависимости от допустимых отклонений определены четыре класса точности ПП. Значения основных конструктивных параметров по классам точности приведены в табл. 2.2, а зависимость трудоемкости изготовления 1 дм² ПП в серийном производстве от числа слоев и сложности ПР показана на рис. 2.5.

Габаритные размеры, конфигурацию и места крепления ПП выбирают в зависимости от установочных размеров, элементной базы, эксплуатационных характеристик и с учетом класса точности.

Рекомендуется разрабатывать ПП простой прямоугольной формы с соотношением сторон не более 3:1 и размерами не более 470×470 мм. Длину стороны ПП выбирают таким образом, чтобы она была кратной: 2,5 при длине до 100 мм; 5 при длине свыше 100 до 350 мм; 10 при длине свыше 350 мм. При выборе геометрии в первую очередь следует пользоваться размерами типовых рядов унифицированных базовых несущих конструкций, количество типо-

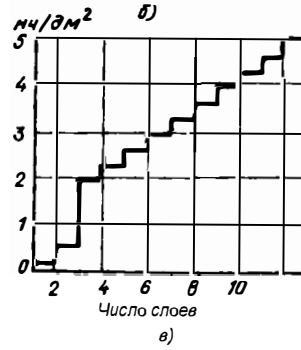
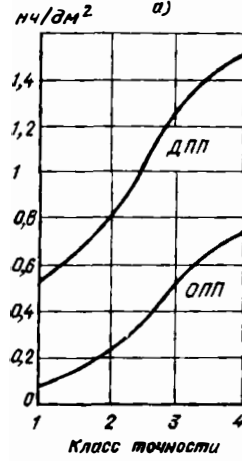
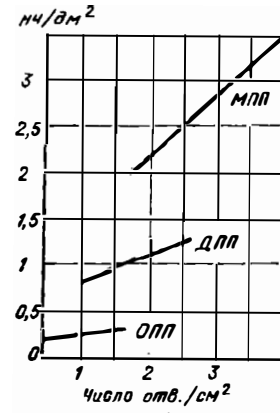


Рис. 2.5. Трудоемкость изготовления ПП в функции плотности размещения отверстий (а), класса точности (б) и числа слоев (в)

Основные конструктивные параметры печатных плат

Параметр	Класс точности			
	1	2	3	4
Минимальное значение номинальной ширины проводника, t , мм	0,60	0,45	0,25	0,15
Номинальное расстояние между проводниками, S , мм	0,60	0,45	0,25	0,15
Гарантийный пояс, b , на наружном слое, мм	0,30	0,20	0,10	0,05
То же, на внутреннем слое, мм	0,15	0,10	0,05	0,03
Отношение диаметра отверстия к толщине платы	$\geq 0,50$	$\geq 0,50$	$\geq 0,33$	$\geq 0,33$
Допуск на отверстие Δd , мм, без металлизации, $\varnothing \leq 1$ мм	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
То же, $\varnothing > 1$ мм	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
Допуск на отверстие Δd , мм, с металлизацией, $\varnothing \leq 1$ мм	+0,10 -0,15	+0,10 -0,15	+0,05 -0,10	+0,05 -0,10
То же, $\varnothing > 1$ мм	+0,15 -0,20	+0,15 -0,20	+0,10 -0,15	+0,10 -0,15
Допуск на ширину проводника Δt , мм, без покрытия	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	+0,03 -0,05	$\pm 0,03$
То же, с покрытием	+0,25 -0,20	+0,15 -0,10	+0,10 -0,08	$\pm 0,05$
Допуск на расположение отверстий δd , мм, при размере платы менее 180 мм	0,20	0,15	0,08	0,05
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,25	0,20	0,10	0,08
То же, при размере платы более 360 мм	0,30	0,25	0,15	0,10
Допуск на расположение контактных площадок δr , мм, на ОПП и ДПП при размере платы менее 180 мм	0,35	0,25	0,20	0,15

Параметр	Класс точности			
	1	2	3	4
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,40	0,30	0,25	0,20
То же, при размере платы более 360 мм	0,45	0,35	0,30	0,25
Допуск на расположение контактных площадок δr , мм, на МПП при размере платы менее 180 мм	0,40	0,35	0,30	0,25
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,50	0,45	0,40	0,35
То же, при размере платы более 360 мм	0,55	0,50	0,45	0,40
Допуск на расположение проводников на ОПП и ДПП δl , мм	0,15	0,10	0,05	0,03
То же, на МПП	0,20	0,12	0,07	0,05
Допуск на подтравливание диэлектрика МПП $\Delta d_{тр}$, мм	0,03	0,03	0,03	0,03

размеров ПП в одном изделии сводить к минимуму.

Увеличение размеров ПП ведет к повышению погрешностей при их изготовлении. Отклонение от прямоугольности, наличие пазов и вырезов увеличивают трудоемкость изготовления.

Толщина ПП определяется исходным материалом, используемой элементной базой и воздействующими механическими нагрузками. Предпочтительными значениями толщин ПП являются 0,8; 1; 1,5; 2 мм. Толщина ПП должна быть увязана с диаметрами применяемых металлизированных отверстий (для качественной металлизации отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине платы должно быть более 0,33).

При использовании печатных размеров суммарную толщину ПП в зоне концевых контактов устанавливают в зависимости от требований на соединитель.

Толщина МПП зависит от числа и толщины слоев и склеивающих про-

кладок. Толщина прокладки между слоями должна быть не менее двух толщин ПР склеиваемых слоев.

При конструировании ПП необходимо особое внимание обращать на выбор основного материала, так как он должен обеспечивать стабильность физико-механических и электрических параметров ПП после воздействия механических нагрузок, климатических факторов и агрессивных химических сред. Для ПП, эксплуатируемых при малых механических нагрузках, следует использовать гетинакс, при средних и больших механических нагрузках — стеклотекстолит.

В случае эксплуатации ПП в условиях вибрационных нагрузок необходимо выбрать материал, обеспечивающий при заданных габаритах и точках крепления отсутствие резонансных явлений. Повысить жесткость конструкции ПП можно введением дополнительных точек крепления или металлического обрамления.

Выбирая материал для ПП определенного типа, конструктор должен

четко представлять возможные воздействия на материал агрессивных сред, используемых в процессе изготовления. Печатные платы с гальваническим соединением проводящих слоев в процессе изготовления подвергаются длительной обработке в гальванических ваннах, что отрицательно сказывается на клеевом слое, соединяющем фольгу с материалом основания, и на самом материале. Это может привести как к отслоению тонких проводников, так и к расслоению материала основания. Для выполнения ПП в этом случае следует применять материал типа СФ, а для плат со сложным ПР — материалы типа СФН, СТФ, ФТС, ФДМ.

При выборе материала для ПП следует иметь в виду, что материалы на основе бумаги (типа ГФ) легче обрабатываются при меньшем износе инструмента и позволяют применять штамповку для обработки по контуру и выполнения отверстий.

Стабильность большинства механических и электрических параметров ПП при воздействии влаги и повышенных температур определяется правильным выбором материала основания. Воздействие высоких температур и влаги на плату приводит к перераспределению внутренних напряжений, разрушению клевого слоя. При этом наблюдаются деформация платы, усадка и расслоение материала основания, отслоение элементов ПР. Поэтому при конструировании ПП, предназначенных для работы в условиях повышенных температур и влажности, необходимо использовать материалы типа СФН, СТФ, ФТС, ФДМ.

Размещение навесных ЭРЭ на ПП следует согласовать с конструктивными требованиями на печатный узел, блок и устройство в целом. При размещении навесных элементов необходимо предусматривать их рациональное взаимное расположение, чтобы обеспечить наиболее простую трассировку; малое взаимное влияние на электрические параметры и быстродействие; автоматическую сборку, пайку и контроль; малые габариты и массу; ремонтпригодность; эффективный теплоотвод.

Вариант установки элементов на ПП должен выбираться в соответствии с заданными условиями эксплуатации и другими требованиями к конструкции узла.

Размещение элементов конструкции ПП регламентируется условной координатной сеткой из двух взаимно перпендикулярных систем параллельных линий, расположенных на одинаковом (2,5 или 1,25 мм) расстоянии друг от друга. Две взаимно перпендикулярные линии координатной сетки с точкой пересечения в левом нижнем углу чертежа платы используются как оси координат, а точку их пересечения (узел координатной сетки) — как начало или базу координат.

Стороны ПП размещают на чертеже таким образом, чтобы они совпадали с линиями координатной сетки. Для обеспечения автоматизации процессов сборки и контроля на ПП предусматривают фиксирующие отверстия, которые следует располагать по диагонали или вдоль большей стороны платы на максимально возможном расстоянии друг от друга. Одно из отверстий следует предусматривать в точке пересечения осей координат. Допуски на диаметры фиксирующих отверстий и их расположение должны устанавливаться по 4 классу точности в соответствии с табл. 2.2.

Центры монтажных отверстий и КП под выводы навесных ЭРЭ располагают в узлах координатной сетки. Центры монтажных отверстий под неформуемые выводы многовыводных ЭРЭ, межцентровые расстояния которых не кратны шагу координатной сетки, располагают таким образом, чтобы в узле координатной сетки находился центр, по крайней мере, одного из монтажных отверстий, а центры монтажных отверстий под остальные выводы располагались в соответствии с требованиями конструкции устанавливаемого элемента. При выборе ЭРЭ следует учитывать, что использование таких элементов в значительной степени усложняет процесс изготовления и контроля ПП, сборки узлов.

Номинальные значения диаметров монтажных отверстий d :

$$d = d_3 + |\Delta d_{н.о}| + r, \quad (2.1)$$

где d_3 — максимальный диаметр вывода устанавливаемого ЭРЭ; $\Delta d_{н.о}$ — нижнее предельное отклонение от номинального диаметра монтажного отверстия; r — разница между минимальным диаметром отверстия и максимальным диаметром устанавливае-

мого вывода (исходя из условий пайки, выбирают в пределах 0,1... 0,4 мм).

В промышленности принят и применяется предпочтительный ряд отверстий — 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5 мм. Предельные отклонения диаметров монтажных отверстий Δd и отклонения от номинального положения центра отверстия δd приведены в табл. 2.2.

Размеры и конфигурацию крепежных и других конструктивных отверстий выбирают в зависимости от требований конструкции устанавливаемого элемента. Число типоразмеров любых отверстий на плате следует ограничивать, так как оно увеличивает количество инструмента и удлинит процесс обработки.

Все монтажные отверстия располагают в зоне КП. Металлизированные отверстия должны иметь КП с двух сторон ПП. На внутренних слоях МПП контактные площадки должны быть у тех отверстий, которые связаны электрически с проводящим рисунком данного слоя. Контактные площадки могут иметь произвольную форму. Предпочтительной является круглая форма. Контактные площадки, предназначенные под установку первого вывода многовыводного элемента, должны отличаться по форме от остальных. Со стороны пайки предпочтительно выполнять КП ассиметричной формы, развивая их в свободную от проводящего рисунка сторону.

Минимальный диаметр КП D вокруг монтажного отверстия:

$$D = (d + \Delta d_{в.о}) + 2b_n + \Delta t_{в.о} + 2\Delta d_{тр} + (\delta d^2 + \delta p^2 + \Delta t_{н.о}^2)^{0.5}, \quad (2.2)$$

где $\Delta d_{в.о}$ — верхнее предельное отклонение диаметра отверстия; $\Delta t_{в.о}$ — верхнее предельное отклонение ширины проводника; $\Delta t_{н.о}$ — нижнее предельное отклонение ширины проводника.

Для КП произвольной формы минимальный размер определяется диаметром вписанной окружности. Форма, размеры и размещение КП под планарные выводы ЭРЭ определяют на элемент и условиями обеспечения качества пайки при ручном и автоматизированном методах.

Вокруг КП, расположенных на широких проводниках и экранах, необ-

ходимо делать вырезы, как указано на рис. 2.6. Печатные контактные переключатели располагают в соответствии с конструкцией переключателя и требованиями на конструкцию изделия.



Рис. 2.6. Выполнение контактных площадок на широких проводниках и экранах

Концевые печатные контакты для печатных соединителей располагают по краю ПП. Размеры концевых контактов, шаг их расположения и допустимые отклонения от номинальных значений определяют по ТУ на гребенчатые соединители.

КП для автоматического контроля и диагностики выполняют круглой формы диаметром не менее 2 мм и располагают в узлах координатной сетки с шагом 2,5 мм в свободных местах в шахматном порядке, так чтобы расстояние между центрами соседних КП, лежащих на одной линии координатной сетки, было кратно 5, а на соседних — кратно 2,5.

После размещения КП, отверстий и определения запрещенных зон на полезном поле ПП производят трассировку проводников, соединяющих КП. Все элементы ПР располагают от края платы, паза, выреза, неметаллизированного отверстия диаметром более 1,5 мм на расстоянии не менее толщины платы, для плат толщиной менее 1 мм — на расстоянии не менее 1 мм.

При необходимости перевода проводника с одного ПС на другой используют металлизированные переходные отверстия, в которые не плавятся выводы ЭРЭ. Кроме того, могут использоваться неметаллизированные отверстия, куда вставляются куски медной проволоки, штыри, пустотелые заклепки и т. п.

Проводники располагаются по полезной площади платы равномерно на максимально возможном расстоянии от соседних элементов ПР платы с учетом соблюдения следующих требований: параллельно линиям координатной сетки или под углом, кратным 15°; параллельно направлению движения волны припоя или под углом к

нему не более 30° со стороны пайки, если ПР не покрывается защитной маской; во взаимно перпендикулярных направлениях — на соседних проводящих слоях ПП; перпендикулярно касательной к контуру круглой КП или одной из сторон КП, если ее форма отличается от круглой.

Печатные проводники выполняют одинаковой максимально возможной ширины по всей длине.

Номинальное значение ширины проводника t :

$$t = t_{\text{м.д}} + |\Delta t_{\text{н.о}}|, \quad (2.3)$$

где $t_{\text{м.д}}$ — минимально допустимая ширина проводника, определяется классом точности и возможной токовой нагрузкой.

Экраны выполняют в одной плоскости с проводниками или на отдельных слоях с вырезами, равномерно распределенными по площади экрана. Площадь вырезов должна составлять не менее 50% от общей площади экрана, форма вырезов произвольная. Если в зону экрана попадают контактные площадки, то вокруг них выполняют вырез шириной, обеспечивающей электрическую прочность изоляции, но не менее 1 мм.

Номинальное значение расстояния между соседними элементами проводящего рисунка

$$S = S_{\text{м.д}} + \Delta t_{\text{н.о}} + \delta l, \quad (2.4)$$

где $S_{\text{м.д}}$ — минимально допустимое расстояние между соседними элементами ПР.

Минимально допустимое расстояние между соседними элементами ПР выбирают, исходя из обеспечения электрической прочности изоляции или по табл. 2.2 в соответствии с классом точности.

Минимальное расстояние l для прокладки n проводников между двумя отверстиями с КП диаметрами D_1 и D_2 :

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + tn + S(n+1) + \delta l, \quad (2.5)$$

где n — число проводников.

Маркировочные знаки, выполненные из проводникового материала, располагают на свободном поле платы таким образом, чтобы суммарное расстояние между соседними элементами ПР было не менее минимально допустимого. Шрифт для маркировки

ПП должен быть высотой не менее 2,5 мм.

Пример 1. Минимальный диаметр КП для отверстия диаметром 1,1 мм ОПП 2 класса точности размерами 200×200 мм:

$$\begin{aligned} D &= d + \Delta d_{\text{н.о}} + 2b_{\text{н}} + \Delta t_{\text{в.о}} + \\ &+ (\delta d^2 + \delta p^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2)^{0,5} = \\ &= 1,1 + 0,15 + 2 \cdot 0,2 + 0,1 + \\ &+ (0,2^2 + 0,3^2 + 0,1^2)^{0,5} = 2,12 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Минимальное расстояние между центрами отверстий для прохождения одного проводника:

$$\begin{aligned} l &= \frac{D_1 + D_2}{2} + tn + S(n+1) + \\ &+ \delta l = \frac{2,12 + 2,12}{2} + 0,45 + \\ &+ 2 \cdot 0,45 + 0,1 = 3,57 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Пример 2. Минимальный диаметр КП для металлизированного отверстия диаметром 0,9 мм на ДПП 3 класса точности размерами 160××200 мм:

$$\begin{aligned} D &= d + \Delta d_{\text{в.о}} + 2b_{\text{н}} + \Delta t_{\text{н.о}} + \\ &+ (\delta d^2 + \delta p^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2)^{0,5} = \\ &= 0,9 + 0,05 + 2 \cdot 0,1 + 0,1 + \\ &+ (0,1^2 + 0,25^2 + 0,08^2)^{0,5} = \\ &= 1,53 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Минимальное расстояние между центрами отверстий для прохождения одного проводника:

$$\begin{aligned} l &= \frac{D_1 + D_2}{2} + tn + S(n+1) + \delta l = \\ &= 1,53 + 0,25 + 0,25 \cdot 2 + 0,05 = \\ &= 2,33 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Пример 3. Минимальный диаметр КП для металлизированных отверстий диаметром 0,8 мм на МПП 3 класса точности размерами 100×140 мм: на наружном слое

$$\begin{aligned} D_{\text{н}} &= d + \Delta d_{\text{н.о}} + 2b_{\text{н}} + \Delta t_{\text{н.о}} + \\ &+ 2 \Delta d_{\text{г.р}} + (\delta d^2 + \delta p^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2)^{0,5} = \\ &= 0,8 + 0,05 + 2 \cdot 0,1 + 0,1 + \\ &+ 2 \cdot 0,03 + (0,08^2 + 0,3^2 + 0,08^2)^{0,5} = \\ &= 1,53 \text{ мм;} \end{aligned}$$

на внутреннем слое

$$\begin{aligned} D_{\text{в}} &= d + \Delta d_{\text{в.о}} + 2b_{\text{в}} + \Delta t_{\text{в.о}} + \\ &+ 2 \Delta d_{\text{г.р}} + (\delta d^2 + \delta p^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2)^{0,5} = \\ &= 0,8 + 0,05 + 2 \cdot 0,05 + 0,1 + \\ &+ 2 \cdot 0,03 + (0,08^2 + 0,3^2 + 0,08^2)^{0,5} = \\ &= 1,43 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Минимальное расстояние между центрами отверстий для прохождения двух проводников:

на наружном слое

$$\begin{aligned} l &= \frac{D_{\text{н1}} + D_{\text{н2}}}{2} + tn + S(n+1) + \delta l = \\ &= 1,53 + 0,25 \cdot 2 + 0,25 \cdot 3 + 0,07 = \\ &= 2,85 \text{ мм;} \end{aligned}$$

на внутреннем слое

$$\begin{aligned} l &= \frac{D_{\text{в1}} + D_{\text{в2}}}{2} + tn + S(n+1) + \delta l = \\ &= 1,43 + 0,25 \cdot 2 + 0,25 \cdot 3 + 0,07 = \\ &= 2,75 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Стабильность электрических, механических и других параметров ПП может быть обеспечена применением металлических и неметаллических покрытий, характер которых может влиять на технологический процесс изготовления, стоимость платы, срок ее хранения.

На основании ПП, как правило, наносится электроизоляционное покрытие из компаундов или полимерных пленок с целью сохранения его диэлектрических свойств при воздействии влаги и всевозможных загрязнений. Использование покрытий не является основанием для увеличения допустимых значений электрических параметров платы.

В качестве покрытий ПР рекомендуется использовать металлы и сплавы, приведенные в табл. 2.3.

Контактные площадки и металлизированные отверстия покрываются металлом для улучшения смачиваемости припоем при пайке, а также лаками, сохраняющими паяемость и защищающими поверхность от коррозии и окислений.

Проводники и экраны, как правило, вместе с диэлектрическим основанием защищаются электроизоляционными покрытиями, которые позволяют уменьшить расход припоя при груп-

повой пайке волной припоя или окутанием, защитить ПР от загрязнения.

Печатные контакты переключателей и концевые контакты печатных соединителей покрывают благородными металлами — серебром, золотом, палладием и сплавами, обеспечивающими защиту поверхности от окисления, низкое переходное сопротивление, высокую устойчивость к износу при трении.

Расчет электрических параметров печатных плат

Размеры элементов ПР и их взаимное расположение влияют на электрические параметры ПП и должны учитываться при разработке ее конструкции. К таким параметрам относятся: омическое сопротивление проводников, допустимая токовая нагрузка, электрическая прочность и сопротивление изоляции, электрическая емкость.

Сопротивление печатных проводников. Омическое сопротивление печатных проводников в обычных низкочастотных платах, как правило, не оказывает влияния на работу схемы, однако при значительной протяженности и минимальной ширине проводника эта величина может достигнуть значений, способных внести искажения в работу устройства.

Сопротивление проводника из однородного металла R :

$$R = \frac{\rho}{h} \sum_{i=1}^k \frac{L_i}{t_i}, \quad (2.6)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление проводника (табл. 2.4); h — толщина проводника; k — число участков проводника на его расчетной длине, имеющих различную ширину; L_i — длина i -го участка проводника шириной t_i ; t_i — ширина проводника на i -м участке.

Сопротивление проводников с дополнительным покрытием рассчитывают как суммарную величину, если удельное сопротивление дополнительного покрытия значительно отличается от удельного сопротивления основного металла и если их толщины соизмеримы.

Омическое сопротивление печатного проводника из медной фольги с постоянной шириной можно ориен-

Таблица 2.3

Виды покрытий для проводящего рисунка

Покрытие	Толщина, мкм	Назначение покрытия
Сплав «Розе»	4 ... 10	Защита от коррозии, улучшение способности к пайке
Сплав олово—свинец	9 ... 12	То же
Серебряное	6 ... 12	Улучшение электропроводности и повышение износостойкости переключателей и концевых контактов
Сплав серебро—сурьма	6 ... 12	То же
Золотое	0,5 ... 2,5	Снижение переходного сопротивления и повышение износостойкости
Палладиевое	1 ... 5	Повышение износостойкости концевых контактов и переключателей
Никелевое *	3 ... 6	Придание поверхности переключателей твердости

* Используется в качестве подслоя под палладиевое покрытие.

тировочно определить по графику рис. 2.7.

Допустимая токовая нагрузка. Увеличение плотности компоновки навесных ЭРЭ на ПП приводит к увеличению энергоемкости печатных узлов и к увеличению токовой нагрузки на

печатные проводники, что увеличивает тепловыделение проводников. Оно обязательно должно приниматься во

Таблица 2.4

Удельное электрическое сопротивление ρ

Металл	$\rho \cdot 10^{-6}$ Ом/см
Медная фольга	1,72
Гальваническая медь	1,90
Химическая медь	2,80
Олово	12,0
Серебро	1,59
Золото	2,22
Никель	7,80
Палладий	10,80

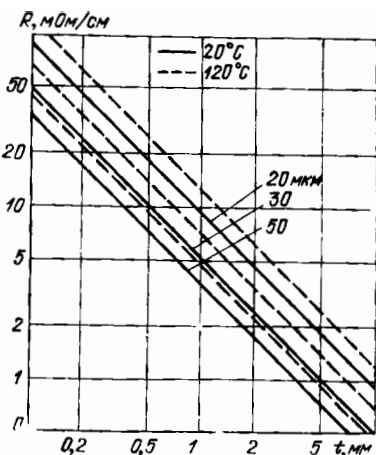


Рис. 2.7. Зависимость электрического сопротивления печатного проводника от его ширины

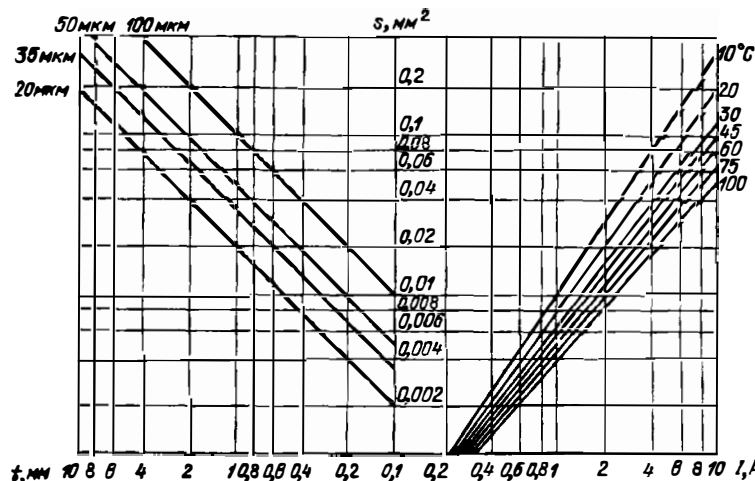


Рис. 2.8. Зависимость токовой нагрузки от ширины проводника

внимание при расчете теплового баланса РЭА.

Величину токовой нагрузки одиночных проводников из медной фольги с постоянной шириной и сечением s можно ориентировочно определить по графику рис. 2.8.

Для проводников, расположенных на расстоянии, меньшем их ширины, или на внутренних слоях МПП, а также для проводников, выполненных из гальванически осажденной меди, величину допустимой токовой нагрузки следует уменьшить на 15...20%.

Электрическая прочность изоляции. Основное влияние на нее оказывают тип материала основания ПП, вид дополнительного покрытия и расстояние между элементами ПР. Расстояние между элементами ПР для материалов типа СФ и ГФ выбирают в зависимости от приложенного напряжения и условий эксплуатации по табл. 2.5 и 2.6. При определении расстояния между элементами ПР на плате необходимо принимать во внимание допустимое отклонение от номинального значения в соответствии с классом точности, обусловленное технологией изготовления ПП.

Сопротивление изоляции между элементами проводящего рисунка ПП определяется свойствами применяемого материала, взаимным расположением и совместной протяженностью проводников, воздействием окружающей среды, наличием загрязнений.

Сопротивление изоляции R_s , Ом, между двумя проводниками, расположенными в одной плоскости на внешних слоях ПП,

$$R_s = \rho_s \frac{S}{L}, \quad (2.7)$$

где ρ_s — удельное поверхностное сопротивление материала основания, Ом; S — расстояние между проводниками, см; L — совместная протяженность проводников, см.

Сопротивление изоляции между двумя проводниками с переменным

Таблица 2.5

Допустимые расстояния между элементами ПР, расположенными в соседних проводящих слоях

Расстояние между элементами ПР, мм	Рабочее напряжение, В	
	Гетинакс	Стеклотекстолит
От 0,15 до 0,20	—	25
Свыше 0,2 до 0,3	—	50
» 0,3 до 0,4	75	100
» 0,4 до 0,5	150	200
» 0,5 до 0,75	250	350
» 0,75 до 1,5	350	500
» 1,5 до 2,5	500	850

Таблица 2.6

Допустимые расстояния между элементами ПР, расположенными в одном слое

Расстояние между элементами ПР, мм	Рабочее напряжение, В	
	Гетинакс	Стеклотекстолит
От 0,15 до 0,20	—	25
Свыше 0,2 до 0,3	30	50
» 0,3 до 0,4	100	150
» 0,4 до 0,7	150	300
» 0,7 до 1,2	300	400
» 1,2 до 2,0	400	600
» 2,0 до 3,5	500	830
» 3,5 до 5,0	660	1160
» 5,0 до 7,5	1160	1500

расстоянием между ними определяется как сумма сопротивлений на отдельных участках.

Сопротивление изоляции R_V между элементами ПР, расположенными на внутренних или соседних проводящих слоях:

$$R_V \approx \rho_V \frac{H_M}{P}, \quad (2.8)$$

где ρ_V — удельное объемное сопротивление материала основания, Ом·см; H_M — толщина материала основания между элементами ПР, см; P — площадь проекции одного элемента ПР на поверхности другого, см².

Определение фактического сопротивления изоляции особенно важно для разветвленных цепей МПП, совместная протяженность которых может достигать 30 см и более.

Сопротивление изоляции для ПП следует выбирать таким, чтобы оно было соизмеримо с расчетным, полученным на основе удельных норм на материал основания ПП, и не оказывало существенного шунтирующего действия на работоспособность узла.

Электрическая емкость. Проводящий рисунок ПП, в особенности многослойной, представляет собой сложную конфигурацию различных по размерам элементов ПР, расположенных как в одной плоскости, так и в соседних плоскостях. Это многообразные конфигурации и взаимных

расположений вызывает сложную перекрестную связь и создает большие затруднения в вычислении электрической емкости проводников C , которая приблизительно равна:

$$C \approx C_{\text{пог}} l, \quad (2.9)$$

где $C_{\text{пог}} = k\epsilon'$ — погонная емкость, пФ/см; l — длина взаимного перекрытия проводников, см; k — коэффициент пропорциональности (рис. 2.9); ϵ' — диэлектрическая проницаемость среды.

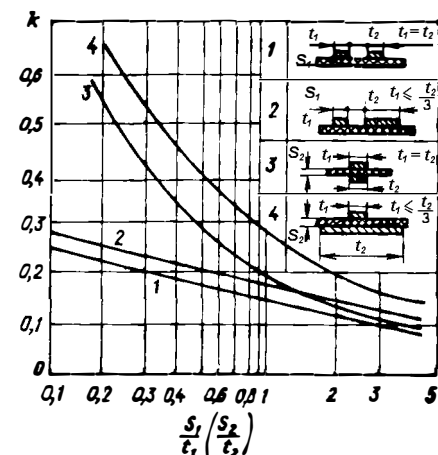


Рис. 2.9. Зависимость коэффициента пропорциональности k от параметров ПР платы

Для внешних слоев ПП без дополнительного лакового покрытия

$$\epsilon' = 0,5 (\epsilon_B + \epsilon_M), \quad (2.10)$$

где ϵ_B — диэлектрическая проницаемость воздуха; ϵ_M — диэлектрическая проницаемость материала основания.

Для внешних слоев ПП, покрытых электроизоляционным лаком,

$$\epsilon' = 0,5 (\epsilon_L + \epsilon_M), \quad (2.11)$$

где ϵ_L — диэлектрическая проницаемость лака.

Методы изготовления

Методы изготовления ПП могут быть разделены на три группы: субтрактивные, аддитивные, послойного наращивания.

Наиболее распространены субтрактивные методы, сущность которых состоит в создании на поверхности фольгированного диэлектрика ри-

сунка, защите его слоем металла или фоторезиста, дальнейшем удалении незащищенных участков медной фольги с помощью травления. Субтрактивный метод может быть позитивным, когда защита ПР осуществляется металлом (серебром, золотом, сплавами на основе олова и т. д.), а травление меди с незащищенных участков производится на последнем этапе изготовления ПП, и негативным, когда защита ПР осуществляется фоторезистом, а травление открытых мест медной фольги производится в начале технологического процесса — до создания межслойных соединений. Преимущества позитивного метода очевидны — диэлектрик, защищенный в процессе изготовления ПП медной фольгой, не подвергается вредным воздействиям химикатов и лучше сохраняет свои электрические свойства.

Рисунок на поверхности фольгированного диэлектрика может создаваться различными способами, наиболее распространенными из которых являются трафаретная печать и фотопечать.

При трафаретной печати на заготовку фольгированного диэлектрика через сетчатый трафарет наносится кислотостойкая краска, которая защищает медь от травления, а затем смыывается с помощью органических растворителей или растворов щелочи. Этот метод очень экономичен в серийном производстве, прост и поддается автоматизации. К недостаткам его следует отнести невозможность получения ПР высокой плотности, когда необходимы проводники шириной менее 0,3 мм с точными допусками, а также нецелесообразность его использования в мелкосерийном и опытным производстве из-за трудоемкого изготовления трафарета.

Фотопечать осуществляется с помощью жидких или сухих пленочных фоторезистов. Инструментом, с которого копируется на фольгированный диэлектрик рисунок, является фотошаблон, выполненный на фотопленке, пластике или стекле в масштабе 1:1. Такой метод получения рисунка обеспечивает высокую точность и четкость изображения и может использоваться как в серийном, так и в опытном производстве для получения ПП с повышенной плотностью ПР.

Несмотря на широкое распространение и хорошую освоенность, субтрактивные методы обладают рядом существенных недостатков, к которым относятся: большие потери меди, так как 60...80% медной фольги (в зависимости от плотности проводящего рисунка) удаляются при травлении; подтравливание элементов ПР, что ухудшает прочность сцепления проводников с основанием ПП и ограничивает таким образом возможность получения особо тонких проводников (шириной менее 0,1 мм); величину подтравливания можно уменьшить лишь использованием тонкомерной медной фольги — толщиной около 5 мкм; необходимость использования для изготовления фольгированных диэлектриков высококачественной медной фольги, получаемой электролитическим способом, что сопряжено с большими трудностями (особенно в случае тонкомерной фольги).

Субтрактивным методом изготавливаются ОПП и ДПП, а также слои МПП. Для ОПП используется односторонний фольгированный диэлектрик. ПР выполняется травлением фольги, а монтажные отверстия пробиваются или сверлятся (в случае изготовления малых серий или при необходимости получения отверстий диаметром менее 0,9 мм). Для улучшения лаяемости контактные площадки ОПП покрываются горячим способом сплавом на основе олова, а места, не подвергающиеся пайке, защищаются оксидной маской. Схема технологического процесса изготовления ОПП приведена на рис. 2.10.

Проводящие рисунки на двух сторонах ДПП также выполняются травлением фольги. Наиболее сложной и ответственной операцией технологического процесса изготовления ДПП является создание межслойных соединений. Для электрического соединения рисунков, расположенных на двух сторонах ПП, в настоящее время применяют металлизацию отверстий, которая выполняется химико-гальваническим способом. Отверстия, подлежащие металлизации, сверлят, так как пробивка может привести к появлению микротрещин, снижающих качество металлизации. При травлении меди проводники защищаются сплавом на основе олова, в дальнейшем это покрытие служит также для улучшения лаяемости.

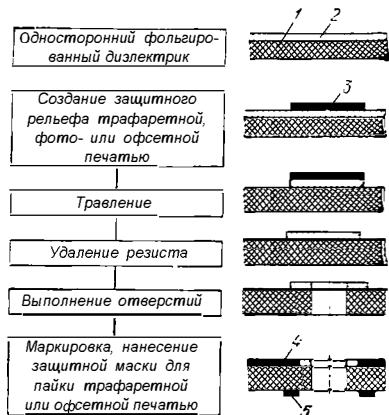


Рис. 2.10. Схема технологического процесса изготовления ОПП: 1 — материал основания; 2 — фольга; 3 — фоторезист; 4 — защитная маска; 5 — маркировка

Кроме металлизации отверстий для создания соединений ПР, расположенных на двух сторонах ПП, могут применяться и другие способы, такие, как установка заклепок, штырей, отрезков проволоки или заполнение переходных неметаллизированных отверстий припоем. Схема технологического процесса изготовления ДПП субтрактивным (позитивным) методом приведена на рис. 2.11.

Наиболее распространенные в настоящее время приемы изготовления МПП — металлизация сквозных отверстий, попарное прессование, открытые контактные площадки, выступающие выводы — основаны на субтрактивных методах.

Отдельные слои МПП выполняются на одно- или двустороннем тонком фольгированном диэлектрике. В методах попарного прессования и металлизации сквозных отверстий применяется гальванический способ соединения двух соседних внутренних слоев МПП; затем слои и изоляционные прокладки между ними прессуются, причем связующее вещество изоляционных прокладок в процессе прессования полимеризуется и соединяет слои в единый монолит. Электрическое соединение отдельных слоев осуществляется сквозными металли-

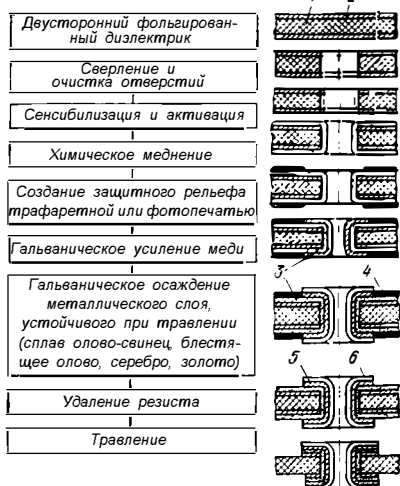


Рис. 2.11. Схема технологического процесса изготовления ДПП: 1 — материал основания; 2 — фольга; 3 — химическая осажденная медь; 4 — фоторезист; 5 — гальванически осажденная медь; 6 — металлорезист

зированными отверстиями. В методах открытых контактных площадок и выступающих выводов соединение различных слоев непосредственно не выполняется. Выводы ЭРЭ или перемычки припаиваются к соответствующим слоям через специальные окна.

Метод металлизации сквозных отверстий является наиболее серийно-способным, так как изготовление отдельных слоев производится одновременно травлением фольги на одностороннем фольгированном диэлектрике, а после прессования МПП получается структура, подобная исходному материалу для изготовления ДПП. Последующие операции технологического процесса выполняются в соответствии с технологическим процессом изготовления ДПП субтрактивным (позитивным) методом.

Наиболее ответственной операцией при изготовлении МПП, как и при изготовлении ДПП, является металлизация отверстий. В МПП необходимо добиться надежного соединения металлизации в отверстиях с контактными площадками, расположенными на внутренних слоях МПП, что достигается благодаря подтравливанию диэлектрика в отверстиях и дает возможность осуществить трехсторонний охват выступающего в отверстие

медного кольца контактной площадки внутреннего слоя.

Точность совмещения ПР на всех слоях МПП достигается применением одной базы — выполненных с высокой точностью технологических отверстий, на которые производится базирование заготовок слоев при получении ПР, а также прессования и сверления.

Схема технологического процесса изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий приведена на рис. 2.12.

Материалом для изготовления ПП аддитивным методом является нефольгированный диэлектрик, на который наносится ПР. Способы создания ПР могут быть различными: наклеивание предварительно выполненных гальваническим способом на временном металлическом основании проводников и контактных площадок на основание ПП (метод переноса); создание ПР при помощи токопроводящей пасты, наносимой на поверхность диэлектрика через сетчатый трафарет, с последующей термической обработкой для улучшения ее сцепления с диэлектриком;

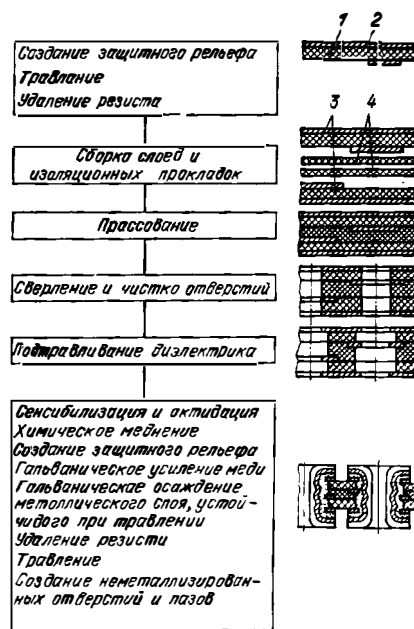


Рис. 2.12. Схема технологического процесса изготовления МПП: 1 — материал основания; 2 — фольга; 3 — слой МПП; 4 — прокладка

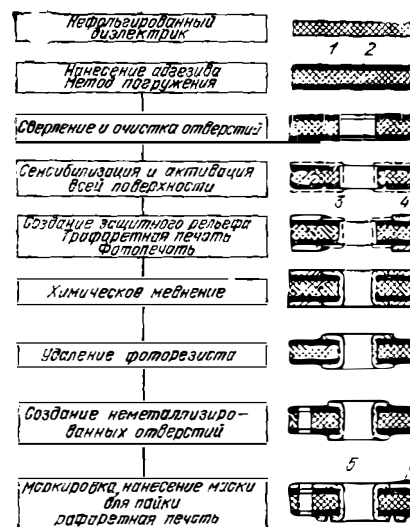


Рис. 2.13. Схема технологического процесса изготовления ПП аддитивным методом: 1 — материал основания; 2 — адгезив; 3 — активный слой; 4 — резистивная маска; 5 — проводящий слой; 6 — защитная маска

выполнение проводников, контактных площадок с одновременной металлизацией отверстий химическим способом. В данном случае диэлектрик предварительно подвергается специальной обработке для создания сцепления металла с основанием, затем наносятся толстые слои химически осажденной меди. Толщина слоя меди в отверстиях и на поверхности диэлектрика равномерна, по свойствам она не отличается от гальванически осажденной. Однако скорость осаждения довольно низкая, что затрудняет широкое внедрение этого способа. Для ускорения процесса применяют комбинацию химического и гальванического способов осаждения меди. Схема такого технологического процесса приведена на рис. 2.13.

Преимуществами аддитивного метода по сравнению с субтрактивным являются: отсутствие подтравливания проводников, что дает возможность изготавливать ПП с шириной проводников около 0,1 мм; экономия меди и других веществ, применяемых для травления; однородность соединений между проводниками и отверстиями.

Недостатком процесса является его

высокая стоимость, низкая производительность и недостаточная отработанность из-за отсутствия в настоящее время основных и вспомогательных материалов необходимого качества.

Метод послойного наращивания из-за его низкой серийности и высокой стоимости в настоящее время применяется редко. Он пригоден только для изготовления МПП, причем многослойная структура формируется в непрерывном процессе последовательного нанесения проводящих и диэлектрических слоев на основание МПП. В диэлектрических слоях в местах, предназначенных для межслойных переходов, создаются окна, через которые осуществляется электрическое соединение последующего проводящего слоя с предыдущим.

Оригиналы и фотошаблоны печатных плат

Инструментом для изготовления ПП является фотошаблон, который изготавливается на малоусадочной контрастной фототехнической пленке типа ФТ-41П или на стеклянной фотопластине.

В производстве ПП могут применяться фотошаблоны как с позитивным изображением ПР, так и с негативным, причем в зависимости от вида фотошаблона различают позитивные и негативные методы изготовления ПП.

Зеркальное негативное изображение рисунка на фотошаблоне изготавливают в случае применения негативного фоторезиста и фотохимического или негативного метода изготовления ПП; зеркальное позитивное изображение рисунка на фотошаблоне применяется при негативном фоторезисте и позитивном методе изготовления ПП. При изготовлении МПП методом металлизации сквозных отверстий рабочие фотошаблоны внутренних слоев имеют зеркальное негативное изображение; фотошаблоны наружных слоев — зеркальное позитивное изображение.

Действительные размеры изображения рисунка ПП на рабочем фотошаблоне могут отличаться от необходимых по чертежу размеров на 0,05...0,02 мм в зависимости от класса точности ПП. Изображение должно быть контрастным: оптическая

плотность прозрачных зон 0,19 ед., непрозрачных зон — 2,5 ед.

Наиболее ответственной операцией при изготовлении фотошаблонов ДПП и МПП является операция их совмещения, обеспечивающая требуемую точность совмещения отдельных слоев МПП или изображений на двух сторонах ДПП. Совмещение фотошаблонов осуществляется с помощью специальных реперных знаков. Совмещенные фотошаблоны или склеиваются по одному из технологических полей (при этом для повышения точности изображения на заготовке ПП между фотошаблонами двух сторон платы вклеивается прокладка, толщина которой равна толщине материала основания), или производится пробивка фиксирующих отверстий и установка фотошаблонов на заготовке материала основания производится при помощи фиксирующих штырей, выполненных с высокой точностью. При изготовлении МПП методом металлизации сквозных отверстий предпочтительно вместо совмещения фотошаблонов производить пробивку фиксирующих отверстий непосредственно на заготовках после их травления перед операцией прессования. Таким образом удается повысить точность совмещения слоев.

Фотошаблоны изготавливаются фототравлением оригиналов, выполненных в увеличенном масштабе, и контактным копированием с оригиналов, вырезанных на координатографе в масштабе 1:1. Наибольшее распространение в последнее время получил метод изготовления оригиналов экспонированием в масштабе 1:1 светочувствительного материала (фотопластины) световым лучом на координатографе с цифровым программным управлением. Световая головка содержит систему диафрагм с 25—70 символами. Таким образом можно получить четкие линии шириной от 0,1 мм и более, а также выполнить отдельные элементы рисунка — контактные площадки различных диаметров. Работа координатографа осуществляется по программе, получаемой ручным, полуавтоматическим или автоматическим способом.

При ручном или полуавтоматическом программировании вводная информация выдается с помощью кодирующих устройств в соответствии с чертежом ПП. При автоматическом программировании вводная информация

выдается с выходного устройства ЭВМ системы машинного проектирования.

Однако продолжают применяться и традиционные методы: вычерчивание тушью; наклеивание липкой ленты (аппликация); вырезание в масштабе 2:1 или 4:1.

Вычерчивание производится на малоусадочной бумаге типа ватман. Сначала на специальном наколочном столе на основу наносятся центры отверстий. Контактные площадки и проводники вычерчиваются чертежным инструментом (контуры всех элементов должны быть четкими, тушь должна быть матово-черной без бликов). Метод вычерчивания очень трудоемок.

При изготовлении оригиналов методом наклеивания липкой ленты рисунок выполняется цветной лентой на основе из бумаги или малоусадочной пленки. Для исключения нанесения центров отверстий применяется пленка с нанесенной координатной сеткой. Таким способом можно получить рисунок с хорошей резкостью контуров, который можно репродуцировать в отраженном и проходящем свете. Достоинства этого метода — низкая трудоемкость и возможность легкой корректировки оригинала, недостатки — низкая точность, трудоемкость выполнения тонких печатных проводников. Поэтому этот метод изготовления оригиналов не применяют для ОПП и ДПП 3 и 4 классов точности, а также для всех видов МПП.

Оригиналы высокоточных ПП изготавливают методом резания на стекле, покрытом эмалью, или на специальных малоусадочных двуслойных пленках, верхний вырезаемый слой которых является цветным, а основа — бесцветной (прозрачной). Вырезание производится на координатографах с точностью $\pm 0,05$ мм. Недостатком этого метода является большая трудоемкость, высокая стоимость и сложность автоматического оборудования.

2.2. МНОГОСЛОЙНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПЛАТЫ

Типы многослойных керамических плат

Многослойная керамическая плата (МКП) — изделие на основе керамики, состоящее из чередующихся про-

водниковых и изоляционных слоев. В зависимости от конструкции и технологии изготовления различают МКП трех исполнений (рис. 2.14):

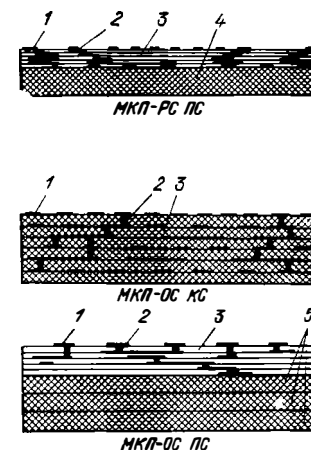


Рис. 2.14. Схемы конструкций МКП: 1 — проводящий рисунок; 2 — межслойный переход; 3 — изоляционный слой; 4, 5 — заготовки из спеченной и пластифицированной керамики соответственно

МКП-РС ПК — плата с раздельным спеканием печатных слоев, у которой проводящие и изоляционные слои раздельно наносятся и вжигаются на общую заготовку из обожженной керамики;

МКП-ОС КС — плата с одновременным спеканием керамических слоев, у которой проводящие слои наносятся на отдельные заготовки из пластифицированной керамики и затем одновременно спекаются;

МКП-ОС ПК — плата с одновременным спеканием печатных слоев, у которой проводящие и изоляционные слои последовательно наносятся на общую заготовку из пластифицированной керамики и затем одновременно спекаются.

В зависимости от способа монтажа в РЭА различают МКП трех типов: с контактными площадками для монтажа гибкими проводниками или шлейфами; с плоскими выводами, припаянными твердым припоем, для их распылки в отверстия ПП.

Способы присоединения выводов и монтажа МКП в РЭА приведены на рис. 2.15. Контакты МКП, распо-

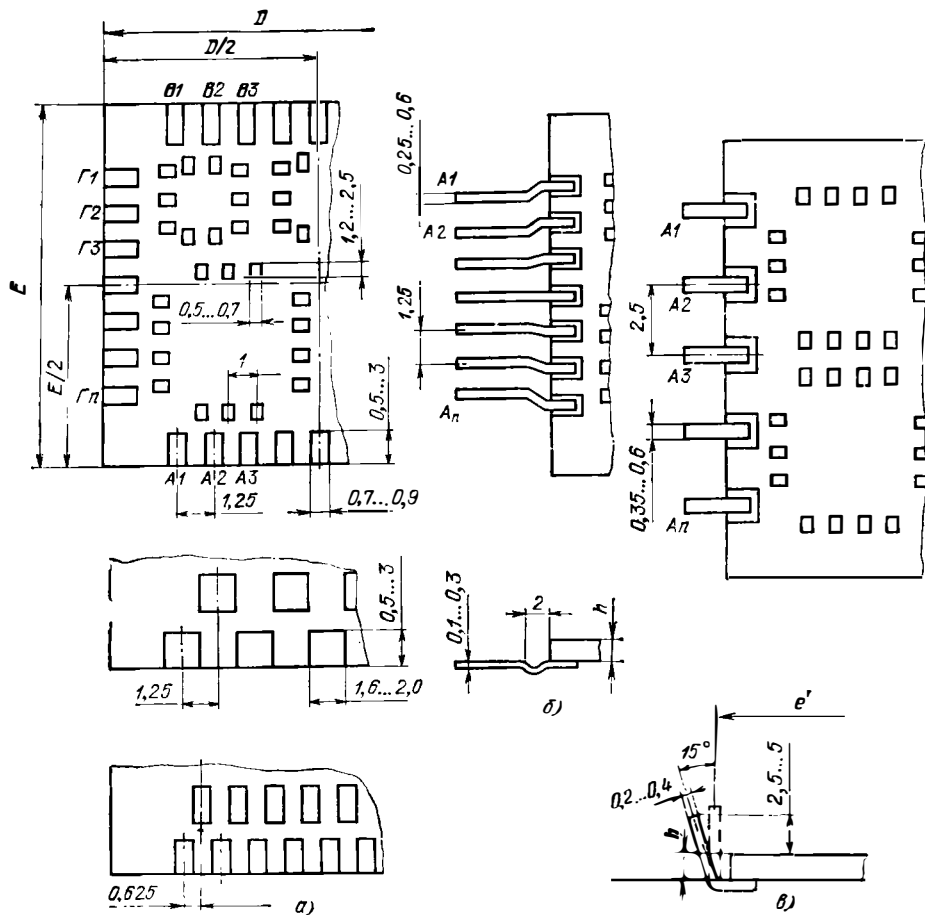


Рис. 2.15. Способы присоединения выводов МКП: а — с контактными площадками для монтажа гибкими проводниками; б — с плоскими выводами; в — с выводами типа ДИП для распайки в отверстиях ПП

Таблица 2.7
Основные размеры МКП

$D_{\text{НОМ}}$, мм	$E_{\text{НОМ}}$, мм	h_{max} , мм		
		РС	ПС	ОС
35	30	1,5	1,5	1,5
50	30	1,5	1,5	1,5
60	20	1,5	1,5	1,5
60	50*	2,0	2,0	2,0
70	35	2,0	2,0	2,0
85	30	2,0	2,5	2,0
100	60*	2,5	2,5	2,5
120	100*	2,5	3,0	2,5

Примечание. Звездочкой отмечены предпочтительные размеры.

женные по нижней А и верхней В сторонам, нумеруются слева направо, а расположенные по левой Г и правой Б сторонам — сверху вниз. Шаг установки выводов для плат с двухрядным расположением контактных площадок 0,625 или 1,25 мм, а для плат с одиорядным — 1,25 мм.

Размеры МКП приведены в табл. 2.7. При разработке МКП с габаритными размерами D, E, отсутствующими в табл. 2.7, необходимо до 80 мм длину и ширину платы выбирать кратными 5 мм, а свыше 80 мм — кратными 10 мм.

Соотношение размеров сторон МКП для первых двух исполнений должно

соответствовать условию $1 \leq D/E \leq 1,5$, для третьего — $1 \leq D/E \leq 4$.

Технология изготовления

Многослойные керамические платы с раздельным спеканием печатных слоев изготавливают по технологии, базирующейся на процессах, свойственных производству толстопленочных ГИС. На плату-заготовку из обожженной керамики способом трафаретной печати наносят проводящий слой из серебропалладиевой пасты и вжигают его. Тем же способом наносят изоляционный слой из диэлектрической пасты ПДФ. В изоляционном слое оставляют открытые участки — «колодцы», которые заполняют через сетчатый трафарет проводящей пастой и вжигают, образуя межслойные переходы. Изоляционные слои формируют за несколько нанесений — вжиганий. Толщина линии ПР 7...10 мкм, а диэлектрических слоев — 50...60 мкм. Минимальная ширина проводников $t=200$ мкм, минимальный зазор между ними $S=200$ мкм. Номинальными размерами являются $t=300$ мкм; $S=300$ мкм. Размер межслойного перехода $0,5 \times 0,5$ мм. Максимальное число проводящих слоев 10. На практике в большинстве случаев платы выполняют из 6—8 проводящих слоев.

Преимуществами таких плат являются: относительно простое оборудование и приспособления для изготовления (установка трафаретной печати, трафареты, ковейерная печь с воздушной атмосферой), что позволяет изготавливать такие платы на предприятиях, где освоена технология толстопленочных гибридных ИС; отсутствие усадки при вжигании слоев, что обеспечивает точное расположение контактных площадок на поверхности платы, а также создает условия для надежного контактирования при автоматизированном контроле электрических параметров МКП и для обеспечения автоматизированного монтажа ИС на плату. Недостатки — использование драгоценных металлов; относительно высокая трудоемкость (20...25 нормо/ч); относительно высокая паразитная емкость (5...5,4 пФ/см у проводников, расположенных друг над другом).

Многослойные керамические пла-

ты с одновременным спеканием керамических слоев выполняются не по последовательной (как у МКП-РС ПС), а по параллельной технологической схеме, основой которой являются: изготовление шликера на основе керамического материала ВК94-1; литые пластифицированной керамической пленки толщиной 0,2 мм; изготовление заготовок слоев; штамповка проходных отверстий в слоях для межслойных переходов диаметром 0,4 мм (при этом используется весьма простой штамп, состоящий из матрицы с отверстиями и пуансона в виде пластичного тела из полиуретана); металлизация слоев через сетчатый трафарет в соответствии со схемным рисунком и заполнение отверстий пастой на основе вольфрама и молибдена; сборка и прессование слоев в монолит; обрезка монолита; совместное спекание монолита в атмосфере водорода; химическое никелирование контактных площадок; контроль электрических параметров; лужение контактных площадок.

Преимущества — отсутствие драгоценных металлов; высокая адгезия контактных площадок, малая паразитная емкость (0,85...1,1 пФ/см); возможность двустороннего монтажа ИС; низкая трудоемкость (7...9 нормо/ч), короткий цикл изготовления; высокая серийность; возможность автоматизации технологических процессов. К недостаткам относятся: разброс величины усадки от партии к партии (до $\pm 1\%$), что затрудняет автоматизированный контроль электрических параметров; использование относительно сложного оборудования, свойственного керамическому производству.

Многослойные керамические платы с одновременным спеканием печатных слоев выполняются по следующей технологической схеме: на монолитную подложку из пластифицированной керамики последовательно наносят проводящие и диэлектрические слои с подсушкой каждого из них, а затем одновременно спекают в атмосфере водорода.

Этому виду плат свойственны некоторые недостатки, рассмотренные выше. К достоинствам этих плат относят: низкую стоимость материалов; один процесс обжига; отсутствие штампов для формирования межслойных переходов.

Таблица 2.8

Технические характеристики многослойных керамических плат

Наименование характеристики	Вид МКП		
	РС ПС	ОС КС	ОС ПС
Габаритные размеры, мм	120×100	120×100	120×100
Число проводящих слоев, шт.	До 10	До 10	До 16
Ширина проводников, мм:			
минимальная	0,2	0,2	0,2
номинальная	0,3	0,3	0,3
Зазор между проводниками, мм:			
минимальный	0,2	0,2	0,2
номинальный	0,3	0,3	0,3
Шаг выводов (контактных площадок) микросхем, мм	1	1	1
Шаг контактных площадок (выводов) для подсоединения, мм	1,25	0,625; 1,25; 2,5	1,25
Число контактных площадок (выводов) для подсоединения, шт.	До 340	До 340	До 340
Число 16-выводных ИС, устанавливаемых на плате, шт.	168	168	168
Число 42-выводных БИС, устанавливаемых на плате, шт.	56	56	56
Прочность контактных площадок на 1 мм ² , кг	0,25 ... 0,8	1,5 ... 2	1 ... 1,5
Удельное электрическое сопротивление проводников, Ом/□	0,03	0,01 ... 0,03	0,01 ... 0,03
Удельная емкость проводников шириной 0,3 мм, расположенных друг над другом, пФ/см	5 ... 5,4	0,8 ... 1,1	5 ... 6
Масса платы, г	100	80 ... 120	80 ... 120
Допустимое число перепаяк микросхем	5	10	10

Технические характеристики

Все МКП имеют высокие технические характеристики (табл. 2.8). Кроме отмеченных в таблице следует особо выделить высокую теплопроводность керамики (0,032 кал/см·с°С), которая в 21 раз превосходит теплопроводность стеклотекстолита, и низкие диэлектрические потери, что позволяет использовать МКП на высоких частотах.

Монтаж микросхем на многослойных керамических платах

Монтаж микросхем (ИС, БИС) и других ЭРЭ на МКП производится методом повторного расплавления дозированного припоя, нанесенного на выводы микросхем в микрокорпусах и контактные площадки МКП.

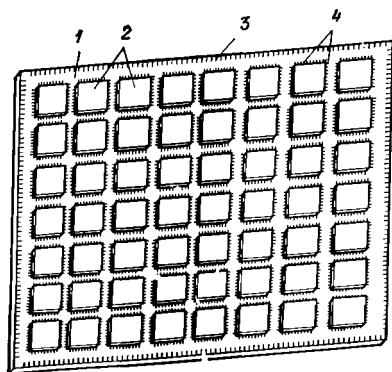


Рис. 2.16. Функциональный узел: 1 — МКП; 2 — БИС в 42-х выводных микрокорпусах; 3 — контактные площадки для межузлового монтажа; 4 — то же, для монтажа БИС

Этот метод реализуется либо путем локального нагрева платы и микросхемы струей разогретого газа (причем плата предварительно подогрета до температуры несколько ниже температуры плавления припоя), либо групповой пайкой в конвейерной печи. На рис. 2.16 показан общий вид функционального узла, содержащего 56 42-выводных БИС. Другой вид конструкции функциональных узлов представляет собой БИС, содержащую несколько микросхем в микрокорпусах (от 2 до 16), установленных на материнской МКП с выводами (аналогично корпусной БИС). Такое конструктивное исполнение позволяет изготавливать БИС с большими функциональными возможностями при одинаковых, по сравнению со стандартными корпусными БИС, габаритах.

Краткая характеристика микрокорпусов

Микрокорпус — разновидность корпуса микросхемы, в котором для уменьшения габаритов и массы располагают выводы или выводные площадки по четырем сторонам (периферийные МК) или по всей нижней поверхности (матричные МК) (рис. 2.17).

В табл. 2.9 приведены сравнительные характеристики периферийных (с шагом выводов 1 мм) и матричных

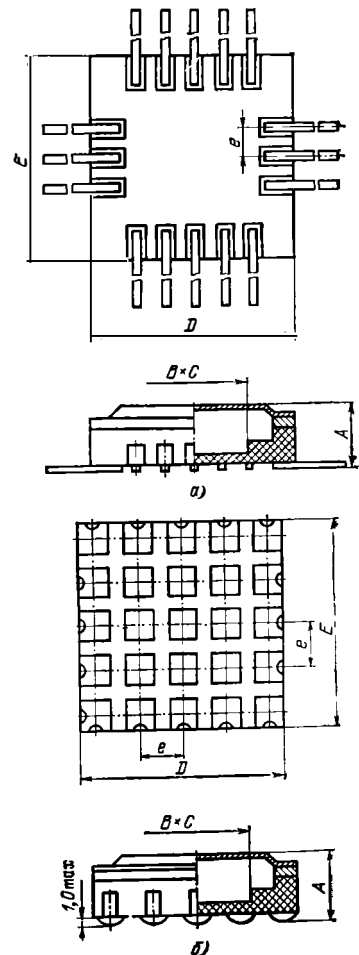


Рис. 2.17. Конструкции микрокорпусов с периферийным (а) и матричным расположением выводов (б)

Таблица 2.9

Сравнительные характеристики периферийных и матричных микрокорпусов

Число выводов	Периферийный микрокорпус, $e=1$ мм		Матричный микрокорпус				Коэффициенты эффективности		
	Размеры, мм	S_1 , мм ²	$e=2$ мм		$e=2,5$ мм		K_1	K_2	K_3
			Размеры, мм	S_2 , мм ²	Размеры, мм	S_3 , мм ²			
16	6,8×6,8	46,2	7×7	49	11×11	121	0,94	0,38	2,4
24	9,5×7,9	75	9×9	81	13,5×13,5	182	0,94	0,41	2,2
48	14,5×14,5	210	13×13	169	18,5×18,5	342	1,25	0,6	2,0
64	18,6×18,6	346	15×15	225	21×21	441	1,55	0,78	1,95
100	28×28	784	19×19	361	26×26	676	2,2	1,15	1,85
144	38×38	1444	23×23	529	31×31	961	2,7	1,5	1,83
196	52×52	2700	27×27	729	36×36	1296	3,7	2,0	1,78

(с шагом выводных площадок 2 и 2,5 мм) микрокорпусов по занимаемой на плате площади в зависимости от числа выводов. Коэффициенты $K_1 = S_1/S_2$, $K_2 = S_1/S_3$, $K_3 = S_3/S_2$ показывают, что матричные микрокорпуса с шагом выводных площадок 2,5 мм эффективны при большом числе выводов, с шагом 2 мм эффективны практически при любом числе выводов по сравнению с периферийными, а из матричных наиболее эффективны микрокорпуса с шагом 2 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долкерт В. М., Новик Г. Х. Конструирование и электрические характеристики многослойных печатных плат. — М.: Сов. радио, 1974.
2. Смелынский Ф. С., Горелов Н. В., Коновалов П. Т. Фольги-

рованные слоистые пластики для печатных схем. — М.: Энергия, 1969.

3. Федулова А. А., Явич Э. Р., Котов Е. И. Многослойные печатные платы. — М.: Сов. радио, 1973.

4. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры: Пер. с нем./Под ред. В. Н. Черняева. — М.: Энергия, 1980.

5. Лаймен Д. Последние достижения в области сборки. — Электроника, 1976, № 22.

6. Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства: Вопросы конструирования МЭА. 1979, вып. 6(18).

7. Electronic products magazine, 1980, nov.

8. Лаймен Д. Носители кристаллов и корпуса с матрицами выводов меняют лицо печатных плат. — Электроника, 1981, № 26.

Б. МЕХАНИЗМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

3. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ, ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ МЕХАНИЗМОВ

Основные аббревиатуры

- ЗП — зубчатая передача
 КП — кинематическая погрешность
 МРХ — мертвый ход
 Пл — план (ПлС — план скоростей, ПлУ — план ускорений)
 ЦТ — центр тяжести

3.1. КИНЕМАТИКА МЕХАНИЗМОВ

Основные расчеты механизмов

После выбора или составления кинематической схемы механизма выполняется расчет его параметров. При одной и той же кинематической схеме, но при различных исходных данных с помощью расчетов можно получить различные по назначению и использованию механизмы. Основными расчетами являются:

кинематические — определение зависимостей между обобщенной координатой (положением) ведущего звена и обобщенными координатами (положением, скоростью, ускорением) ведомого звена;

статические (силовые) — определение реакций опор в кинематических парах, сил трения и КПД механизма при заданных внешних силах и законе работы;

динамические — определение законов движения звеньев механизма по заданным законам изменения внешних сил;

точностные — определение ошибок (отклонений от номинальных, расчетных значений) положений звеньев механизма по заданным законам изменения внешних сил.

При расчетах механизма внешними силами считаются как силы, связанные с принципом работы данного механизма, так и силы, вызываемые внешними факторами (вибрация, температура, влажность и др.).

При кинематическом расчете решаются уравнения

$$y = y(x_1); \quad v = v(x_1); \quad a = a(x_1), \quad (3.1)$$

где y, v, a — обобщенные координаты в виде положения, скорости и ускорения ведомого звена; x_1 — обобщенная координата (положение) ведущего звена. В зависимости от вида движения величины x_1, y, v, a могут иметь смысл углового или линейного перемещения или их производных в виде угловых или линейных скоростей и ускорений.

Первое уравнение (3.1), связывающее положение ведущего и ведомого звеньев, называют функцией положения, или передаточной функцией. При введении в это уравнение функции $x_1 = \Psi(t)$ получаем уравнение движения:

$$y = y[\Psi(t)]. \quad (3.2)$$

Методы определения скоростей и ускорений

Для получения и исследования зависимостей (3.1) применяют метод планов, метод кинематических диаграмм и аналитический метод.

Метод планов. Определение положений звеньев и траекторий точек проводится на кинематической схеме механизма, называемой планом положений. При его вычерчивании рекомендуется выбирать масштабы 0,0001; 0,0002; (0,00025); 0,0005; 0,001; 0,002; (0,0025); 0,005; 0,01 м/мм и т. д. Масштабы, указанные в скобках, менее предпочтительны.

Для построения планов скоростей и ускорений используют векторные уравнения:

$$\begin{aligned} v_B &= v_A + v_{BA}; \\ a_B &= a_A + a_{BA}^n + a_{BA}^t, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где v_A и v_B — скорости точек A и B звена; v_{BA} — вращательная скорость точки B относительно точки A ; a_A и a_B — абсолютные ускорения точек A и B ; a^n_{BA} и a^t_{BA} — нормальная и тангенциальная составляющие вращательного ускорения точки B относительно точки A .

Для плоского движения пользуются соотношениями:

$$v_{BA} = \omega r; \quad a^n_{BA} = \omega^2 r; \quad a^t_{BA} = \varepsilon r;$$

$$a_{BA} = r \sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4},$$

где ω и ε — угловые скорость и ускорение звена; r — расстояние между точками A и B ; a_{BA} — полное ускорение вращения.

При определении скоростей и ускорений в кинематических группах используют также уравнения для составного движения:

$$v_B = v^e_B + v^r_B; \quad a_B = a^e_B + a^r_B + a^c_B,$$

где v_B и a_B — абсолютные скорость и ускорение точки B ; v^e_B и v^r_B — переносная и относительная скорости точки; a^e_B и a^r_B — переносное и относительное ускорения точки; a^c_B — ускорение Корнолиса в точке. Модуль $|a^c_B| = 2\omega_e v^r_B$, где ω_e — угловая скорость переносного движения.

Пример 1. Построить ПлС и ПлУ механизма (рис. 3.1, а), кривошип OA которого в данный момент времени имеет угловую скорость ω и угловое ускорение ε .

Построение плана скоростей (рис. 3.1, б). Из произвольного

полюса p откладываем отрезок pa , параллельный скорости v_A и равный $pa = v_A/M_v = \omega l_{OA}/M_v$,

где M_v — масштаб скорости (м/с)/мм; l_{OA} — длина отрезка OA .

В соответствии с уравнением (3.3) $v_B = v_A + v_{BA}$, в котором известны величина и направление вектора v_A и направления векторов v_B и v_{BA} , строим треугольник pab . Стороны треугольника pa и ab соответствуют скоростям v_B и v_{BA} . При этом $v_B = (pb)M_v$; $v_{BA} = (ab)M_v$.

Угловые скорости звеньев 2 и 3 определяются из соотношений $\omega_2 = v_{BA}/l_{BA}$; $\omega_3 = v_B/l_{BN}$.

Скорость точки C звена 3 направлена перпендикулярно линии CH : $v_C = \omega_3 l_{CH}$.

Используя уравнение $v_K = v^e_K + v^r_K$, где v_K , v^r_K и v^e_K — абсолютная, относительная и переносная скорости точки K звена 5, построим треугольник pck . В этом уравнении $v^e_K = v_C$, скорости v^r_K и v_K и угловая скорость звена 5 ω_5 определяются из соотношений

$$v^r_K = (ck) M_v; \quad v_K = (pk) M_v;$$

$$\omega_5 = v_K/l_{NC}.$$

Построение плана ускорений (рис. 3.1, в). Определяем нормальную и тангенциальную составляющие ускорения точки A :

$$a^n_A = \omega^2 l_{OA}; \quad a^t_A = \varepsilon l_{OA}.$$

Полное ускорение a_A , м/с², определяется из ПлУ: $a_A = (qa)M_a$, где M_a — масштаб ускорений, (м/с²)/мм.

Ускорение точки B находим, решая графически систему уравнений:

$$a_B = a_A + a^n_{BA} + a^t_{BA};$$

$$a_B = a^n_{BN} + a^t_{BN}.$$

В этих уравнениях известны ускорения a_A ; $a^n_{BA} = \omega_2^2 l_{AB}$; $a^t_{BA} = \omega_2^2 l_{BN}$, изображенные на ПлУ отрезками qa , am и qf , а также направления ускорений a^t_{BA} и a^t_{BN} . Пересечение линий, соответствующих этим ускорениям, определяет точку b . Ускорение точки B $a_B = (qb)M_a$.

Далее определяем ускорение точки C звена 3 как геометрическую сумму ускорений:

$$a^n_{CH} = \omega_3^2 l_{CH}; \quad a^t_{CH} = \varepsilon l_{CH}.$$

где $\varepsilon_3 = (fb')M_a/l_{BN} = a^t_{BN}/l_{BN}$. Из ПлУ имеем $a_C = (qc)M_a$.

Ускорение точки K звена 5 определится из системы уравнений

$$a_K = a^e_K + a^r_K + a^c_K;$$

$$a_K = a^n_{KN} + a^t_{KN}.$$

Здесь известны: переносное ускорение $a_K = a_C$; ускорение Корнолиса в точке K $a^c_K = 2\omega_3 v^r_K$; нормальное ускорение точки K относительно точки N $a^n_{KN} = \omega_5^2 l_{NK}$; направления ускорения a^r_K (вдоль стержня NC) и ускорения a^t_{KN} .

Выполняя построение, как и при определении ускорения точки B , из многоугольника $qcdkq$ найдем точку K , соответствующую ускорению a_K , причем

$$a_K = (qk) M_a;$$

$$\varepsilon_5 = a^t_{KN}/l_{NC} = (qk) M_a/l_{NC}.$$

Направления угловых скоростей и ускорений находятся по направлениям скоростей и тангенциальных ускорений.

Метод кинематических диаграмм позволяет получить графически зависимости (3.1). Угловые скорость и ускорение при этом определяются графическим дифференцированием. Порядок дифференцирования при заданном графике пути следующий:

1) под графиком пути $S = f(t)$ (рис. 3.2) строятся координатные оси O_1v и O_1t ;

2) ось времени в пределах цикла делится на произвольное число участков;

3) от точки O_1 на продолжении оси O_1t откладывается произвольный отрезок $O_1p_1 = H_1$;

4) из точки p_1 производятся лучи p_11'' , p_12'' , ..., параллельные хордам O_11' , O_12' , ... кривой S . Эти лучи отсекают на оси O_1v отрезки, пропорциональные скорости на соответствующих участках. При этом масштаб скорости $M_v = M_s/H_1M_t$, (м/с)/мм, где M_s и M_t — масштабы пути и времени;

5) проектируются точки $1''$, $2''$, ... на середины участков. Соединив найденные точки I , II и т. д. плавной кривой, получим график скорости.

График ускорения строится аналогично путем дифференцирования графика скорости. На участках, где кривая резко меняет направление, реко-

меируется делать дополнительную разбивку на более мелкие участки. На нулевых ординатах дифференцирование необходимо продолжить на одно-два деления.

Аналитический метод определения скоростей и ускорений дает наибольшую точность результатов. Если движение механизма задано аналитическим уравнением вида (3.2), то скорость и ускорение можно получить непосредственным дифференцированием этого уравнения:

$$v = dy/dt = df(t)/dt;$$

$$a = d^2y/dt^2 = d^2f(t)/dt^2.$$

Если движение задано в виде

$$y = y(x_1); \quad x_1 = \Psi(t), \quad (3.4)$$

то скорость и ускорение определяются по формулам:

$$v = dy/dt = (dy/dx_1)(dx_1/dt);$$

$$a = d^2y/dt^2 = (d^2y/dx_1^2)v_1^2 + (dy/dx_1)a_1. \quad (3.5)$$

Для конкретного случая, когда, например, ведущее и ведомое звенья

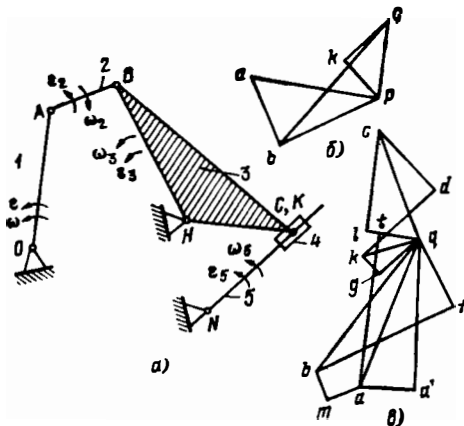


Рис. 3.1. Определение скоростей и ускорений механизма методом планов

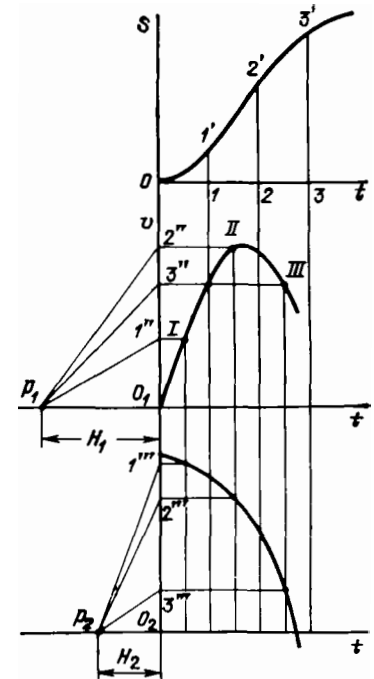


Рис. 3.2. Графическое дифференцирование

нмеют вращательное движение, уравнения (3.4), (3.5) запишутся в виде:
 $\Phi = f(\Phi_1); \quad \Phi_1 = \Psi(t);$
 $\omega = (d\Phi/d\Phi_1) \omega_1;$ (3.6)
 $\varepsilon = (d^2\Phi/d\Phi_1^2) \omega_1^2 + (d\Phi/d\Phi_1) \varepsilon_1.$

Пример 2. В кулисном механизме (рис. 3.3) кривошип O_1A вращается с постоянной угловой скоростью ω_1 . Определить угловую скорость ω_3 и угловое ускорение ε_3 кулисы 3.

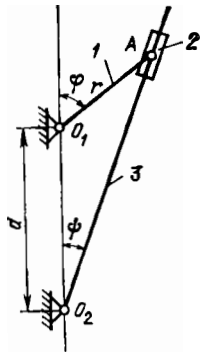


Рис. 3.3. Кривошипно-кулисный механизм (к примеру 2)

Решение. Запишем функцию положения кулисы: $\Psi = \arctg [\lambda \sin \varphi / (1 + \lambda \cos \varphi)]$, где $\lambda = r/d$.
 Используя уравнения (3.6), получаем:

$$\omega_3 = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{\lambda(\lambda + \cos \varphi)}{1 + 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2} \omega_1,$$

$$\varepsilon_3 = \frac{d^2\Psi}{dt^2} = \frac{\lambda(1 - \lambda^2) \sin \varphi}{(1 + 2\lambda \cos \varphi + \lambda^2)^2} \omega_1^2.$$

3.2. КИНЕТОСТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Основная задача этого расчета состоит в определении сил, действующих в кинематических парах, и уравновешивающей силы или момента по заданному закону движения механизма и внешним силам, приложенным к звеньям. Во время работы механизма на его звенья действуют движущие силы, силы полезных сопротивлений (возникающих при выполнении технологических процессов), силы вредных сопротивлений и силы тяжести.

При движении звеньев с ускорением вводятся силы инерции. Эти силы, приложенные к отдельным элементам звена, можно заменить главным вектором сил инерции $R_{ин}$, приложенным к ЦТ звена, и главным моментом инерции $M_{ин}$:

$$R_{ин} = -m a_C; \quad M_{ин} = -\varepsilon J_C,$$

где m — масса звена; J_C — момент инерции звена относительно ЦТ; a_C — ускорение ЦТ; ε — угловое ускорение звена.

Уравнения равновесия. Чтобы тело (звено) находилось в равновесии, необходимо и достаточно выполнение двух уравнений:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0, \quad \sum_{j=1}^m M_j = 0, \quad (3.7)$$

где F_i и M_j — силы и моменты, приложенные к звену.

В координатной форме эти уравнения можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^n F_{xi} = 0; \quad \sum_{j=1}^m M_{xj} = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n F_{yi} = 0; \quad \sum_{j=1}^m M_{yj} = 0; \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{zi} = 0; \quad \sum_{j=1}^m M_{zj} = 0,$$

где F_{xi} , F_{yi} и F_{zi} — проекции всех сил на оси координат; M_{xj} , M_{yj} , M_{zj} — моменты этих сил относительно координатных осей.

Для плоской системы сил можно составить три уравнения равновесия:

$$\sum_{i=1}^n F_{xi} = 0; \quad \sum_{i=1}^n F_{yi} = 0;$$

$$\sum_{j=1}^m M_{oj} = 0, \quad (3.9)$$

где M_{oj} — моменты сил относительно какой-либо точки на плоскости.

Кинестатический расчет плоских механизмов

Определение сил в кинематических парах. При силовом исследовании механизма рассчитывается на структурные группы. Расчет начинается с последней группы и заканчивается расчетом ведущего звена. В его основу поло-

жеи принцип Д'Аламбера, по которому динамическая задача сводится к статической, введем в (3.7) — (3.9) сил и моментов инерции. В первом приближении расчет ведется без учета сил трения.

Учет сил трения. При графоаналитическом методе расчета сил, действующих в кинематических парах, силы трения вычисляются методом последовательных приближений. Рассмотрим методику решения задачи. Определяются: силы в кинематических парах без учета сил трения (первое приближение); силы трения (моменты трения) в парах с учетом реакций, полученных в первом приближении; силы в кинематических парах с учетом полученных сил трения (второе приближение); силы трения с учетом усилий в кинематических парах второго приближения и т. д.

Задача решается до тех пор, пока одноименные силы, полученные в двух соседних приближениях будут отличаться с необходимой степенью малости.

3.3. ТРЕНИЕ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАХ

Трение скольжения. Между силой трения $F_{тр}$ и нормальным усилием F_N , сжимающим соприкасающиеся поверхности, существует сложная зависимость [4]. Однако с достаточной для практики точностью считается, что для нагрузок $F_N \geq 30$ Н коэффициент трения не зависит от нагрузки:

$$F_{тр} = K_{тр} F_N,$$

где $K_{тр}$ — коэффициент трения, не зависящий от F_N , а определяемый характером соприкасающихся материалов, состоянием поверхности соприкосновения, условиями смазки. Значения $K_{тр}$ для наиболее часто встречающихся пар материалов даны на рис. 3.4.

Значения сил и моментов трения в конкретных случаях можно вычислять по формулам табл. 3.1, дающим удовлетворительные для практики результаты.

Для нагрузок $F_N \leq 30$ Н в формулу вводят поправочный коэффициент $C(F_N)$, зависящий от F_N :

$$F_{тр} = C(F_N) K_{тр} F_N.$$

Трение качения. При качении катка по поверхности возникает сопро-

тивление, равное $R = GK_{тр.к}/r_{кат}$, где $r_{кат}$ — радиус катка, см; $K_{тр.к}$ — коэффициент трения качения, см (закаленная сталь по закаленной стали — 0,01 мм; мягкая сталь по мягкой стали и чугун по чугуну — 0,05 мм); G — сила тяжести катка, Н.

	0,05	0,09	0,12	0,15	0,18	0,25	0,42
	0,03	0,07	0,1	0,14	0,17	0,2	0,3
Бронза-бронза	[Diagram of a ball joint]						
Сталь-бронза	[Diagram of a ball joint]						
Сталь-капрон	[Diagram of a ball joint]						
Сталь-латунь	[Diagram of a ball joint]						
Сталь-сталь	[Diagram of a ball joint]						
Сталь-текстолит	[Diagram of a ball joint]						
Сталь-чугун	[Diagram of a ball joint]						
□	K _{тр} посыл при смазке и без нее ()						
○	K _{тр} движения при смазке и без нее ()						

Рис. 3.4. Значения коэффициентов трения скольжения

Трение в шарикоподшипниках. Момент трения шариковых и роликовых подшипников $M_{тр}$, Н·мм, можно определить по формуле:

$$M_{тр} = 0,5 d (K_R R + K_A A),$$

где K_R и K_A — условные коэффициенты трения соответственно для радиальной и осевой нагрузок; R и A — радиальная и осевая нагрузки, Н; d — внутренний диаметр шарикоподшипника, мм.

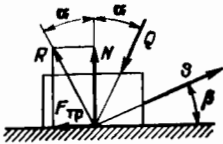
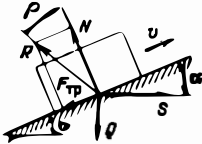
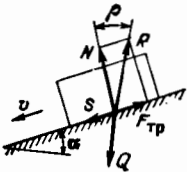
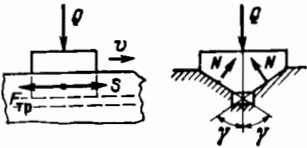
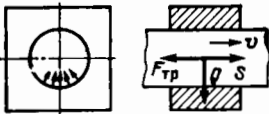
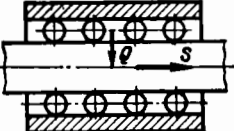
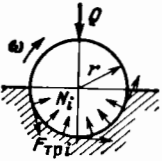
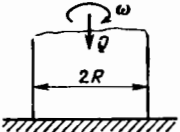
Условные коэффициенты трения для шарикоподшипников

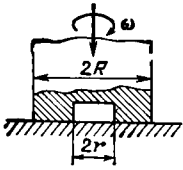
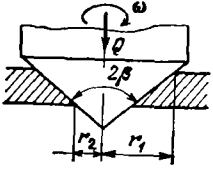
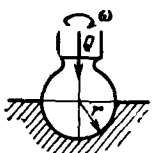
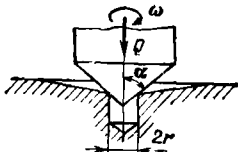
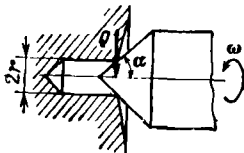
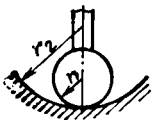
	K_R	K_A
Сферический двухрядный	0,0015	—
Радиальный однорядный	0,002	0,004
Радиально-упорный	0,0025	0,005
Упорный	—	0,003

Условные коэффициенты трения для роликоподшипников

	K_R	K_A
С короткими цилиндрическими роликами	0,002	—
Конические	0,008	0,020
Двухрядные сферические	0,004	—
Игольчатые	0,008	—

При величине момента менее 9 Н·мм момент трения для пары шарикоподшипников можно определить приближенно: $M_{тр} = (0,025 \dots 0,035) \times d^2$, Н·мм, где d — внутренний диа-

Вид опоры	Схема	Расчетные формулы
Горизонтальная плоскость		$S = Q \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)}; \rho = \text{arc tg } K_{\text{тр}}$
Наклонная плоскость (движение вверх)		$S = Q \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho}; \rho = \text{arc tg } K_{\text{тр}}$
Наклонная плоскость (движение вниз)		$S = Q(\cos \alpha \text{ tg } \rho - \sin \alpha); \rho = \text{arc tg } K_{\text{тр}}$
Клинчатый ползун		$S = QK_{\text{тр}}/\sin \gamma$
Круглые направляющие		$F_{\text{тр}} = mK_{\text{тр}}Q \text{ (См. примечание 1)}$
Направляющие с трением качения		$S = [Qk_1 + (Q + nq)k_2]/2r, \text{ где } n, r \text{ и } q \text{ — число роликов, радиус и масса; } k_1 \text{ и } k_2 \text{ — коэффициенты трения качения между роликами и плоскостями 1 и 2}$
Шип подшипника скольжения		$M_{\text{тр}} = mK_{\text{тр}}Qr \text{ (См. примечание 1)}$
Сплошная плоская опора вращения		$M_{\text{тр}} = 0,667K_{\text{тр}}RQ$

Вид опоры	Схема	Расчетные формулы
Кольцевая плоская опора		$M = \frac{0,667 K_{\tau p} Q (R^3 - r^3)}{R^2 - r^2}$
Коническая опора		$M_{\tau p} = \frac{0,667 K_{\tau p} Q (r_1^3 - r_2^3)}{(r_1^2 - r_2^2) \sin \beta}$
Шаровая опора		$M_{\tau p} = 1,57 K_{\tau p} Q r$
Центровая осевая опора		$M_{\tau p} = K_{\tau p} Q r / \sin \alpha$
Центровая радиальная опора		$M_{\tau p} = K_{\tau p} Q r / \cos \alpha$
Сферический центр		$M_{\tau p} = 0,59 K_{\tau p} Q r, \text{ где } r = 0,09 l \sqrt[3]{\frac{Q [(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2]}{1/r_1 - 1/r_2}};$ <p>ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона (См. примечание 2)</p>

Примечания. 1. Значение коэффициента m зависит от угла обхвата соприкасающихся поверхностей: при наличии большого зазора принимают $m \approx 1$, при малом зазоре $m \approx 1,57$ и в приработанной паре $m \approx 1,28$.

2. Размерность величин, входящих в формулы: силы S, Q, F — Н; момент трения $M_{\tau p}$ — Н·мм; радиусы r, R — мм; модуль упругости E — Н/мм²; коэффициенты трения качения k_1 и k_2 — мм.

метр шарикоподшипника, мм. Вместо формулы можно пользоваться графиком на рис. 3.5.

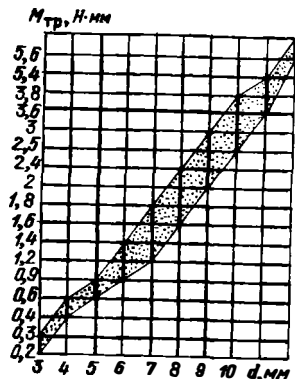


Рис. 3.5. Статические моменты трения для пары шарикоподшипников в сборе

3.4. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ МЕХАНИЗМОВ

Передаточный коэффициент. Отношение скорости ведущего звена к скорости ведомого звена называется передаточным коэффициентом $k_{прд} = v_1/v_n$, где v_1 и v_n — обобщенные скорости ведущего и ведомого звеньев. Передаточный коэффициент мо-

жет иметь размерность длины или обратной ей величины или быть безразмерным. Например, для зубчатых передач передаточный коэффициент, определяемый как отношение угловых скоростей ω_1 и ω_n , будет величиной безразмерной (передаточное отношение). Передаточные коэффициенты некоторых передач приведены в табл. 3.2.

Коэффициент полезного действия. Уровень потерь мощности в механизме определяется КПД. Он равен отношению мощностей на ведомом P_2 и ведущем P_1 валах:

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P), \quad (3.10)$$

где ΔP — мощность потерь в передаче; η — коэффициент полезного действия.

Иногда при расчетах пользуются величиной, называемой коэффициентом потерь $K_{пот}$:

$$K_{пот} = \Delta P/P_1 = 1 - \eta.$$

Вводя понятие обобщенной силы, как меры механического взаимодействия тел, формулу (3.10) можно записать в виде:

$$\eta = X_2/k_{прд} X_1,$$

где X_1 и X_2 — обобщенные силы на ведущим и ведомом звеньях; $k_{прд}$ — передаточный коэффициент.

Общий КПД ряда механизмов, соединенных последовательно, равен

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n.$$

Таблица 3.2

Передаточные коэффициенты некоторых передач

Вид передачи	Передаточный коэффициент	Обозначения
Коническая, цилиндрическая и винтовая зубчатая	$k = u = \omega_1/\omega_2 = z_2/z_1$	ω_1 и ω_2 — угловые скорости ведущего и ведомого колес; z_1 и z_2 — числа зубьев ведущего и ведомого колес
Червячная	$k = u = z_2/z_1$	z_1 — число заходов червяка; z_2 — число зубьев колеса
Реечная: рейка ведомая рейка ведущая Винт — гайка	$k = 2/mz$ $k = mz/2$ $k = 2/d_{ср} \operatorname{tg} \alpha_{ср}$	m и z — модуль и число зубьев колеса $d_{ср}$ — средний диаметр винта; $\alpha_{ср}$ — угол подъема средней винтовой линии

При параллельном соединении механизма общий КПД равен:

$$\eta_{\Sigma} = k_1 \eta_1 + k_2 \eta_2 + \dots + \eta_n,$$

где k_i — коэффициенты, показывающие, какая часть работы (мощности) движущей сил подведена к i -му входящему механизму.

КПД зубчатых передач, зубчатых муфт и пары винт — гайка. Рассмотрим методику вычисления КПД некоторых передач с учетом влияния нагрузки. Определяются: нормальное усилие F_N , действующее в зацеплении; поправочный коэффициент $C(F_N)$ или $C_1(F_N)$, учитывающий влияние нагрузки [при $F_N \geq 30$ Н коэффициенты $C(F_N)$ и $C_1(F_N)$ полагают равными единице]; КПД передачи. Расчетные формулы сведены в табл. 3.3. Для упрощения вычисления КПД зубчатых передач и диффе-

ренциалов можно пользоваться специальными таблицами [4], составленными по формулам табл. 3.3. Ориентировочные значения КПД некоторых передач даны на графиках рис. 3.6—3.8.

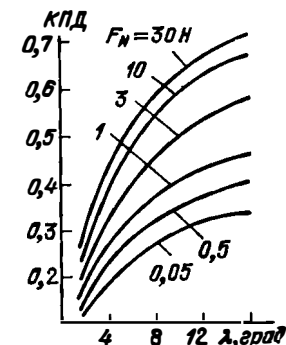


Рис. 3.8. КПД червячной передачи при $K_{пр}=0,08$

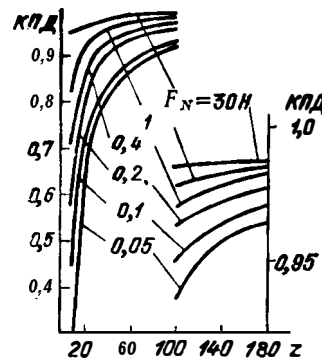


Рис. 3.6. КПД цилиндрической зубчатой передачи при $K_{пр}=0,08$ и $u=1$

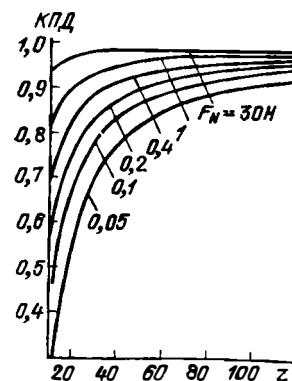


Рис. 3.7. КПД конической зубчатой передачи при $K_{пр}=0,08$ и $u=1$

В указанных таблицах и на графиках КПД даны для передаточного отношения $u=1$. Для передач, у которых $u \neq 1$, находятся отдельно: η_1 для передачи с одинаковыми колесами с числом зубьев z_1 и z_2 для передачи с числом зубьев z_2 каждого колеса. Действительный КПД для передачи с числом зубьев колес z_1 и z_2 находится по формуле $\eta = 0,5(\eta_1 + \eta_2)$.

Для реечной передачи $\eta = 0,5(\eta_1 + 1)$, где η_1 — КПД для передачи $u=1$ с числом зубьев, равным числу зубьев реечного колеса.

КПД зубчатой передачи и крестовидной муфты с люфтовывбирателем. Для устранения свободного (мертвого) хода в зубчатых передачах и муфтах применяют разводные устройства (рис. 3.9 и 3.10). КПД такой

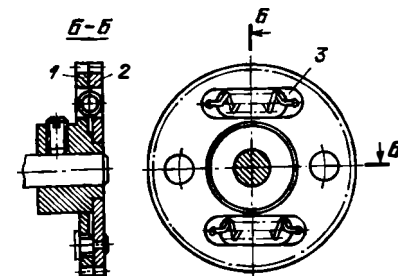


Рис. 3.9. Разводное зубчатое колесо: 1 и 2 — зубчатые колеса; 3 — разводящая пружина

Вид передачи	Расчетные формулы	Условные обозначения
<p>Цилиндрическая прямозубая</p> <p>Реечная</p> <p>Косозубая зубчатая: с параллельными осями</p> <p>со скрещающимися осями</p> <p>со скрещающимися осями под углом 90°</p> <p>Коническая зубчатая</p> <p>Червячная</p> <p>Однопальцевый поводок</p>	$\eta = 1 - C(F_N) K_{\tau p} \pi \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right);$ $F_N = 2M_2 / m z_2 \cos \alpha$ $\eta = 1 - C(F_N) K_{\tau p} \pi / z$ $\eta = 1 - C(F_N) K_{\tau p} \pi \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right)$ $\eta = C_1(F_N) \frac{1 - K_{\tau p} \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\cos \alpha}}{1 + K_{\tau p} \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\cos \alpha}}$ $\eta = C_1(F_N) \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg} (\beta_2 + \rho)}$ $\eta = 1 - 1,62 C(F_N) \pi K_{\tau p} \left(\frac{\cos \varphi_1}{z_1} + \frac{\cos \varphi_2}{z_2} \right)$ $\eta = C_1(F_N) \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg} (\lambda + \rho)}$ $\eta = 1 - C(F_N) 2 K_{\tau p} \Delta l / \pi c;$ $F_N = M_2 / c$	<p>$C(F_N)$ и $C_1(F_N)$ — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние нагрузки,</p> $C(F_N) = (F+3)/(F_N+0,18),$ $C_1(F_N) = (F_N+1,05)/(F_N+2,4);$ <p>F_N — нормальная нагрузка в зацеплении зубчатых колес, на пальце поводка, на зубе крестовидной муфты, Н;</p> <p>M_2 — момент на ведомом валу, Н·мм;</p> <p>$K_{\tau p}$ — коэффициент трения скольжения в зацеплении;</p> <p>z_1, z_2 — число зубьев ведущего и ведомого зубчатых колес;</p> <p>z — число зубьев зубчатого колеса реечной передачи;</p> <p>α — угол профиля зуба;</p> <p>m — модуль колес, мм;</p> <p>m_n — нормальный модуль колес, мм;</p> <p>m_s — осевой модуль червячного колеса, мм;</p> <p>β_1 и β_2 — углы наклона зубьев ведущего и ведомого колес;</p>
<p>Крестовидная муфта</p> <p>Винт — гайка</p> <p>Конический дифференциал: передача от водила к солнечному колесу ($u=0,5$)</p> <p>передача от одного солнечного колеса к другому ($u=1$)</p> <p>передача от солнечного колеса к водилу ($u=2$)</p>	$\eta = 1 - C(F_N) 4 K_{\tau p} \Delta l / r;$ $F_N = M_2 / 2r$ $\eta = C_1(F_N) \frac{\operatorname{tg} \alpha_c}{\operatorname{tg} (\alpha_c + \rho_1)}$ $F_N = Q / \cos \alpha_c \cos \beta$ $\rho_1 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (K_{\tau p} / \cos \beta)$ $\eta = 2M_2 / [2(M_2 + M_{\tau p2}) / \eta_0 + M_{\tau p1} + M_{\tau p2} z_{k1} / z_{k2}];$ $F_N = (M_2 + M_{\tau p2}) / m z_{k1}$ $\eta = M_2 / [(M_2 + M_{\tau p2}) (2 - \eta_0) / \eta_0 + M_{\tau p1} + M_{\tau p2} z_{k1} / z_{k2}];$ $F_N = (M_2 + M_{\tau p2}) / m z_{k1}$ $\eta = M_2 M [(M_2 + M_{\tau p2}) / \eta_0 + 2M_{\tau p1} + M_{\tau p2} z_{k1} / z_{k2}];$ $F_N = 0,5 (M_2 + M_{\tau p2}) / m z_{k1}$	<p>Φ_1 и Φ_2 — углы начального конуса ведущего и ведомого колес;</p> <p>λ — угол подъема винтовой линии на делительном цилиндре червяка;</p> <p>ρ — приведенный угол трения в зацеплении;</p> <p>Δl — несоосность валиков муфты, мм;</p> <p>c — расстояние от оси пальца поводка до оси вала, мм;</p> <p>r — радиус крестовидной муфты, мм;</p> <p>α_c — угол подъема средней винтовой линии винта;</p> <p>β — половина угла профиля резьбы;</p> <p>Q — осевая нагрузка на винте, Н;</p> <p>M_1 и M_2 — статические моменты на ведущем и ведомом звеньях, Н·мм;</p> <p>$M_{\tau p1}$ и $M_{\tau p2}$ — моменты трения в опорах ведущего и ведомого звеньев, Н·мм;</p> <p>$M_{\tau p}$ — момент трения в опорах сателлитных колес, Н·мм;</p> <p>z_{k1} и z_{k2} — число зубьев солнечного и сателлитных колес;</p> <p>η_0 — КПД передачи сателлитное колесо — солнечное колесо</p>

передачи меньше КПД аналогичной передачи без люфтовбирателя из-за нарушения однопрофильного зацепления, а также за счет увеличения усилия, вызываемого разводящей пружиной.

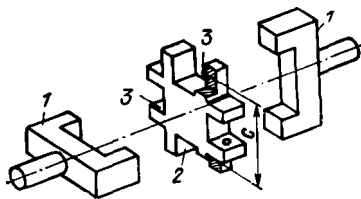


Рис. 3.10. Крестовидная муфта с люфтовбирателем: 1 и 2 — детали муфты; 3 — разводящая пружина

КПД зубчатой передачи с люфтовбирателем определяется по формуле

$$\eta_{\text{л}} = [1 + (1 - \eta) \{s/[\varphi(s) + \eta] + (s + 1)/[\varphi(s + 1) + \eta]\}]^{-1},$$

где η — КПД рассматриваемой зубчатой передачи без люфтовбирателя; s — величина, зависящая от натяжения пружины; $\varphi(s)$ — поправочная функция, зависящая от F_N и s :

$$\varphi(x) = \frac{(F_N + 3)(x F_N + 0,18)}{(F_N + 0,18)(x F_N + 3)} - 1,$$

Значения поправочной функции $\varphi(x)$ в формулах КПД передач с люфтовбирателем

$F_N \cdot \text{Н}$	Значения $\varphi(x)$ при x									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,02	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,62	0,71	0,79	0,88
0,06	0,23	0,44	0,65	0,85	1,05	1,24	1,42	1,59	1,76	1,93
0,1	0,31	0,61	0,89	1,15	1,40	1,63	1,86	2,07	2,27	2,46
0,2	0,44	0,82	1,17	1,48	1,77	2,02	2,26	2,47	2,67	2,85
0,3	0,49	0,90	1,26	1,57	1,84	2,07	2,28	2,47	2,64	2,80
0,4	0,51	0,93	1,27	1,56	1,80	2,01	2,20	2,36	2,50	2,63
0,6	0,52	0,90	1,21	1,45	1,64	1,81	1,95	2,07	2,17	2,26
0,8	0,50	0,85	1,11	1,32	1,48	1,61	1,71	1,81	1,88	1,95
1	0,48	0,80	1,02	1,19	1,33	1,43	1,52	1,59	1,65	1,71
2	0,37	0,57	0,71	0,80	0,86	0,91	0,95	0,99	1,01	1,03
5	0,21	0,30	0,36	0,39	0,41	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47
10	0,12	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25
20	0,06	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13
30	0,04	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

где F_N — нормальное усилие в зацеплении, Н; x — значение s или $s + 1$; $s = F_{\text{пр}}/F_N = M_{\text{пр}}/M$, (3.11)

где $F_{\text{пр}}$ — суммарная сила пружин, Н; $M_{\text{пр}}$ — момент, создаваемый пружинами, Н·мм; M — момент на разводящем колесе, Н·мм. Значения поправочной функции $\varphi(x)$ даны в табл. 3.4.

Расчет КПД крестовидной муфты с люфтовбирателем (см. рис. 3.10) делается аналогично.

3.5. ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ МЕХАНИЗМОВ

Приведение сил и моментов. При составлении уравнений движения действие всех сил и моментов, приложенных к различным звеньям механизма, удобно заменить действием одной силы или момента, приложенных к одному звену, обычно ведущему. Приведенные сила и момент вычисляются по формулам:

$$F_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \left(F_i \frac{v_i}{v_1} \cos \alpha_i + M_i \frac{\omega_i}{v_1} \right);$$

$$M_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \left(F_i \frac{v_i}{\omega_1} \cos \alpha_i + M_i \frac{\omega_i}{\omega_1} \right),$$

где F_i и M_i — главный вектор и главный момент, приложенные к

i -му звену; ω_i и ω_1 — угловые скорости i -го звена и звена приведения; v_i — скорость точки приложения силы F_i ; v_1 — скорость точки приложения приведенной силы $F_{\text{п}}$; α_i — угол между скоростью v_i и силой F_i .

Приведение масс и моментов инерции. При приведении масс и моментов используют условные эквивалентности кинетических энергий звеньев механизма и кинетической энергии приведенного звена. Приведенную массу и приведенный момент инерции вычисляют по формулам:

$$m_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \left(m_i \frac{v_i^2}{v_1^2} + J_{ci} \frac{\omega_i^2}{v_1^2} \right);$$

$$J_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \left(m_i \frac{v_i^2}{\omega_1^2} + J_{ci} \frac{\omega_i^2}{\omega_1^2} \right),$$

где m_i — масса i -го звена; J_{ci} — момент инерции i -го звена относительно ЦТ.

Уравнение движения механизма. В общем случае при вращательном движении звена приведения дифференциальное уравнение движения можно записать в виде:

$$J_{\text{п}} \varepsilon + 0,5 \frac{dJ_{\text{п}}}{d\varphi} \omega^2 = M_{\text{п}}, \quad (3.12)$$

где ω и ε — угловые скорость и ускорение звена приведения; φ — угол поворота звена приведения; $M_{\text{п}}$ и $J_{\text{п}}$ — приведенный момент и приведенный момент инерции.

В случае поступательного движения звена приведения уравнение движения

$$m_{\text{п}} a_1 + 0,5 \frac{dm_{\text{п}}}{dS} v_1^2 = F_{\text{п}},$$

где v_1 и a_1 — линейные скорость и ускорение звена приведения; S — перемещение звена приведения; $m_{\text{п}}$ и $F_{\text{п}}$ — приведенные масса и сила.

В механизмах, где все звенья имеют только вращательное движение, $J_{\text{п}} = \text{const}$, поэтому (3.12) упрощается:

$$J_{\text{п}} \varepsilon = M_{\text{д}} - M_{\text{с}}, \quad (3.13)$$

где $M_{\text{д}}$ и $M_{\text{с}}$ — приведенные моменты движущих сил и сил сопротивления.

В большинстве случаев $M_{\text{д}}$ и $M_{\text{с}}$ являются функциями одной переменной (φ , ω или t), поэтому решения

уравнений могут быть представлены в квадратурах (табл. 3.5). Определение интегралов в уравнениях табл. 3.5 проводится обычно численным или графическим методом.

Для электродвигателей постоянного тока с независимым или смешанным возбуждением и асинхронных двигателей переменной частоты двигателя можно приближенно представить в виде прямой линии (рис. 3.11,а).

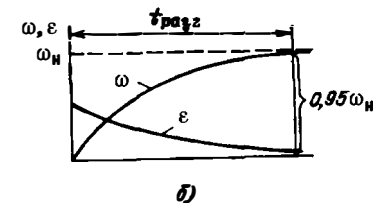
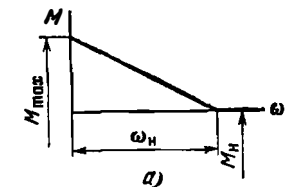


Рис. 3.11. Графики параметров двигателя для момента (а) и для угловой скорости и ускорения (б)

В этом случае задачу можно решить аналитически. Из рисунка следует, что

$$M = \frac{(M_{\text{max}} - M_{\text{Н}})(\omega_{\text{Н}} - \omega)}{\omega_{\text{Н}}}$$

$$= J_{\text{п}} \frac{d\omega}{dt},$$

где M_{max} — максимальный (пусковой) момент двигателя; $M_{\text{Н}}$ — номинальный момент двигателя, равный моменту сопротивления механизма; $\omega_{\text{Н}}$ и ω — номинальная и текущая угловые скорости ротора двигателя. Уравнение имеет следующее решение:

$$t = \frac{J_{\text{п}} \omega_{\text{Н}}}{M_{\text{max}} - M_{\text{Н}}} \int_0^{\omega} \frac{d\omega}{\omega_{\text{Н}} - \omega} = B \ln \frac{\omega_{\text{Н}}}{\omega_{\text{Н}} - \omega}, \quad (3.14)$$

где $B = J_{\text{п}} \omega_{\text{Н}} / (M_{\text{max}} - M_{\text{Н}})$ называется электромеханической постоянной при-

Уравнения движения и их решения в квадратурах

Уравнение движения	Решение
$J_n \frac{d\omega}{dt} = M_n(\varphi) - M_c(\varphi)$	$\omega(\varphi) = \sqrt{\frac{2}{J_n} \int_{\varphi_0}^{\varphi} [M_n(\varphi) - M_c(\varphi)] d\varphi + \omega_0};$ $t = t_0 + \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\omega(\varphi)}$
$J_n \frac{d\omega}{dt} = M_n(\omega) - M_c(\omega)$	$t(\omega) = J_n \int_{\omega_0}^{\omega} \frac{d\omega}{M_n(\omega) - M_c(\omega)} + t_0;$ $\varphi = \varphi_0 + \int_{t_0}^t \omega(t) dt$
$J_n \frac{d\omega}{dt} = M_n(t) - M_c(t)$	$\omega(t) = \omega_0 + \int_{t_0}^t [M_n(t) - M_c(t)] dt;$ $\varphi = \varphi_0 + \int_{t_0}^t \omega(t) dt$

вода. Из (3.14) можно получить другие зависимости:

$$\omega = \omega_n (1 - e^{-t/B}); \quad \varepsilon = (\omega_n/B) e^{-t/B}.$$

Так как теоретически время разгона равно бесконечности (рис. 3.11,б), то обычно принимают за время разгона время, при котором $\omega = 0,95\omega_n$, что соответствует $t_{разг} = 3B$.

Неравномерность хода механизма. Колебания скорости движения элементов механизма при установившемся движении характеризуют коэффициентом неравномерности хода $\delta = (\omega_{max} - \omega_{min})/\omega_{cp}$, (3.15)

где ω_{max} , ω_{min} и ω_{cp} — максимальная, минимальная и средняя угловые скорости звена; $\omega_{cp} = 0,5(\omega_{max} + \omega_{min})$. Из (3.15) следует

$$\omega_{max} = \omega_{cp} (1 + 0,5\delta);$$

$$\omega_{min} = \omega_{cp} (1 - 0,5\delta).$$

Для механизмов, имеющих $J_n = const$, коэффициент неравномерности можно определить по формуле

$$\delta = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{\int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} M_n(\varphi) d\varphi / J_n \omega_{cp}^2},$$

где φ_{max} и φ_{min} — углы поворота звена приведения, соответствующие ω_{max} и ω_{min} . Интеграл в числителе обычно вычисляют методами численного интегрирования. В общем случае, когда J_n и M_n переменные, удобно пользоваться диаграммой энерго масс — зависимостью кинетической энергии $W_{кин}$ от приведенного момента инерции J_n механизма $W_{кин} = f(J_n)$.

Для определения δ проводят касательные к кривой из начала координат (рис. 3.12). Углы касательных φ_{max} и φ_{min} связаны с ω_{max} и ω_{min} следующими зависимостями:

$$\omega_{max}^2 = 2 \frac{M_{кин}}{M_J} \operatorname{tg} \varphi_{max};$$

$$\omega_{min}^2 = 2 \frac{M_{кин}}{M_J} \operatorname{tg} \varphi_{min},$$

где $M_{кин}$ и M_J — масштабы кинетической энергии и приведенного момента инерции на диаграмме.

Определив ω_{max} и ω_{min} , находят δ по (3.15). Чаше возникает обратная задача — подбором маховика обеспечить необходимую неравномерность хода δ . В этом случае для определе-

ния φ_{max} и φ_{min} используют зависимости

$$\operatorname{tg} \varphi_{max} = \frac{M_J}{2 M_{кин}} \omega_{cp}^2 (1 + \delta);$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{min} = \frac{M_J}{2 M_{кин}} \omega_{cp}^2 (1 - \delta).$$

Под этими углами проводят к кривой новые касательные (рис. 3.13),

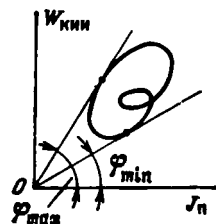


Рис. 3.12. Диаграмма энерго масс

пересечение которых определит новое начало координат O_1 . Кривая относительно этого начала координат определяет зависимость кинетической

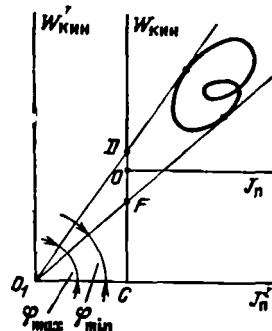


Рис. 3.13. К определению момента инерции маховика

энергии $W_{кин}$ от приведенного момента инерции J_n механизма с маховиком, при этом отрезок O_1C равен в масштабе моменту инерции маховика J_0 .

Так как обычно δ мал, разность между φ_{max} и φ_{min} невелика, поэтому точка пересечения оказывается за пределами чертежа. В этом случае J_0 определяют по отрезку DF (см. рис. 3.13): $J_0 = DF M_{кин} / \omega_{cp}^2$.

3.6. ТОЧНОСТЬ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ МЕХАНИЗМОВ

Классификация ошибок механизмов. Точность механизма характеризуется возникающими в реально изготовленной конструкции отклонениями от теоретически заданных параметров. Первичными ошибками механизма называются отклонения в форме, размерах геометрических элементов и в их относительном расположении.

Ошибкой положения ведомого звена называют разницу в положениях ведомого звена действительного и теоретического механизмов (рис. 3.14): $\Delta S = S' - S$, где S' и S — координаты положений точки B ведомого звена при действительном OAB и теоретическом $OA'B'$ положениях механизма.

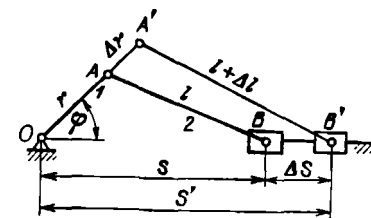


Рис. 3.14. Ошибка положения кривошипно-шатунного механизма

Ошибкой перемещения ведомого звена называют разность ошибок перемещений ведомого звена действительного и теоретического механизмов (рис. 3.15): $\Delta S_{пер} = \Delta S_1 - \Delta S_2$, где ΔS_1 и ΔS_2 — перемещения точки B действительного и теоретического механизмов.

По причинам возникновения различают ошибки технологические, геометрические и эксплуатационные.

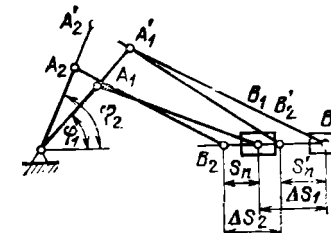


Рис. 3.15. Ошибка перемещения кривошипно-шатунного механизма

В соответствии с закономерностью появления ошибок их делят на систематические, изменяющиеся по определенному закону, и случайные, изменяющиеся по вероятностным законам.

Законы распределения ошибок. Законом распределения случайной величины называют зависимость между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями. Эту зависимость выражают рядом распределения (для дискретных случайных величин) или кривой распределения (для непрерывных случайных величин).

Наиболее широко распространен гауссовский закон распределения. Распределение характеризуется плотностью вероятности:

$$f(x) = (1/\sigma\sqrt{2\pi}) e^{-(x-a)^2/2\sigma^2},$$

где a и σ — параметры распределения. Кривая имеет симметричный, колоколообразный вид (рис. 3.16), при этом параметры распределения равны:

$$a = MX = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x e^{-(x-a)^2/2\sigma^2} dx;$$

$$\sigma^2 = DX =$$

$$= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (x-a)^2 e^{-(x-a)^2/2\sigma^2} dx,$$

где MX и DX — математическое ожидание и дисперсия распределения.

Для определения вероятности и нахождения случайной величины в заданном интервале от x_1 до x_2 используют формулу $P(x_1 < X < x_2) =$

$=\Phi(z_2) - \Phi(z_1)$, где $\Phi(z)$ — функция Лапласа,

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-0,5z^2} dz$$

определяется по табл. 3.6. Более подробные таблицы приводятся в справочниках по математике.

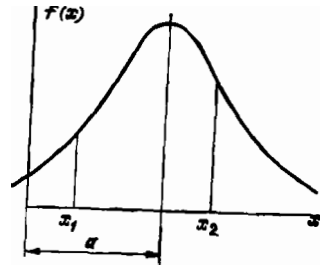


Рис. 3.16. Гауссовский закон распределения случайной величины

Величины z_1 и z_2 связаны с x_1 и x_2 следующими соотношениями: $z_1 = (x_1 - a)/\sigma$; $z_2 = (x_2 - a)/\sigma$.

В большинстве случаев значение поля рассеивания (допуск) берется равным $\delta = \pm 3\sigma$, при этом вероятность выхода ошибки за пределы допуска равна $P = 0,0027$ (брак 0,27%).

Для характеристики отличия закона распределения от гауссовского введены коэффициент относительной асимметрии α_i и коэффициент относительного рассеяния K_i :

$$\alpha_i = (\bar{x} - x_0)/\delta; \quad K_i = 3\sigma/\delta,$$

где \bar{x} — координата центра группирования распределения; x_0 — координата

Таблица 3.6

Нормированная функция Лапласа

z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)
0,1	0,0398	0,9	0,3159	1,7	0,4554	2,5	0,4937	3,3	0,4995
0,2	0,0793	1,0	0,3413	1,8	0,4641	2,6	0,4953	3,4	0,4997
0,3	0,1179	1,1	0,3643	1,9	0,4713	2,7	0,4965	3,5	0,4998
0,4	0,1554	1,2	0,3849	2,0	0,4772	2,8	0,4974	3,6	0,4998
0,5	0,1915	1,3	0,4032	2,1	0,4821	2,9	0,4981	3,7	0,4999
0,6	0,2257	1,4	0,4192	2,2	0,4860	3,0	0,4986	3,8	0,4999
0,7	0,2580	1,5	0,4332	2,3	0,4892	3,1	0,4990	3,9	0,49995
0,8	0,2881	1,6	0,4452	2,4	0,4918	3,2	0,4993	4,0	0,45997

Таблица 3.7

Значения коэффициентов относительной асимметрии α_i и относительного рассеяния K_i

Характеристика закона распределения	Вид кривой распределения	α_i	K_i
Гауссовский закон при совпадении с полем допуска		0	1
при двустороннем выходе за границу поля допуска		$a/2$ 1 3 5 10	K_i 1,21 1,26 1,44 1,55
при одностороннем выходе за границу поля допуска		b 5 10 25 50	K_i 1,17 1,18 1,20 1,21

Характеристика закона распределения	Вид кривой распределения	α_i	K_i
Закон Максвелла		-0,28	1,14
Закон равной вероятности		0	1,73
Закон Симпсона		0	1,22

Примечание. Величина $a/2$ соответствует браку (в процентах), величина b соответствует дополнительной обработке изделия (в процентах).

ната середины поля допуска; δ — половина поля допуска; σ — среднее квадратическое отклонение. Значения коэффициентов α_i и K_i в зависимости от закона распределения и расположения кривых относительно поля допуска приведены в табл. 3.7.

Методы определения ошибок

Дифференциальный метод. Функцию положения механизма в общем виде можно выразить уравнением

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.16)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — параметры звеньев механизма, определяющие положение y ведомого звена.

Ошибка положения ведомого звена

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i,$$

где Δx_i — ошибка параметра x_i ; $\partial f / \partial x_i$ — частная производная функции f по параметру x_i , называемая коэффициентом влияния.

Таким образом, дифференциальный метод определения ошибки состоит в определении полного дифференциала (3.16).

Пример 3. Определить погрешность положения звена 3 кривошипно-шатунного механизма (рис. 3.17).

Решение. Положение ползуна 3 определяется координатой s . Ошибка положения звена Δs возникает из-за ошибок в размерах звеньев Δr , Δl , Δh и в положении ведущего звена $\Delta \alpha$. Спроектировав звенья механизма на оси координат, получим:

$$r \cos \alpha + l \cos \beta = s;$$

$$r \sin \alpha - l \sin \beta + h = 0.$$

Решение задачи можно выполнить двумя способами: объединить уравнения и произвести дифференцирование или продифференцировать их порознь и затем объединить. В данном случае задачу проще решить вторым способом. Дифференцируя уравнения и заменяя дифференциалы малыми приращениями, получаем:

$$r \sin \alpha \Delta \alpha + \cos \alpha \Delta r + \cos \beta \Delta l + l \sin \beta \Delta \beta = \Delta s;$$

$$r \cos \alpha \Delta \alpha + \sin \alpha \Delta r - \sin \beta \Delta l + l \cos \beta \Delta \beta + \Delta h = 0.$$

Исключая из полученных уравнений $\Delta \beta$ и производя соответствующи

е преобразования, получаем:

$$\Delta s = -\frac{r \sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \Delta \alpha + \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \Delta r + \frac{\Delta l}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \Delta h = \Delta s_\alpha + \Delta s_r + \Delta s_l + \Delta s_h.$$

Каждое слагаемое правой части представляет погрешности положения выходного звена соответственно от погрешностей $\Delta \alpha$, Δr , Δl и Δh (частные погрешности).

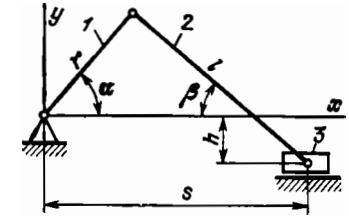


Рис. 3.17. К определению ошибок кривошипно-шатунного механизма

Метод преобразованного механизма. Сущность метода состоит в определении частных погрешностей механизма путем построения плана малых перемещений для некоторого преобразованного механизма.

Уравнение распределения скоростей (3.3) можно записать в виде $\Delta s_B / \Delta t = \Delta s_A / \Delta t + \Delta s_{AB} / \Delta t$ или $\Delta s_B = \Delta s_A + \Delta s_{AB}$.

Так как вектора малых перемещений и скоростей совпадают, то план малых перемещений будет подобен плану скоростей.

Пример 4. Определить погрешности кривошипно-шатунного механизма методом преобразованного механизма (рис. 3.18).

Решение. Заменяя ошибку Δr кривошипа перемещением точки A для шатуна AB можно записать

$$\Delta s_B = \Delta s_A + \Delta s_{BA}$$

$$\text{или } \Delta s_r = \Delta r + \Delta s_{BA}.$$

Построив план перемещений, соответствующий второму уравнению (рис. 3.18,а), получим:

$$\Delta s_r = M_s(pb),$$

где M_s — масштаб плана перемещения.

Аналогично находим погрешности Δs_i (рис. 3.18,б) и Δs_h (рис. 3.18,в).

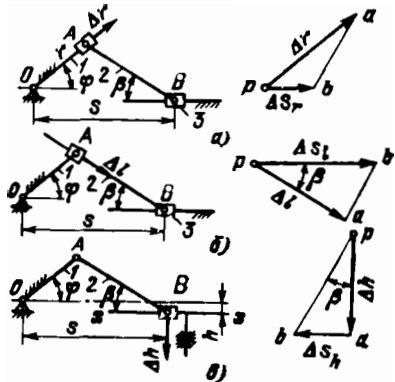


Рис. 3.18. К определению частных ошибок положения методом преобразованного механизма

Геометрический метод. При геометрическом методе механизм изображают в двух положениях: одно для теоретического механизма, другое для механизма с учетом погрешности одного из звеньев. Затем выбирают звено, связывающее первичную ошибку и ошибку выходного звена, и проецируют эти ошибки и звенья на направление положения теоретического или действительного звена. В полученном уравнении делают допущения, полагая $\cos \Delta\alpha = 1$; $\sin(\alpha + \Delta\alpha) = \sin \alpha$ и т. д.

Пример 5. Определить ошибку в положении звена 3 четырехзвенника (рис. 3.19) при ошибках его параметров Δr , $\Delta\alpha$ и Δl .

Решение. Вводя погрешность Δr , спроецируем стороны четырехугольника $BB'C'C$ на направление действительного положения звена 2 (рис. 3.19,а):

$$BB' \cos(\alpha - \beta) + B'C' \cos \Delta\varphi -$$

$$- CC' \sin(\gamma - \beta) - l = 0,$$

где $\Delta\varphi$ — угол между действительным и теоретическим положениями звена 2.

Учитывая, что $BB' = \Delta r$, $B'C' = l$, $CC' = R \Delta\gamma_{\Delta r}$, а также считая $\cos \Delta\varphi = 1$, получаем:

$$\Delta \gamma_{\Delta r} = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{R \cos(\gamma - \beta)} \Delta r.$$

Аналогично, вводя ошибку $\Delta\alpha$ (рис. 3.19,б) и учитывая малость угла $\Delta\varphi$, получаем: $CC'(\gamma - \beta) - BB' \sin(\alpha - \beta) = 0$. Подставив в это выражение $CC' = R \Delta\gamma_{\Delta\alpha}$, $BB' = r \Delta\alpha$, найдем:

$$\Delta \gamma_{\Delta\alpha} = [r \sin(\alpha - \beta)] / [R \sin(\gamma - \beta)].$$

Для ошибки Δl имеем (рис. 3.19,в) $CC' \sin(\gamma - \beta) - \Delta l = 0$, тогда

$$\Delta \gamma_{\Delta l} = \Delta l / [R \sin(\gamma - \beta)].$$

Определение предельных ошибок выходного параметра проводится из условия полной или неполной взаи-

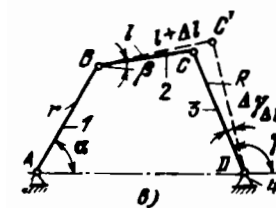
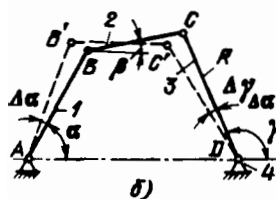
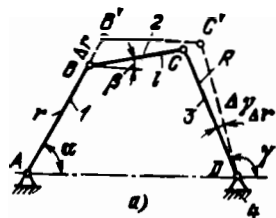


Рис. 3.19. К определению частных ошибок четырехзвенного механизма геометрическим методом

мозаменяемости. В первом случае расчет ведется по способу максимум — минимум (max—min), во втором — вероятностным методом. При первом способе находятся максимальные и минимальные значения выходного параметра при условии,

когда все первичные параметры имеют предельные значения.

Условие неполной взаимозаменяемости допускает возможность некоторого процента риска выхода значений выходного параметра за пределы допуска. Предельные значения выходного параметра y при $P=0,9973$ находятся вероятностным методом по формуле

$$y = \sum \xi_i x_i \pm \sqrt{\sum (\xi_i K_i \delta_i / 2)^2},$$

где $\xi = \partial f_i / \partial x_i$ — коэффициент влияния; x_i — среднее значение составляющего параметра; δ_i — допуск i -го параметра.

Расчет размерных цепей

Размерной цепью называется совокупность размеров, образующих замкнутый контур и непосредственно участвующих при расчете. Различают линейные, угловые, плоские и пространственные размерные цепи. Размерные параметры, входящие в размерную цепь, называют звеньями.

Размерная цепь делится на замыкающий и составляющие размеры. Составляющие размеры, в свою очередь, делят на уменьшающие и увеличивающие. Замыкающим называют размер, получаемый последним в результате обработки детали или сборки узла. Увеличивающим (уменьшающим) называется размер, увеличение которого приводит к увеличению (уменьшению) замыкающего размера.

Из составляющих звеньев иногда выделяют звено, изменение размера которого достигают необходимой точности замыкающего размера. Такое звено называют компенсирующим.

Связь между номинальными значениями размера выражается формулой

$$A_{\Delta} = \sum_{j=1}^m A_j - \sum_{k=m+1}^n A_k, \quad (3.17)$$

где A_{Δ} — замыкающий размер; A_j — увеличивающий размер; m — число увеличивающих звеньев; A_k — уменьшающий размер; n — общее число звеньев.

Метод решения размерной цепи на максимум и минимум. Решение задачи ведут по предельным значениям составляющих размеров размерной цепи. Зависимость между отклонениями замыкающего и составляю-

щих размеров выражается формулами

$$\Delta_{\Delta B} = \sum_{j=1}^m |\Delta_{jB}| + \sum_{k=m+1}^n \Delta_{kH}; \quad (3.18)$$

$$\Delta_{\Delta H} = \sum_{j=1}^m \Delta_{jH} - \sum_{k=m+1}^n \Delta_{kB},$$

где $\Delta_{\Delta B}$, $\Delta_{\Delta H}$, Δ_{jB} , Δ_{jH} , Δ_{kB} , Δ_{kH} — верхние и нижние отклонения замыкающего, увеличивающего и уменьшающего размеров.

Связь между допусками замыкающего и составляющих размеров в общем случае выражается формулой

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^n |\xi_i| \delta_i, \quad (3.19)$$

где ξ_i — коэффициент влияния (передаточное отношение), $\xi_i = \partial A_{\Delta} / \partial A_i$.

Для размерных цепей величина $|\xi_i| \delta_i$ есть проекция допуска размера A_i на выбранную ось. В размерных цепях с параллельными звеньями $\xi_i = \pm 1$, при этом знак плюс ставится для увеличивающих размеров, знак минус — для уменьшающих.

Формула для определения допуска размерной цепи с параллельными звеньями имеет вид $\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \delta_i$.

Вероятностный метод решения размерной цепи. При решении задач теоретико-вероятностным методом учитывают характер рассеяния размеров. Способ позволяет увеличить допуски составляющих размеров за счет исключения предельных значений как маловероятных.

В соответствии с ГОСТ 16320—80 связь между допусками замыкающего и составляющих размеров определяется формулой

$$\delta_{\Delta} = \frac{t}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\xi_i K_i \delta_i)^2}, \quad (3.20)$$

где t — коэффициент, зависящий от принятого процента риска p ; K_i — коэффициент распределения.

Зависимость t от размеров при совпадении центра группирования с серединой поля допуска определяется следующими значениями:

Процент риска размера $p, \%$	32	10	4.5	1.0	0.27	0.1	0.01
Коэффициент t	1	1.65	2	2.57	3	3.29	3.89

Коэффициент распределения K_i принимают: для гауссовского закона распределения $K_i=1$, для треугольного закона $K_i=1,22$, для неизвестного закона $K_i=1,73$ (равномерное распределение).

Наиболее распространенным случаем на практике является случай, когда $t=3$, $K_i=1$ и $|\xi|=1$, при этом

$$\delta_{\Delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (3.21)$$

Отклонения замыкающего размера определяются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta B} &= \bar{A}_{\Delta} + \delta_{\Delta}/2 - A_{\Delta}; \\ \Delta_{\Delta H} &= \bar{A}_{\Delta} - \delta_{\Delta}/2 - A_{\Delta}; \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\bar{A}_{\Delta} = \sum_{j=1}^m \bar{A}_j - \sum_{k=m+1}^n \bar{A}_k,$$

где \bar{A}_{Δ} , \bar{A}_j и \bar{A}_k — размеры, соответствующие середине поля допуска.

Отклонения замыкающего размера могут быть также определены по формулам:

$$\Delta_{\Delta B} = \Delta_{0\Delta} + \delta_{\Delta}/2;$$

$$\Delta_{\Delta H} = \Delta_{0\Delta} - \delta_{\Delta}/2,$$

где $\Delta_{0\Delta}$ — координата середины поля допуска замыкающего размера.

Прямая задача по размерным цепям. Различают задачи двух типов: прямые и обратные. В обратной задаче по заданным номинальным размерам и допускам составляющих размеров определяют допуск замыкающего размера. Эта задача решается однозначно с применением формул (3.18)–(3.20). При решении прямой задачи заданными являются номинальные размеры составляющих звеньев и допуск замыкающего размера. Необходимо определить допуски составляющих размеров. Для решения этой задачи применяют следующие способы.

1. Принимают допуски составляющих размеров равными $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta$, тогда при решении задачи на \max – \min $\delta_i = \delta_{\Delta}/n$, где n — число составляющих размеров. При решении задачи вероятностным методом $\delta_i = \delta_{\Delta}/\sqrt{n}$.

2. Назначают для всех составляющих размеров один и тот же квали-

тет точности, т. е. считают, что допуск составляющего размера $\delta_i = 0,45a \sqrt[3]{D_i}$, где D_i — середина интервала номинальных размеров, в который попадает данный составляющий размер; a — коэффициент точности, принимаемый одинаковым для всех составляющих размеров. Коэффициент точности a определяют:

$$a = \frac{3 \delta_{\Delta}}{0,45 t \sum_{i=1}^n \sqrt{D_i}} \quad (3.23)$$

для вероятностного метода

$$a = \frac{3 \delta_{\Delta}}{0,45 t \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_i^2 K_i^2 D_i^{2/3}}} \quad (3.24)$$

Значения допусков составляющих размеров определяются в соответствии с формулами и таблицами СТ СЭВ 145–75, некоторые данные из которых приведены ниже.

Зависимость допуска от качества

Квалитет	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Допуск	7i	10i	16i	25i	40i	64i	100i	160i	250i

Интервалы номинальных размеров, мм

Выше	0	3	6	10	18	30	50	80	120	180
До	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250

Величина i , называемая единицей допуска, определяется по формуле $i = 0,45 \sqrt[3]{D} + 0,001D$, где D — рассматриваемый размер.

После вычисления допусков как по первому, так и по второму способу они могут быть скорректированы по технологическим соображениям.

Пример 6. Определить зазор A_{Δ} , необходимый для утопления буртика вала относительно шарикоподшипника (рис. 3.20). Схематично размерная цепь изображена на рис. 3.20, б.

Решение. Используем вероятностный метод. Полагая $K_i=1$ и $\xi=1$, получаем по (3.21):

$$\begin{aligned} \delta_{\Delta} &= \\ &= \sqrt{0,28^2 + 0,1^2 + 0,06^2 + 0,1^2 + 0,34^2} = \\ &= 0,466 \text{ мм}; \end{aligned}$$

по (3.17) и (3.22)

$$A_{\Delta} = 28 + 11 + 1,1 + 11 - 50 = 1,1 \text{ мм};$$

$$\bar{A}_{\Delta} = 28 + 0,5(0,28 + 0) + 11 +$$

$$+ 0,5(0 - 0,1) + 1,1 +$$

$$+ 0,5(0 - 0,06) + 11 +$$

$$+ 0,5(0 - 0,1) - 50 =$$

$$- 0,5(0,34 - 0) = 0,94 \text{ мм};$$

$$\Delta_{\Delta B} = 0,94 + 0,466/2 - 1,1 =$$

$$= 0,073 \text{ мм};$$

$$\Delta_{\Delta H} = 0,94 - 0,466/2 - 1,1 =$$

$$= -0,393 \text{ мм}.$$

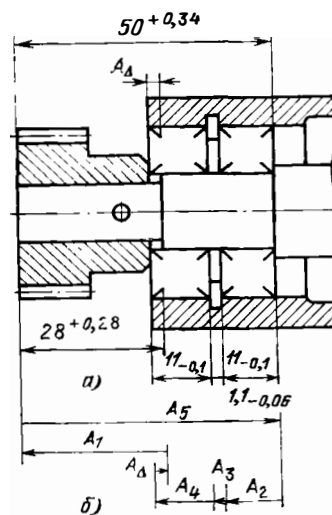


Рис. 3.20. К расчету размерной цепи: а — узел вала с шарикоподшипником; б — схема размерной цепи

Для сравнения найдем допуск по способу \max – \min :

$$\begin{aligned} \delta_{\Delta} &= \sum_{i=1}^5 \delta_i = 0,28 + 0,1 + 0,06 + \\ &+ 0,1 + 0,34 = 0,88 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Сравнение показывает, что для обеспечения заданного допуска на зазор (например, $\delta_{\Delta} = 0,5$ мм) при расчете способом \max – \min потребуются назначить более жесткие допуски на составляющие размеры. Вероятностный же способ показывает,

что допуски, назначенные в условиях задачи, обеспечивают зазор 0,5 мм с вероятностью $P=0,9973$.

Точность зубчатых передач

Показатели точности зубчатых передач. Параметры зубчатых передач (ЗП) регламентируются стандартами СТ СЭВ. Все ЗП и механически обработанные зубчатые колеса делятся на 12 степеней точности. В РЭА наибольшее распространение получили ЗП со степенями точности 5...8.

При выборе степени точности можно пользоваться следующими рекомендациями: особо точные 4 и 5 применяются в выходных звеньях особо точных механизмов, в высокоскоростных механизмах при окружных скоростях от 15 до 30 м/с для прямозубых передач и от 30 до 70 м/с для косозубых;

высокоточная 6 применяется в кинематических цепях высокоточных механизмов, работающих при окружных скоростях до 15 м/с прямозубых и до 30 м/с косозубых передач;

точная 7 применяется в механизмах управления и регулирования передачи, работающих при окружных скоростях колес до 10 м/с;

средней точности 8 применяется в неотвественных кинематических цепях при окружных скоростях зубчатых колес до 6 м/с;

пониженной точности 9 и 10 применяются в механизмах, к которым не предъявляются требования точности при окружных скоростях до 9 м/с.

Для модуля $m \geq 1$ мм стандартами установлено шесть видов сопряжения А, В, С, D, E, H, восемь видов допуска x, y, z, a, b, c, d, h на боковой зазор. Для модуля $m < 1$ мм установлено пять видов сопряжения D, E, F, G, H и пять видов допуска d, e, f, g, h .

Стандарты устанавливают рекомендуемое соответствие между степенью кинематической точности, видом сопряжения и видом допуска (табл. 3.8). Для обеспечения требуемого гарантированного зазора рекомендуемое соответствие допускается изменять.

Сопряжение H рекомендуется для тихоходных счетно-решающих и других точных механизмов при однородных материалах колес и корпуса. Сопряжение G применяется для

Таблица 3.8

Рекомендуемое стандартами СЭВ соответствие между показателями бокового зазора

Модуль m , мм	Вид сопряжения	Вид допуска на боковой зазор	Класс отклонений межосевого расстояния	Степень точности по нормам плавности		
				Цилиндрическая передача	Ресная и коническая передачи	Червячная передача
< 1	—	d	VI	До 12		
	D	e	VI	До 10 при $m \leq 0,5$ мм и до 12 при $m > 0,5$ мм		
	E	e	V	До 10 при $m \leq 0,5$ мм и до 12 при $m > 0,5$ мм		
	F G H	f g h	IV III II	До 10		
> 1	—	$x; y; z$	VI	До 12	До 12	5 ... 12
	A	a	VI	12	12	5 ... 12
	B	b	V	11	11	5 ... 12
	C	c	IV	9	9	3 ... 9
	D	d	III	8	8	3 ... 8
	$E; H$	h	II	7	7	1 ... 6

аналогичных механизмов при средних оборотах колес и небольших колебаниях температуры, с разными коэффициентами линейного расширения $K_{лр}$ материала колес и корпуса. Сопряжение F применяется для быстроходных точных механизмов при значительных колебаниях температуры и материалах корпуса и колес с различными $K_{лр}$. Сопряжения E и D применяются при пониженной точности механизма, средней скорости колес, значительных колебаниях температуры и разных $K_{лр}$ колес и корпуса.

Кинематическая погрешность и свободный обратный ход. Кинематическая погрешность (КП) передачи образуется за счет погрешностей изготовления и сборки механизма ($\Delta\varphi_{\Sigma}$ на рис. 3.21,а).

Допуск на КП зубчатого колеса $F_i = F_p + f_f$, (3.25)

где F_p — допуск на накопленную погрешность шага зубчатого колеса; f_f — допуск на погрешность профиля зуба.

В реверсивных механизмах вследствие наличия зазора, кинематической погрешности и упругих дефор-

маций при изменении направления движения образуется свободный обратный ход (ΔC на рис. 3.21,б), обычно называемый мертвым ходом (МРХ).

Расчет кинематической погрешности и мертвого хода зубчатой пары.

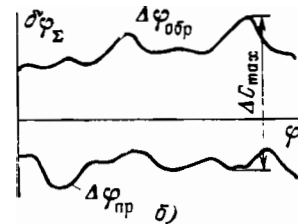
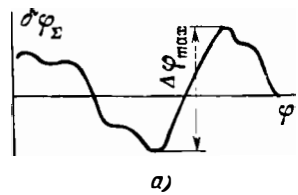


Рис. 3.21. Погрешности зубчатой передачи: а — кинематическая погрешность; б — мертвый ход

Расчет КП и МРХ регламентирован ГОСТ 21098—75 «Цели кинематические. Методы расчета точности».

Минимальное и максимальное значения КП определяются по формулам

$$\delta \varphi_{min}^M = 0,62 K_s (F'_{i1} + F'_{i2});$$

$$\delta \varphi_{max}^M = K [\sqrt{(F'_{i1})^2 + E_{\Sigma 1}^2} + \sqrt{(F'_{i1})^2 + E_{\Sigma 2}^2}],$$

где F_{i1} и F_{i2} — допуски на кинематическую погрешность ведущего и ведомого колес; $E_{\Sigma 1}$ и $E_{\Sigma 2}$ — суммарные накопленные погрешности монтажа; K_s и K — коэффициенты, зависящие от передаточного отношения $u = z_2/z_1$.

Суммарная накопленная погрешность

$$E_{\Sigma} = \sqrt{(e_p / \cos \alpha_i)^2 + (e_a \operatorname{tg} \beta)^2},$$

где α_i — угол зацепления косозубого колеса в торцевом сечении; β — угол наклона зубьев; e_p и e_a — допуски на монтажные радиальные и осевые

биения, $e_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i}$, $e_a = \sqrt{\sum_{j=1}^m e_j}$ (e_i и e_j — допуски на первичные радиальные и осевые биения).

При вероятностном методе расчета КП используют формулу

$$\delta \varphi_{max}^B = (\delta \varphi_{max}^M / K) K_p, \quad (3.26)$$

где K_p — коэффициент фазовой компенсации, зависящий от процента риска p и передаточного отношения. При $p < 1\%$ можно принять $K_p = 1$.

Максимальный и вероятный МРХ вычисляют по формулам:

$$\delta C_{max}^M = 0,7 (A_{He1} + A_{He2}) + \sqrt{0,5 (T_{n1}^2 + T_{n2}^2) + 2f_a + \Delta\rho_1^2 + \Delta\rho_2^2}; \quad (3.27)$$

$$\delta C^B = K_p \delta C_{max}^M, \quad (3.28)$$

где A_{He1} и A_{He2} — наименьшие смещения исходного контура колес; T_{n1} и T_{n2} — допуски на смещение исходного контура; $\pm f_a$ — верхнее и нижнее предельные отклонения межосевого расстояния; $\Delta\rho_1$ и $\Delta\rho_2$ — радиальные зазоры в опорах вращения.

Значения коэффициентов K и K_s зависят от передаточного числа u :

u	K	K_s	u	K	K_s
1,0	1,5	0,98	0,80	4,0	4,5
1,5	2,0	0,95	0,76	4,5	5,0
2,0	2,5	0,93	0,75	5,0	5,5
2,5	3,0	0,93	0,74	5,5	6,0
3,0	3,5	0,97	0,75	6,0	6,5
3,5	4,0	0,96	0,80	6,5	0,98

Значения КП и МРХ в угловых минутах определяются по формулам

$$\delta \varphi' = 6,88 \frac{\delta \varphi}{d_2}; \quad (3.29)$$

$$\delta C' = 6,88 \frac{\delta C}{d_2}, \quad (3.30)$$

где $\delta \varphi$ и δC — КП и МРХ, мкм; d_2 — диаметр делительной окружности ведомого колеса, мм.

Пример 7. Определить КП зубчатой пары передачи 6С СЭВ 642—77 со следующими параметрами: $m = 0,5$ мм; $z_1 = 21$; $z_2 = 36$; $E_{\Sigma 1} = 5$ мкм; $E_{\Sigma 2} = 10$ мкм.

Решение 1. По приведенным выше таблицам, СТ СЭВ 642—77 и ГОСТ 21068—75 находим: $K = 0,95$, $K_s = 0,76$ и $K_p = 0,84$ (для $p = 1\%$), $F_{p1} = 6$, $F_{p2} = 7$, $f_{f1} = 7$.

2. Находим КП передачи методом максимум — минимум:

$$F'_{i1} = F_{p1} + f_{f1} = 6 + 7 = 13 \text{ мкм}$$

$$F'_{i2} = 7 + 7 = 14 \text{ мкм};$$

$$\delta \varphi_{min}^M = 0,62 \cdot 0,76 (13 + 14) = 12,7 \text{ мкм}$$

$$\delta \varphi_{max}^M = 0,95 (\sqrt{13^2 + 5^2} + \sqrt{14^2 + 10^2}) = 29,6 \text{ мкм}.$$

3. Определяем КП вероятностным методом:

$$\delta \varphi_{max}^B = 29,6 \cdot 0,84 / 0,95 = 26,2 \text{ мкм}.$$

4. Определяем КП в угловых минутах:

$$\delta \varphi_{min}^M = 6,88 \cdot 12,7 / 18 = 4,85';$$

$$\delta \varphi_{max}^M = 6,88 \cdot 29,6 / 18 = 11,3';$$

$$\delta \varphi_{max}^B = 6,88 \cdot 26,2 / 18 = 10,0'.$$

Расчет кинематической погрешности и мертвого хода зубчатого механизма. При расчете методом тах — тип КП и МРХ зубчатого механизма, приведенные к выходному валу, определяются по формулам:

$$\delta\varphi_{\Sigma min}^M = \sum_{j=1}^n \xi_j \delta\varphi_{min j}^M;$$

$$\delta\varphi_{\Sigma max}^M = \sum_{j=1}^n \xi_j \delta\varphi_{max j}^M; \quad (3.31)$$

$$\delta C_{\Sigma max}^M = \sum_{j=1}^n \xi_j \delta C_{max j}^M;$$

где $\delta\varphi_{\Sigma min}^M$; $\delta\varphi_{\Sigma max}^M$; $\delta C_{\Sigma max}^M$ — минимальная КП, максимальная КП и максимальный МРХ, приведенные к выходному валу (колесу), угл.мин.; ξ_j — передаточное отношение j -й зубчатой пары; $\delta\varphi_{min j}^M$; $\delta\varphi_{max j}^M$; $\delta C_{max j}^M$ — соответствующие КП и МРХ j -й зубчатой пары.

Передаточное отношение

$$\xi_j = \frac{z_{1(j+1)} z_{1(j+2)} \dots z_{1(k)} \dots z_{1n}}{z_{2(j+1)} z_{2(j+2)} \dots z_{2(k)} \dots z_{2n}},$$

где $z_{1(k)}$, $z_{2(k)}$ — число зубьев ведущего и ведомого колес k -й передачи (пары колес); n — число передач в механизме. (Передаточное отношение последней пары $\xi=1$.)

При расчете КП и МРХ вероятностным методом

$$\Delta\varphi_{\Sigma}^B = \Delta\varphi_{\omega}^B + t_1 \sqrt{\sum_{j=1}^n (\xi_j \omega_j^B)^2}; \quad (3.32)$$

$$\Delta C_{\Sigma}^B = \Delta C_{\omega}^B + t_2 \sqrt{\sum_{j=1}^n (\xi_j \omega_j^C)^2},$$

где

$$\Delta\varphi_{\omega}^B = \sum_{j=1}^n \xi_j \Delta\omega_j^B = \sum_{j=1}^n \xi_j [(\delta\varphi_{min j} + \delta\varphi_{max j})/2]; \quad (3.33)$$

$$\Delta C_{\omega}^B = \sum_{j=1}^n \xi_j \Delta\omega_j^C =$$

$$= \sum_{j=1}^n \xi_j [(\delta C_{max j} + \delta C_{min j})/2],$$

где $\delta\varphi_{\Sigma}^B$ и δC_{Σ}^B — максимальные вероятные КП и МРХ кинематической цепи зубчатого механизма, угл.мин.; $\Delta\varphi_{\omega}^B$ и ΔC_{ω}^B — координаты середин полей допусков КП и МРХ зубчатого

механизма, угл.мин.; $\Delta\omega_{\varphi_j}$, $\Delta\omega_{C_j}$ — максимальные отклонения КП и МРХ от середины поля допуска, угл.мин.; ω_{φ_j} и ω_{C_j} — величины полей рассеяния j -й передачи, угл.мин.:

$$\omega_{\varphi_j}^B = \delta\varphi_{max j} - \delta\varphi_{min j};$$

$$\omega_{C_j}^B = \delta C_{max j} - \delta C_{min j}.$$

Величины t_1 и t_2 зависят от процента риска (ГОСТ 21098—75):

$p, \%$	10	4,5	1,0	0,27	0,1
t_1	0,26	0,35	0,48	0,57	0,61
t_2	0,21	0,28	0,39	0,46	0,5

Выбор вида сопряжения в зубчатых передачах. Кроме указанных выше рекомендаций при выборе вида сопряжения необходимо соблюдать неравенство $j_t \leq j_{n min}$, где $j_{n min}$ — гарантированный наименьший боковой зазор в зацеплении в соответствии со стандартами СЭВ; j_t — боковой зазор, соответствующий температурной компенсации.

Значения j_t , мкм, определяются по следующим формулам:

для цилиндрической зубчатой пары

$$j_t = 684 a [\alpha_{зк} (\vartheta_{зк} - 20) - \alpha_{кор} (\vartheta_{кор} - 20)];$$

для конической зубчатой пары

$$j_t = 684 a (\operatorname{tg} \delta_1 + \operatorname{tg} \delta_2) [\alpha_{зк} (\vartheta_{зк} - 20) - \alpha_{кор} (\vartheta_{кор} - 20)];$$

для реечной пары

$$j_t = 684 (H + 0,5 m z) [\alpha_{зк} (\vartheta_{зк} - 20) - \alpha_{кор} (\vartheta_{кор} - 20)],$$

где a — межосевое расстояние, мм;

$\alpha_{кор}$, $\alpha_{зк}$ — коэффициенты линейного расширения корпуса и зубчатых колес; $\vartheta_{кор}$, $\vartheta_{зк}$ — температура корпуса и зубчатого колеса; H — расстояние от базовой плоскости до делительной линии рейки, мм; m , z — модуль и число зубьев реечного колеса; δ_1 и δ_2 — углы начального конуса конических колес.

Учет деформаций
Под действием внешних и внутренних сил элементы механизмов испытывают деформации (главным образом, изгиба и кручения). Кроме того, элементы механизмов могут деформироваться при изменении температуры. В точных измерительных механизмах, а также при недоста-

точной жесткости элементов эти деформации могут существенно влиять на точность.

При необходимости учета деформаций расчет ведут по формулам

$$\delta\varphi_{\Sigma} = \Delta\varphi_{\omega}^B + \Delta_{изг} + \Delta_{кр} +$$

$$+ \sqrt{\sum_{j=1}^n (\xi_j \omega_{\varphi_j}^B)^2},$$

$$\delta C_{\Sigma} = \Delta C_{\omega}^B + \Delta_{изг} + 2 \Delta_{кр} +$$

$$+ \sqrt{\sum_{j=1}^n (\xi_j \omega_{C_j}^B)^2},$$

где $\Delta_{изг}$ и $\Delta_{кр}$ — приведенные суммарные погрешности, вызываемые изгибом и кручением элементов;

$$\Delta_{изг} = \sum_{j=1}^n \xi_j \Delta_{изг j}; \quad \Delta_{кр} = \sum_{j=1}^n \xi_j \Delta_{кр j}$$

($\Delta_{изг j}$ и $\Delta_{кр j}$ — погрешности изгиба и кручения j -го элемента, вычисляемые по формулам сопротивления материалов [7]).

Пример 8. Определить вероятностным методом кинематическую погрешность и свободный обратный ход механизма, изображенного на рис. 3.22. Модуль всех зубчатых колес $m=0,6$ мм; число зубьев $z_1=27$; $z_2=50$; $z_3=28$; $z_4=84$; $z_5=27$; $z_6=108$; зазоры во всех опорах $\Delta r_i=10$ мкм; накопленные погрешности монтажа $E_{\Sigma 1}=E_{\Sigma 2}=E_{\Sigma 3}=E_{\Sigma 4}=15$ мкм; $E_{\Sigma 5}=E_{\Sigma 6}=20$ мкм; точность передачи 7 С СТ СЭВ 642—77; процент риска $p=0,27\%$.

Решение. 1. Данные (по СТ СЭВ 642—77 и ГОСТ 21098—75), необходимые для расчета, сведем в таблицу:

№ колеса	d_i , мм	T_{H_i} , мкм	$F'_{i'}$, мкм	$A_{изг1} + A_{изг2}$, мкм	a , мм	ξ_j	$f_{a'}$, мкм	$j_{n min}$, мкм	K	K_s	K_p
1	16,2	38	34	32	23,1	0,0833	16	9	0,95	0,76	0,85
2	30	38	36	32	23,1	0,0833	16	9	0,95	0,76	0,85
3	16,8	38	34	38	33,6	0,25	20	11	0,93	0,74	0,92
4	50,4	45	45	38	40,5	1	20	11	0,96	0,80	0,95
5	16,2	38	34	38	40,5	1	20	11	0,96	0,80	0,95
6	64,8	45	45	38	40,5	1	20	11	0,96	0,80	0,95

Для $p=0,27\%$ имеем $t_1=0,57$; $t_2=0,46$.

2. Определяем минимальные КП передач:

$$\delta\varphi_{min 1} = 0,71 \cdot 0,76 (34 + 36) = 37,8 \text{ мкм};$$

$$\delta\varphi_{min 2} = 0,71 \cdot 0,74 (34 + 45) = 41,5 \text{ мкм};$$

$$\delta\varphi_{min 3} = 0,71 \cdot 0,80 (34 + 45) = 44,9 \text{ мкм}.$$

В угловых минутах

$$\delta\varphi'_{min 1} = 6,88 \frac{37,8}{30} = 8,7';$$

$$\delta\varphi'_{min 2} = 6,88 \frac{41,5}{50,4} = 5,7';$$

$$\delta\varphi'_{min 3} = 6,88 \frac{44,9}{64,8} = 4,8'.$$

3. Ищем максимальные КП передач:

$$\delta\varphi_{max 1} = 0,95 (\sqrt{34^2 + 15^2} + \sqrt{36^2 + 15^2}) = 72,5 \text{ мкм};$$

$$\delta\varphi_{max 2} = 0,93 (\sqrt{34^2 + 15^2} +$$

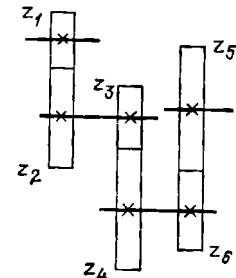


Рис. 3.22. К определению погрешностей зубчатого механизма (к примеру 8)

$$+ \sqrt{45^2 + 20^2} = 80,3 \text{ мкм};$$

$$\delta \varphi_{\text{max } 3} = 0,96 (\sqrt{34^2 + 15^2} + \sqrt{45^2 + 20^2}) = 83,0 \text{ мкм}.$$

В угловых минутах

$$\delta \varphi'_{\text{max } 1} = 16,6'; \quad \delta \varphi'_{\text{max } 2} = 11,0';$$

$$\delta \varphi'_{\text{max } 3} = 8,8'.$$

4. Находим поля рассеяния КП передач:

$$\omega_1^{\Phi} = 16,6 - 8,7 = 7,9';$$

$$\omega_2^{\Phi} = 11,0 - 5,7 = 5,3';$$

$$\omega_3^{\Phi} = 8,8 - 4,8 = 4,0'.$$

5. Определяем координату поля рассеяния механизма:

$$\Delta_{\omega}^{\Phi} = 0,0833 \cdot 0,5 (8,7 + 16,6) + 0,25 \cdot 0,5 (5,7 + 11) + 0,5 (4,8 + 8,8) = 9,8'.$$

6. Вычисляем суммарную КП механизма:

$$\delta \varphi_{\Sigma} = 9,8 + 0,57 \sqrt{(0,0833 \cdot 7,9)^2 + \dots} \rightarrow \rightarrow + (0,25 \cdot 5,3)^2 + 4,0^2 = 12,3'.$$

7. Аналогично определяем соответствующие значения МРХ:

$$\delta C'_{\Sigma} = 6,88 \frac{9}{30} = 2,1';$$

$$\delta C'_{\Sigma} = 6,88 \frac{11}{50,4} = 1,5';$$

$$\delta C'_{\Sigma} = 6,88 \frac{11}{64,8} = 1,2';$$

$$\delta C_{\text{max } 1} = 0,7 \cdot 32 + \sqrt{0,5(38^2 + 38^2) + 2 \cdot 16^2 + 10^2 + 10^2} = 68,9 \text{ мкм};$$

$$\delta C_{\text{max } 2} = 0,7 \cdot 38 + \sqrt{0,5(38^2 + 45^2) + 2 \cdot 20^2 + 10^2 + 10^2} = 78,9 \text{ мкм};$$

$$\delta C_{\text{max } 3} = 0,7 \cdot 38 +$$

$$+ \sqrt{0,5(38^2 + 45^2) + 2 \cdot 20^2 + 10^2 + 10^2} = 78,9 \text{ мкм};$$

$$\delta C_{\text{max } 1} = 15,8'; \quad \delta C'_{\text{max } 2} = 10,8'$$

$$\delta C'_{\text{max } 3} = 8,4';$$

$$\omega_1^C = 15,8 - 2,1 = 13,7;$$

$$\omega_3^C = 10,8 - 1,5 = 9,3';$$

$$\omega_3^C = 8,4 - 1,2 = 7,2';$$

$$\Delta_{\omega}^C = 0,0833 \cdot 0,5 (2,1 + 15,8) + 0,25 \cdot 0,5 + 10,8) + 0,5 (1,2 + 9,3) = 7,5'.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вопилкин Е. А.** Расчет и конструирование механизмов приборов и систем. — М.: Высшая школа, 1980.
2. **Грейм И. А.** Элементы проектирования и расчет механизмов приборов. — Л.: Машиностроение, 1972.
3. **Зубчатые передачи:** Справочник/Под ред. Е. Г. Гинзбурга. — Л.: Машиностроение, 1980.
4. **Куцоков В. А., Шевченко-Грабский И. В.** Расчет статических моментов и мертвых ходов в кинематических цепях точных приборов. — Л.: Машиностроение, 1968.
5. **Левин И. Я.** Справочник конструктора точных приборов. — М.: Машиностроение, 1967.
6. **Первичный Ю. Д.** Расчет и конструирование точных механизмов. — Л.: Машиностроение, 1976.
7. **Пименов А. И.** Механизмы настройки РЭА. — М.: Высшая школа, 1977.
8. **Рошин Г. И.** Конструирование механизмов радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Высшая школа, 1973.
9. **Тищенко О. Ф., Валедицкий А. С.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. — М.: Машиностроение, 1977.

4. СХЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИЗМОВ

Основные аббревиатуры

БЗ	— боковой зазор
В	— вал
ВЗП	— волновая зубчатая передача
ВМ	— винтовой механизм
ГС	— гибкая связь
ДМХ	— дифференциальный механизм
ЗК	— зубчатое колесо
ЗП	— зубчатая передача
ИЭ	— исполнительный элемент
КМ	— кулачковый механизм
КС	— кинематическая схема
Л	— лента
ЛПМ	— лентопротяжный механизм
МХ	— механизм
МГ	— магнитная головка
МФ	— муфта
МРХ	— мертвый ход
О	— ось
ОУ	— отсчетное устройство
П	— привод
ПМ	— планетарный механизм
ПР	— пружина
ПШ	— подшипник
ПШС	— подшипник скольжения
РЛ	— ролик
У	— узел
ФМ	— фрикционная муфта
ФП	— фрикционная передача
Ч	— червяк
ЧК	— червячное колесо
ЧП	— червячная передача
Ш	— шкала
ШГО	— шкала грубого отсчета
ШТО	— шкала точного отсчета
ШЭД	— шаговый электродвигатель
ШПШ	— шарикоподшипник
ЭД	— электродвигатель
ЭМ	— электромагнит

4.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Назначение и классификация механизмов. Механизм — система тел, предназначенная для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел [3].

В РЭА используют МХ настройки, дистанционных передач и синхронно-следящих систем, приводов антенн, движения пленки и дисков, переключения и др. Исходя из функциональных особенностей работы, МХ можно объединить в следующие группы [7]: 1) отсчетные; 2) ручной настройки; 3) электромеханической на-

стройки; 4) следящих систем; 5) дистанционных передач; 6) приводов антенн РЛС; 7) записывающих и воспроизводящих устройств. МХ каждой группы отличаются конструкцией, передаваемыми нагрузками и характером движения.

Требования, предъявляемые к механизмам. Основными требованиями для большинства МХ являются [4]: точность выполнения заданных функций; надежность и безотказность работы; удобство, простота и безопасность обслуживания; простота схемы — минимальное число звеньев и кинематических пар; плавность и бесшумность работы; уравновешенность и виброустойчивость; прочность; долговечность; износостойчивость; высокий КПД; экономичность изготовления и эксплуатации; простота сборки и ремонта; минимальная затрата материалов; малые масса и габариты; широкое применение стандартных и нормализованных узлов и деталей; взаимозаменяемость деталей; высокая технологичность конструкции, минимальная трудоемкость и стоимость изготовления в конкретных условиях единичного или серийного производства при использовании прогрессивных технологических процессов; современное эстетическое оформление и отделка.

Общие положения конструирования механизмов. Для удовлетворения требований, предъявляемых к МХ и его деталям, необходимо правильно выбрать материал, форму, размеры, допуски и качество поверхностей деталей.

Выбор материалов определяется их механическими и физическими свойствами, износо- и влагоустойчивостью, технологичностью изготовления и др. Геометрическая форма и размеры детали определяются ее назначением и взаимодействием с другими деталями; взаимным расположением, величиной и местами приложения действующих на деталь сил и моментов; видом деформаций; условиями эксплуатации; свойствами материала; технологией изготовления; сборкой и ремонтом и другими факторами [4].

В МХ, передающих значительные крутящие моменты или воспринимающих значительные силовые нагруз-

ки, ряд деталей приходится рассчитывать на прочность и жесткость. Форма и размеры этих деталей должны быть такими, чтобы расчетные напряжения (нормальные σ или касательные τ), возникающие в опасных сечениях, не превышали допускаемых напряжений, т. е. $\sigma \leq [\sigma]$ или $\tau \leq [\tau]$. Допускаемым напряжением называется такое безопасное напряжение, которое деталь может выдержать в течение заданного срока эксплуатации. Величина допускаемого напряжения при расчете деталей на прочность: $[\sigma] \approx \sigma_{пред}/n$ или $[\tau] = \tau_{пред}/n$, где $\sigma_{пред}$ и $\tau_{пред}$ — предельные нормальное и касательное напряжения, которые зависят от характера напряженного состояния и природы материала; n — коэффициент запаса прочности.

Расчет на статическую жесткость сводится к определению линейных f и угловых θ прогибов и сравнению их с допустимыми значениями, которые выбирают из условия выполнения изделием своих функций.

Формулы для расчета деталей на прочность и жесткость приведены в [4, 5, 7].

4.2. ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Классификация и применение зубчатых передач. Зубчатые передачи классифицируют по взаимному расположению осей (а), числу ступеней пар колес (б), форме центроид (в), характеру относительного движения колес (г), виду зацепления (д) и расположению зубьев относительно образующей (е) (рис. 4.1):

а) цилиндрические (рис. 4.1, а, б, е и ж), конические (4.1, з), планетарные (4.1, в), дифференциальные (4.1, и) и червячные (4.1, д);

б) одноступенчатые (4.1, а—г) и многоступенчатые (4.1, е);

в) с круглыми ЗК и $i = \text{const}$ и некруглыми ЗК с $i \neq \text{const}$ (4.1, ж);

г) с неподвижными осями вращения ЗК и подвижными (эпициклические — планетарные и дифференциальные);

д) с внешним (4.1, а), внутренним (4.1, б) и реечным (4.1, в) зацеплениями;

е) прямоугольные I и косозубые II (4.1, а).

По ГОСТ 9178—81 и 1643—81 зубчатые передачи разделены на 12 степе-

ней точности. В РЭА применяются ЗП 5—8 степеней точности.

Зубчатые передачи, в которых происходит уменьшение угловых скоростей при передаче от ведущего звена, называют редукторами; ЗП, в ко-

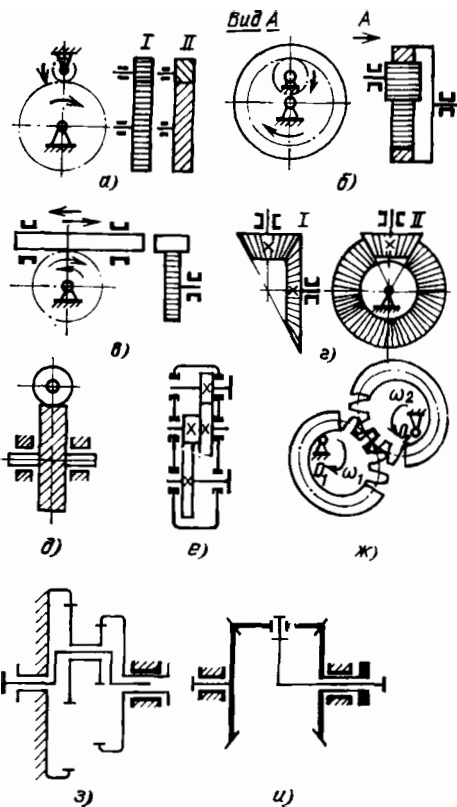


Рис. 4.1. Виды зубчатых передач

рых увеличиваются угловые скорости, называют мультипликаторами. Меньшее зубчатое колесо называют шестерней. Редукторы позволяют осуществлять малые и точные перемещения элементов настройки, мультипликаторы «расширяют шкалы», что позволяет производить измерения с высокой точностью.

Достоинства ЗП: малые размеры при передаче значительной мощности, высокий КПД, большая долговечность и надежность, постоянство i (при круглых колесах), простота эксплуатации, возможность изменения в широком диапазоне мощностей v и i ; недостатки — необходимость высо-

кой точности изготовления и сборки, шум при больших окружных скоростях.

Параметры зубчатых передач. Основной кинематической характеристикой зубчатого зацепления (рис. 4.2) является постоянство i при непрерывном контакте зубьев. При этом общая нормаль (линия зацепления) к профилям ЗК в любой точке их касания должна проходить через полюс зацепления. В цилиндрических ЗП полюсом зацепления (P) является точка касания начальных окружностей ЗК. Угол α между линией зацепления и перпендикуляром к линии межосевого расстояния называется углом зацепления. Обычно $\alpha = 20^\circ$.

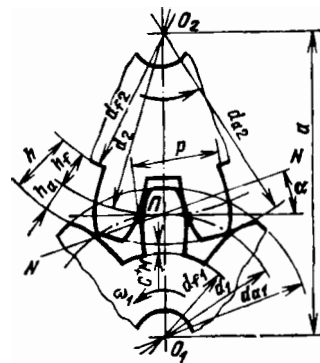


Рис. 4.2. Схема зацепления зубчатых колес

При вращении колес начальные окружности диаметрами d_1 и d_2 катятся друг по другу без скольжения. При этом

$$d_1 = 2a/(1+i); \quad d_2 = 2ai/(1+i) = d_1 i,$$

где a — межцентровое расстояние.

Указанному условию удовлетворяют многие кривые, в частности эвольвенты, которые наиболее выгодны для профилирования зубьев с точки зрения сочетания эксплуатационных и технологических свойств, поэтому эвольвентное зацепление получило преимущественное применение.

У ЗК должен быть одинаковый шаг p , измеренный по дуге начальной окружности ЗК между соответствующими точками соседних зубьев. Величина p связана с z и d зависимостью $zp = \pi d$, откуда $d = (p/\pi)z = mz$, где m — модуль зацепления — основной параметр ЗП. Величина m

для силовых передач определяется расчетом, а для других — по конструктивным соображениям и регламентируется стандартом СЭВ 310—76. В механизмах РЭА наиболее распространены следующие значения m : 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,5; 2 мм.

Делительной окружностью называется окружность ЗК, на которой дуговой шаг соответствует стандартному значению m . Делительная окружность — понятие, свойственное отдельному ЗК; величина ее не изменяется при изменении a . Диаметр делительной окружности $d_d = mz$.

Начальные окружности характерны для ЗК, находящихся в зацеплении. При увеличении a диаметры начальных окружностей тоже увеличиваются, т. е. $a + \Delta a = d_1 + d_2$.

Для некорригированных зацеплений начальные и делительные окружности совпадают (корригирование ЗК — прием улучшения формы зубчатого зацепления). Передаточное отношение сопряженной пары ЗК может быть определено из выражения: $i_{1,2} = \omega_1/\omega_2 = d_2/d_1$, где ω_1 и ω_2 — угловые скорости колес.

Конструкция и материал зубчатых колес. Форму и размеры ЗК определяют в зависимости от z , m , формы и длины зубьев, диаметра B , а также от материала и технологии изготовления ЗК. Пример конструкции ЗК показан на рис. 4.3. Размеры колес рекомендуется брать в соответствии с указаниями ГОСТ 13733—68. Ориентировочные размеры ЗК: $D_c = (1,6 \dots 1,8)D$; $b = (0,3 \dots 0,5)B$; $H = (5 \dots 8)m$; $l = (1 \dots 2)D \gg B + 3d_m$; $d_m = (0,2 \dots 0,25)D$.

Для уменьшения массы и момента инерции ЗК в них делают отверстия

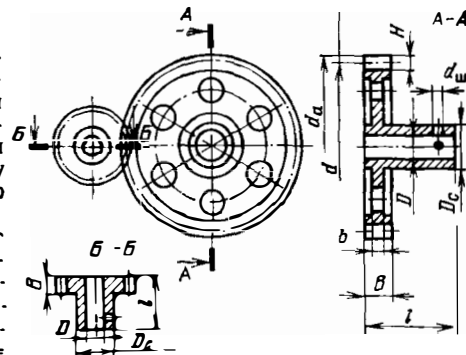


Рис. 4.3. Конструктивные схемы зубчатых колес

и выточки. ЗК с $B < 6$ и $d > 60$ мм часто изготавливают составными из ступицы и диска, прикрепленного к ней винтами, заклепками, посредством прессовой посадки или развальцовки. Если диаметр окружности впадин шестерни d_f мало отличается от диаметра вала D , то шестерню и вал изготавливают как одну деталь. Для устранения бокового зазора применяют люфтовывирающие ЗК, состоящие из двух тонких колес, одно из которых жестко связано с валом, а другое надето на него свободно. Между собой ЗК связываются пружинами, которые поворачивают подвижное колесо относительно неподвижного и тем самым вытирают боковой зазор в зацеплении. Конструкции таких ЗК показаны на рис. 4.4.

В МХ РЭА широко применяются различные пластмассы и другие неметаллические материалы (табл. 4.1). Для повышения стойкости зубьев против износа рекомендуется применять разные материалы для колеса и шестерни. Так как последняя делает больше оборотов, то ее зубья должны быть тверже.

Передачи с цилиндрическими прямо- и косозубыми ЗК. Такие передачи обычно применяют при $v < 6$ м/с, $i_{1,2}$ от 0,2 до 6 (редко до 10), КПД $\eta = 0,98 \dots 0,92$. Зубчатые передачи с косозубыми ЗК работают более плавно, с меньшим шумом, и нагрузка в них распределяется на большее число зубьев, чем в ЗП с прямозубыми ЗК. Недостаток косозубых ЗП — появление осевых усилий. У косозубых ЗК зубья расположены под углом β к образующей цилиндра ЗК, поэтому основные параметры элементов зацепления косозубых ЗК выражаются в нормальном и торцевом сечениях. В косозубых ЗК различают нормальный модуль m_n , который измеряют в сечении, перпендикулярном направлению косоуго зуба. Этот модуль полностью соответствует стандартному модулю инструмента. Торцевой модуль m_t измеряется в плоскости вращения ЗК. Геометрический расчет цилиндрической ЗП приведен в табл. 4.2.

Зубья ЗК рассчитывают на контактную прочность и на изгиб (предотвращение излома зубьев). Расчет-

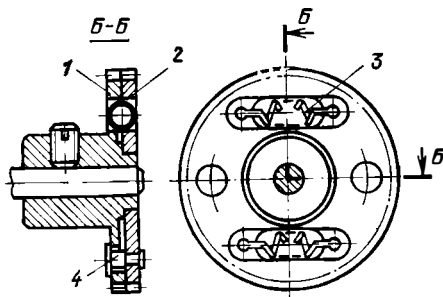


Рис. 4.4. Конструкция разрезных зубчатых колес: 1 — неподвижное ЗК; 2 — подвижное ЗК; 3 — пружина; 4 — заклепка

Таблица 4.1

Материалы, рекомендуемые для пары зубчатых колес

Вид передачи	Окружная скорость, v , м/с	Степень точности	Шероховатость поверхности, мкм	Марка материала	
				шестерни	колеса
Цилиндрическая прямозубая	До 6	7; 8	$R_a = 0,63 \dots 2,5$	Сталь 55	Сталь 45
				Сталь 45	Сталь 35
Цилиндрическая коническая	До 3	8	$R_a = 1,25 \dots 2,5$	Сталь 45	Сталь 35
				Сталь 35	Сталь 15
Цилиндрическая коническая	До 1	9	$R_z = 10 \dots 20$	Сталь 15	Дюралюминий Д16Т
				Сталь 15	Латунь ЛС59-1
Цилиндрическая коническая	До 1	8	$R_z = 10 \dots 20$	Сталь 15	Латунь ЛС59-1
				Сталь 35	Латунь ЛС59-1

Расчет цилиндрических прямо- и косозубых ЗП с внешним зацеплением при $\alpha = 20^\circ$

Элементы передачи	Формулы
Модуль нормальный	$m_n = m$ (по СТ СЭВ 310—76)
Шаг нормальный	$p_n = \pi m_n$
Угол наклона зубьев (для косозубых ЗК)	$\beta = 8 \dots 15^\circ$
Модуль торцевой	$m_t = m_n / \cos \beta$
Диаметры делительных окружностей	$d_1 = m_t z_1; d_2 = m_t z_2$
Высота делительной головки зуба	$h_a = h^* a m$
Высота делительной ножки зуба	$h_f = (h^* a + c^*) m$
Зазор радиальный	$c = c^* m$
Высота зуба	$h = h_a + h_f$
Длина зуба	$b = (3 \dots 15) m$
Диаметр окружности выступов	$d_a = d + 2h_a$
Диаметр окружности впадин	$d_f = d - 2h_f$
Межосевое расстояние	$a = 0,5(d_2 + d_1)$

Примечания: 1. Коэффициент головки зуба $h^* a = 1$. 2. Коэффициент ножки зуба $c^* = 0,5$ при m до 0,5 мм; $c^* = 0,35$ при m свыше 0,5 до 1 мм; $c^* = 0,25$ при $m \geq 1$.

ные напряжения изгиба в зубьях σ_H не должны превышать допускаемых $[\sigma]_H$:

для прямозубых колес

$$\sigma_H = \frac{0,68 M_H K_H K_D}{m^2 b z_2 y} \leq [\sigma]_H;$$

для косозубых колес

$$\sigma_H = \frac{0,44 M_H K_H K_D \cos \beta}{m_n^2 z_2 b y} \leq [\sigma]_H.$$

Задаваясь коэффициентом $\psi_m = b/m$ (для механизмов РЭА $\psi_m = 4 \dots 10$) и $[\sigma]_H$, определяют m [мм]:

$$m = \sqrt[3]{\frac{0,68 M_H K_H K_D}{\psi_m z_2 y [\sigma]_H}};$$

для косозубых колес

$$m = \sqrt[3]{\frac{0,44 M_H K_H K_D \cos \beta}{\psi_m z_2 y [\sigma]_H}};$$

где крутящий момент M_H — [Н·мм]; σ_H — [МПа]; b — [мм]; y — коэффициент формы зуба, значения которого для прямозубых ЗК даны в табл. 4.3. Для косозубых ЗК y выбирают из табл. 4.3 по приведенному числу зубьев эквивалентных прямозубых колес $z_3 = z / \cos^3 \beta$. Коэффициент концентрации нагрузки $K_H = 1,0 \dots 1,35$; при этом K_H увеличивается с увеличением твердости материала зубьев и несимметрич-

ности расположения колес относительно опор; K_D — коэффициент динамичности нагрузки. Для ЗП ручного привода и $v < 1$ м/с $K_D = 1$; при $v = 1,0 \dots 1,3$ м/с $K_D = 1,2 \dots 1,35$; при $v = 3 \dots 8$ м/с $K_D = 1,3 \dots 1,55$ [5].

При расчете на контактную прочность определяют размеры ЗК, при которых расчетные контактные напряжения σ_K в материале зубьев не превышают допустимой величины $[\sigma]_K$.

Для прямозубых стальных колес

$$\sigma_K = \frac{335}{a i} \sqrt{\frac{(i \pm 1)^3 M_H K_H K_D}{b}} \leq [\sigma]_K;$$

$a = (i \pm 1) \times$

$$\times \sqrt[3]{\left(\frac{335}{[\sigma]_K i}\right)^2 \frac{M_H K_H K_D}{\psi}}, \text{ мм.}$$

Таблица 4.3

Коэффициент формы зуба y для прямозубых ЗК

Число зубьев	y	Число зубьев	y
13	0,107	36	0,147
17	0,118	42	0,151
20	0,126	50	0,155
24	0,134	80	0,162
30	0,141	100	0,163

Для косозубых стальных колес

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{290}{a_i} \sqrt{\frac{(i \pm 1)^3 M_{\text{н}} K_{\text{к}} K_{\text{д}}}{b}} \leq [\sigma]_{\text{к}};$$

$$a = (i \pm 1) \times \sqrt[3]{\left(\frac{290}{[\sigma]_{\text{к}} i}\right)^2 \frac{M_{\text{н}} K_{\text{к}} K_{\text{д}}}{\psi}}, \text{ мм.}$$

Здесь знак «+» относится к передаче внешнего, а знак «-» — внутреннего зацеплений; a — [мм]; $\psi = b/a = 0,05 \dots 0,5$ — коэффициент ширины колес. Зная величину a , выбираем m по СТ СЭВ 310—76. Из условия $a = 0,5 m z_1 (i_2 \pm 1)$ находим: $z_1 = 2a/m(i_2 \pm 1)$; $z_2 = z_1 i_2$; $d_1 = m z_1$; $d_2 = m z_2$; $b = \psi a$ и уточняем $a = 0,5 (d_2 \pm d_1)$.

Конические зубчатые передачи. Передачи с коническими ЗК применяют при пересекающихся валиках, расположенных обычно под углом 90° (рис. 4.5). Передаточное отношение

$$i_{12} = \omega_1/\omega_2 = z_2/z_1 = d_2/d_1 = 0,3 \dots 0,5.$$

Размеры сечения зубьев и шаг между ними с приближением к вершине конуса уменьшаются.

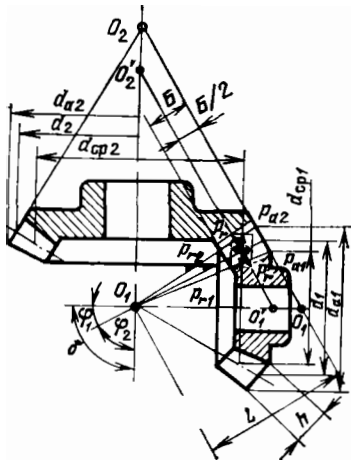


Рис. 4.5. Схема конической зубчатой передачи

В конических передачах начальные конусы колес 1 и 2 соприкасаются по образующим и перекатываются друг по другу без скольжения. Вершины этих конусов находятся в точке пересечения осей колес.

В коническом колесе вместо торцевого сечения рассматривают сечение поверхностью дополнительного конуса, ось которого совпадает с осью колеса, а образующая перпендикулярна к образующей делительного конуса. Окружность, получаемую в результате пересечения делительного и наружного дополнительного конусов, называют делительной окружностью конического колеса.

Углы начальных (делительных) конусов

$$\text{tg } \varphi_1 = z_1/z_2 = 1/i; \quad \text{tg } \varphi_2 = z_2/z_1 = i.$$

Диаметры начальных окружностей $d_1 = m z_1$; $d_2 = m z_2$. Диаметры начальных окружностей в среднем сечении зубьев

$$d_{\text{ср}1} = d_1 - b \sin \varphi_1;$$

$$d_{\text{ср}2} = d_2 - b \sin \varphi_2.$$

Диаметры окружностей выступов

$$d_{a1} = m (z_1 + 2 \cos \varphi_1);$$

$$d_{a2} = m (z_2 + 2 \cos \varphi_2).$$

Длина образующей начального конуса $L = 0,5 m \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$.

При конструировании конических ЗК размеры зубьев, m и ρ на наружном дополнительном конусе необходимо брать из числа стандартных размеров.

С целью упрощения расчетов на прочность конические ЗК заменяются эквивалентными цилиндрическими. Модуль эквивалентных цилиндрических колес равен модулю конических колес в сечении, расположенном на середине длины зуба. При этом основные размеры эквивалентных колес следующие:

$$d_{1\text{э}} = d_{\text{ср}1} / \cos \varphi_1; \quad d_{2\text{э}} = d_{\text{ср}2} / \cos \varphi_2;$$

$$a_{\text{э}} = (L - 0,5 b) \frac{i^2 + 1}{i};$$

$$m_{\text{ср}} = m \frac{L - 0,5 b}{L};$$

$$i_{\text{э}} = i_{12}^2; \quad z_{1\text{э}} = z_1 / \cos \varphi_1;$$

$$z_{2\text{э}} = z_2 / \cos \varphi_2.$$

При расчете зубьев конических колес на контактную прочность и на изгиб предполагается, что нагруженные способности конической передачи и эквивалентной ей цилиндрической равны между собой при одинаковой длине зубьев колес. Поэтому для

проверочного расчета конических колес можно использовать формулы для цилиндрических колес, в которых величины a , i , m , $M_{\text{к}}$ необходимо заменить на $a_{\text{э}}$, $i_{\text{э}}$, $m_{\text{ср}}$ и $M_{\text{кэ}} = M_{\text{к}} / \cos \varphi$.

4.3. ЧЕРВЯЧНЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Червячные передачи применяются для передачи движения между пересекающимися валами, когда требуется осуществить $i = 7 \dots 100$, редко до 300 и более. В РЭА обычно применяются ЧП, у которых зубья ЧК имеют вогнутую форму и охватывают червяк по дуге с углом $2\gamma = 60 \dots 110^\circ$ (рис. 4.6). При этом получается линейный контакт между

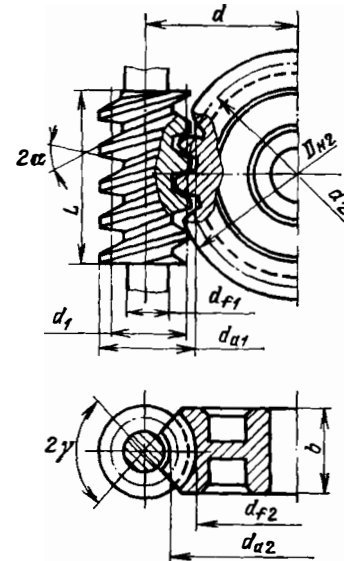


Рис. 4.6. Основные геометрические параметры червячной передачи

зубьями ЧК и витками червяка. Достоинства ЧП: малые габариты при больших i ; плавность и бесшумность работы; надежность и прочность в эксплуатации; возможность самоторможения (при $\lambda < \varphi$, где λ — угол подъема винтовой линии червяка, φ — угол трения). Недостатки ЧП: низкий КПД; необходимость применения высококачественных бронз для зубьев ЧК с целью уменьшения φ ; высокая стоимость инструмента для нарезания зубьев ЧК; высокие требо-

вания к точности изготовления и сборки.

Для ЧП $i = \omega_1/\omega_2 = z_2/z_1$, где ω_1 , ω_2 — угловые скорости Ч и ЧК; z_2 — число зубьев ЧК ($z_2 > 26$) z_1 — число заходов Ч ($z_1 = 1 \dots 4$). Модулем ЧП считается осевой модуль червяка m , который выбирают по СТ СЭВ 267—76. Основные размеры ЧК определяют по формулам для цилиндрических ЗК. Делительный диаметр червяка $d_1 = m z_1 = m z_1 / \text{tg } \lambda = m q$, где m — торцевой модуль Ч; q — коэффициент диаметра Ч. Согласно ГОСТ 2144—76 $q = 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20$. Наружный диаметр Ч $d_{a1} = d_1 + 2m$. Диаметр окружности впадин $d_{f1} = d_1 - 2,5 m \cos \alpha$. Межосевое расстояние $a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m}{2} (q + z_2)$.

Длину нарезанной части Ч берут: при $z = 1 \dots 2$ $L = (11 + 0,067 z_2) m$. Ширина ЧК при $z_1 < 3$, $b < 0,75 d_{a1}$. Угол обхвата $\gamma \approx \arcsin \frac{b}{d_{a1} - 0,5 m}$.

Червяк обычно выполняют как одно целое с валом из качественных термически обработанных углеродистых или легированных сталей; для повышения качества его поверхность шлифуют и полируют. Червячные колеса чаще делают составными: бронзовый венец устанавливается на стальную ступицу. Лучшим антифрикционным материалом для зубьев колеса являются бронзы БР ОФ 10-1, БР ОНФ. В механизмах РЭА используются также колеса из текстолита, полнамидов и т. п. Для устранения бокового зазора в ЧП применяют люфтовывбрающие ЧК, состоящие из колес 1 и 2 (рис. 4.7),

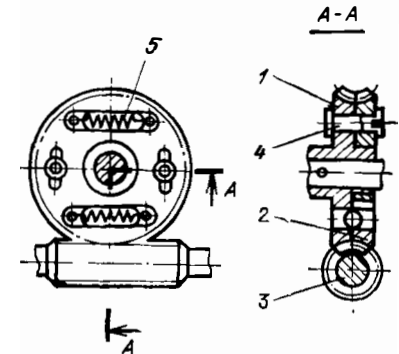


Рис. 4.7. Червячная передача с люфтовывбрающими червячными колесами

соединенных между собой заклепкой 4. Зазор между червяком 3 и колесами выбирают пружинной растяжения 5. При расчете на прочность ЧП рассчитываются зубья колеса, так как витки стального Ч всегда более прочные.

Расчет ЧП, состоящей из стального червяка и бронзового колеса, на изгиб зубьев ведут по формулам:

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{0,68 M_{\text{к2}} K_{\text{к}} K_{\text{д}} \cos \lambda}{m d_1 d_2 y} \leq [\sigma]_{\text{н}}$$

$$m = \sqrt[3]{\frac{0,68 M_{\text{к2}} K_{\text{к}} K_{\text{д}}}{z_2 q y [\sigma]_{\text{н}}}}$$

где y выбирают по эквивалентному числу зубьев $z_0 = z_2 / \cos^3 \lambda$; $K_{\text{к}} = 1$; $K_{\text{д}} = 1 \dots 1,1$ при $v_2 < 3$ м/с; $K_{\text{д}} = 1,1 \dots 1,2$ при $v_2 > 3$ м/с.

Контактную прочность рассчитывают по формуле

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{1500}{d_2} \sqrt{\frac{M_{\text{к2}} K_{\text{к}} K_{\text{д}}}{d_1}} \leq [\sigma]_{\text{к}}$$

При проектном расчете обычно определяют

$$a = \left(\frac{z_2}{q} + 1 \right) \times$$

$$\times \sqrt[3]{(540 q / z_2 [\sigma]_{\text{н}})^2 M_{\text{к2}} K_{\text{к}} K_{\text{д}}}, \text{ мм.}$$

Допуски ЧП регламентируются при $m < 1$ мм СТ СЭВ 1913—79 и при $m \geq 1$ мм СТ СЭВ 311—76.

4.4. ПЛАНЕТАРНЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Планетарные механизмы. Служат для передачи вращательного движения цилиндрическими или коническими ЗК, в состав которых входят сателлиты (колеса, совершающие сложное движение и имеющие подвижную ось вращения). Подвижное звено, на котором укреплены оси сателлитов, называется водилом. Сателлиты находятся обычно в зацеплении с центральными колесами, вращающимися вокруг оси МХ или закрепленным неподвижно. Ведущий и рабочий (выходной) валы расположены соосно. Размеры и массы ПМ меньше, чем у зубчатых редукторов с неподвижными осями. В зависимости от схемы ПМ могут осуществлять передаточное отношение 3...10 000. Передаточные отношения обозначают

буквой i с двойным индексом внизу, указывающим отношение угловых скоростей рассматриваемых звеньев, и с индексом сверху, указывающим, какое звено механизма принято за неподвижное. Если направления вращения ведущего и ведомого звеньев одинаковы, то i считается положительным, если различны — отрицательным. На рис. 4.8

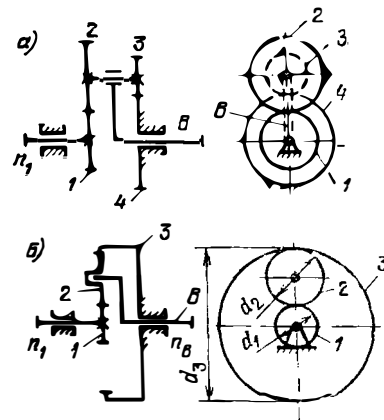


Рис. 4.8. Схемы планетарных механизмов

изображены схемы ПМ с цилиндрическими ЗК с внешним и внутренним зацеплениями. В передаче с внешним зацеплением (см. рис. 4.8а), состоящей из неподвижного центрального колеса 4, водила В, сателлитов 2 и 3, подвижного центрального колеса 1, при вращении водила сателлит 3 вращается относительно своей оси и одновременно обкатывается вокруг колеса 4. При этом ЗК 2, жестко соединенное с сателлитом 3, передает вращательное движение на подвижное колесо 1. Для такой передачи $i_{14}^{(4)} = n_B / n_1 = [1 - (z_2 z_4 / z_1 z_3)]^{-1}$. Условие соосности $z_1 + z_2 = z_3 + z_4$.

В ПМ с внутренним зацеплением (см. рис. 4.8б) при вращении водила В ЗК 2 будет обкатываться по внутреннему ЗК 3 и одновременно вращать ЗК 1. Для этой схемы $i_{14}^{(4)} = 1 + z_3 / z_1$ (обычно $i_{14} = 3 \dots 8$). Условие соосности $z_3 = z_1 + 2z_2$. При заданных M_B или M_1 , i и η статический момент M_B на ведущем валу ПМ для схемы рис. 4.8а $M_B = M_1 / i^{(4)}_{14} \eta$; для схемы рис. 4.8б $M_1 = M_B / i^{(3)}_{14} \eta$.

Дифференциальные механизмы. Применяются для алгебраического

суммирования угловых или линейных перемещений элементов кинематической цепи. Наибольшее распространение имеют зубчатые ДМХ, составленные из конических или цилиндрических колес (рис. 4.9). Они имеют

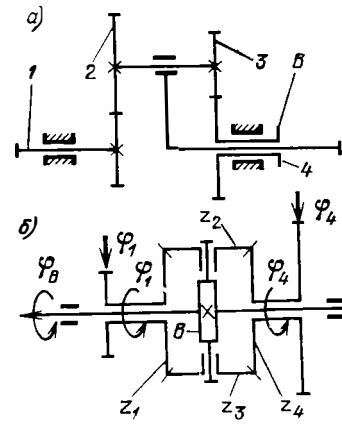


Рис. 4.9. Схемы дифференциальных механизмов

две степени свободы и отличаются от ПМ тем, что у них вращаются не одно, а оба центральных ЗК. Для ДМХ $i_{14}^{(B)} = \frac{n_1 - n_B}{n_4 - n_B} = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} (-1)^u$, где u — число внешних зацеплений. Пользуясь этой зависимостью при заданных частотах вращения любых двух ведущих валов, можно определить частоту вращения третьего ведомого вала. На рис. 4.9б показана схема конического ДМХ, состоящего из водила В, двух центральных колес z_1 и z_4 , двух сателлитов z_2 и z_3 и стойки. Углы поворота связаны зависимостью: $\varphi_B = 0,5(\varphi_1 + \varphi_4)$. При заданных φ_B и φ_1 или φ_B и φ_4 получим $\varphi_4 = 2\varphi_B - \varphi_1$ или $\varphi_1 = 2\varphi_B - \varphi_4$.

Волновая зубчатая передача (ВЗП). Вращение в ней передается и преобразуется циклическим возбуждением волн деформации в гибком элементе. Наиболее распространенная ВЗП (являющаяся разновидностью планетарного механизма) работает по принципу передачи вращательного движения вследствие бегущей волновой деформации одного из колес. В отличие от всех видов зубчатых передач ВЗП дает возможность получения больших i при значительно меньших массах и габаритах, высо-

ком КПД и имеет высокую точность и плавность. Кроме того, ВЗП позволяют передавать механическое движение в герметическое пространство. Для одноступенчатых ВЗП $i = 50 \dots 250$, для двухступенчатых $i = 2000 \dots 50000$. Мощность ВЗП колеблется от 0,02 до 3000 кВт, а КПД — от 0,9 до 0,7. ВЗП применяются в механизмах систем дистанционного управления, настройки РЭА, в ЛПМ, автоматических записывающих приборах и др.

Волновая зубчатая передача (рис. 4.10а) состоит из следующих основных звеньев: генератора Н, жесткого ЗК Ж, гибкого ЗК Г. Одно из этих колес прикрепляется к корпусу механизма, а другое к выходному

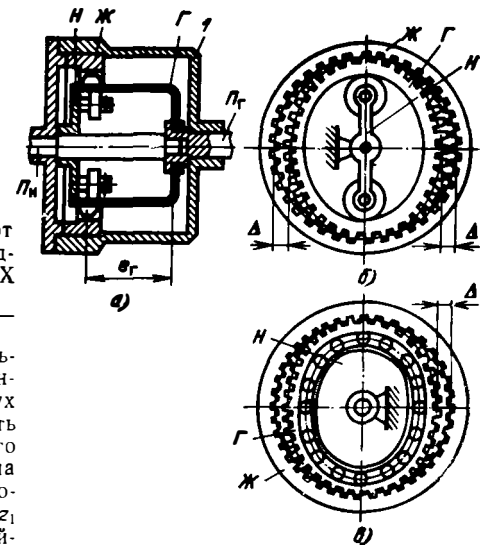


Рис. 4.10. Схемы волновых зубчатых передач

валу. Гибкое колесо имеет форму тонкостенного цилиндра, длину которого обычно делают не меньше диаметра. Генератор волн представляет собой водило с роликами (рис. 4.10б) или кулачок (рис. 4.10в). При вращении генератора волн образуются бегущие по окружности волны деформации гибкого колеса и последовательно вводятся в полное зацепление разные зубья гибкого и жесткого колес. Колеса имеют разные числа зубьев, поэтому происходит их относительное вращение. Число волн де-

формации равно числу выступов кулачка.

У двухволновых генераторов свободной деформации гибкого звена на водиле закрепляются две оси с роликами (см. рис. 4.10,б). Генераторы волн принудительной деформации имеют форму кулачка определенного профиля (см. рис. 4.10,а). Они применяются с целью рационального распределения напряжения в материале гибкого звена и улучшения условий зацепления зубьев. Для уменьшения потерь на трение между кулачком и гибким колесом располагаются шарики.

Основные параметры ВЗП: n_n , $n_{ж}$, n_r — частоты вращения соответственно водила, жесткого и гибкого колес; $i_{ГНЖ}$ или $i_{ЖГ}$ — передаточное отношение от генератора волн к выходному валу, на котором закреплено жесткое или гибкое колесо (верхний индекс обозначает неподвижное колесо передачи); z_r , $z_{ж}$ — числа зубьев гибкого и жесткого колес; u_v — число волн генератора; m — модуль и p — шаг зацепления колес; $d_r = mz_r$, $d_{ж} = mz_{ж}$ — делительные диаметры гибкого и жесткого колес; $q = (z_{ж} - z_r)$ — разность зубьев колес, которая должна быть равна или кратна u_v (обычно $q = u_v$, реже $q = 2u_v$).

Для ВЗП с вращающимся гибким колесом $i_{НГ}^{Ж} = -z_r / (z_{ж} - z_r)$; $i_{НЖ}^{Г} = z_{ж} / (z_{ж} - z_r)$ — с вращающимся жестким колесом.

Гибкие колеса ВЗП обычно изготавливают из металла с высоким пределом выносливости или из различных пластмасс, получаемых литьем под давлением. При $i_{НГ}^{Ж} \geq 50$, $q = 2$ и $m = 0,8 \dots 0,3$ мм для гибких колес из стали 40ХН и 37ХН3А или ШХ15 принимают толщину стенки колеса $\delta = (0,7 \dots 1,5)m$. Для колес из пластмасс — полиформальдегида или капрлона — принимают $\delta \approx (2 \dots 4)m$. При заданном $i_{НГ}^{Ж}$ величины d_r и m определяют в зависимости от величины деформации гибкого колеса.

При $q = 2$ и $\Delta = 2m$ $i_{НГ}^{Ж} = -d_r / qm$. Задавая d_r , находят $m = d_r / i_{НГ}^{Ж}$ или, задавая m , находят $d_r = i_{НГ}^{Ж} qm$. При $n_r = 0$ $z_{ж} = q i_{НЖ}^{Г}$, $z_r = z_{ж} - q$, $m = d_r / z_r$.

Зубья колес ВЗП испытывают наибольшие напряжения, так как нагрузка распределяется на большое число зубьев, одновременно находясь в зацеплении. Наиболее напряженной деталью ВЗП является гибкое колесо, тонкая стенка которого испытывает напряжения изгиба σ_n и кручения τ :

$$\sigma_n = 1,97 \Delta \delta E / r_{cp}^2 \leq [\sigma]_{-1};$$

$$\delta \leq r_{cp}^2 [\sigma]_{-1} / 1,97 \Delta E$$

(здесь E — модуль упругости материала, МПа; r_{cp} — средний радиус тонкой стенки гибкого колеса; $[\sigma]_{-1}$ — допускаемое напряжение на изгиб; размеры Δ ; δ и r_{cp} в миллиметрах);

$$\tau_{max} = \tau_{кр} / n_{\tau}; \quad \tau_{кр} = [5 +$$

$$+ \sqrt{9,4 + 0,67 (L^2 / r_{cp} \delta)^{1,5}}] E (L / \delta)^2.$$

(здесь $\tau_{кр}$ — критическое касательное напряжение, при котором тонкий цилиндр теряет устойчивость; $n_{\tau} = 2 \dots 3$ — коэффициент запаса устойчивости; $L = d_r$ [10]).

4.5. ВИНТОВЫЕ ПЕРЕДАЧИ

В винтовых механизмах РЭА используется трапецидальная резьба $\beta = 15^\circ$ (рис. 4.11,а) и треугольная метрическая $\beta = 30^\circ$ (рис. 4.11,б). Кинематические зависимости передачи

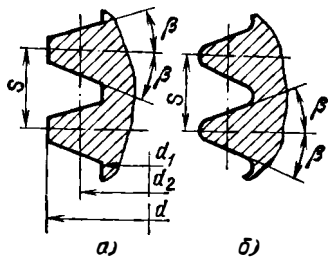


Рис. 4.11. Типы резьб винтовых механизмов

винт — гайка определяются стандартными параметрами резьбы: d , d_1 и d_2 — наружным, внутренним и средним диаметрами; 2β — углом профиля резьбы; s — шагом; z — числом заходов; $\rho_x = zs$ — ходом винтовой линии и ее направлением (правым или левым).

Размеры резьбы определяются для трапецидальной по СТ СЭВ 146—75 и 639—77, для метрической по СТ СЭВ 180—75 и 182—75.

Винтовые механизмы позволяют простыми средствами преобразовать вращательное движение в поступательное с большим i , благодаря чему малым вращающим моментом можно создать очень большую осевую силу. Однако ВМ имеют недостаточно высокий КПД. На практике применяются следующие типы ВМ (рис. 4.12):

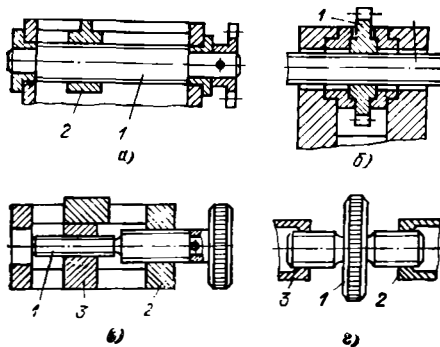


Рис. 4.12. Конструкции винтовых механизмов

а) при вращении винта 1 гайка 2 перемещается на расстояние $l = \rho_x \varphi / 2\pi$ (φ — угол поворота винта);

б) при вращении гайки 1 винт 2 перемещается на расстояние $l = \rho_x \varphi / 2\pi$ (φ — угол поворота гайки);

в) при вращении дифференциального винта 1, имеющего две правые (или левые) резьбы с различными шагами (ρ_x и ρ'_x) гайки 2 и 3 сближаются (или удаляются) на расстояние $l = (\rho_x - \rho'_x) \varphi / 2\pi$, что позволяет получить очень малые перемещения за один оборот винта;

г) при вращении винта 1, имеющего левую и правую резьбу, гайки 2 и 3 сближаются (или удаляются) на расстояние $l = (\rho_x + \rho'_x) \varphi / 2\pi$, что позволяет получать большие перемещения гаек за один оборот винта.

В ВМ РЭА гайки изготавливают из бронзы БрАЖ9—4, БрОФ10—1 или БрОЦС6—6—3, а винты — из стали 40, 45, 50, 40Х, У10А, 4Х13, 30ХГСА и др.

При проектировании ВМ целесообразно для уменьшения сил трения и

перекосов ось винта располагать как можно ближе к оси симметрии направляющих; фиксировать винт от осевых перемещений на одной из опор, при этом для регулировки осевого зазора при сборке ставится установочное кольцо, которое закрепляется на винте штифтом.

Для уменьшения ошибки МРХ применяются гайки, конструкция которых позволяет регулировать осевой зазор между витками винта и гайки при сборке (рис. 4.13,а). Устранить МРХ можно посредством пружинного устройства (рис. 4.13,б).

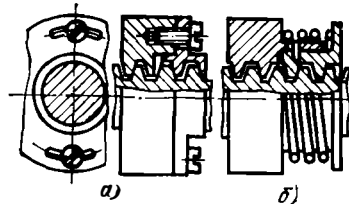


Рис. 4.13. Конструкции винтовых механизмов, уменьшающих мертвый ход

4.6. ФРИКЦИОННЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Движение в них передается или преобразовывается с помощью сил трения. Они применяются для передачи движения между валами с параллельными (рис. 4.14,а,в) и пересекающимися осями или преобразования вращательного движения в поступательное, и наоборот (рис. 4.14,б). Фрикционные передачи выполняются с жесткими (рис. 4.14,а,б) рабочими телами и с гибкой связью (ГС) (рис. 4.14,в).

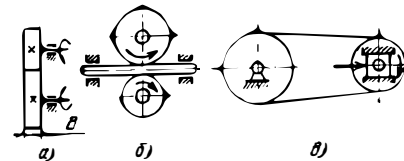


Рис. 4.14. Схемы фрикционных передач

Передачи роликами. Это ФП с непосредственным контактом рабочих тел. К их достоинствам относятся: простота конструкции; плавность и бесшумность хода при высоких скоростях; проскальзывание при перегрузках; возможность бесступенчатого

регулирования частоты вращения. Недостатки: большие нагрузки на валы и опоры; прокаливание при колебательных нагрузках; сравнительно быстрый и неравномерный износ деталей; большие габариты и масса при передаче значительных крутящих моментов с малой скоростью.

В быстроходных передачах для уменьшения износа и нагрева металлических роликов применяется смазка. При этом коэффициент трения f уменьшается и необходимая сила прижатия Q должна быть увеличена.

Фрикционные передачи применяют обычно для передачи небольшой мощности, при этом $i < 7$ в обычных передачах; $i < 15$ в передачах с разгруженными валами и $i < 25$ в ручных передачах приборов [4]. Диапазоны регулирования бесступенчатых ФП $\omega_{2max}/\omega_{2min} = 4 \dots 9$. Нормальная работа обеспечивается при соблюдении условия: $F > P$, где F — сила трения, а P — окружная сила, действующая на ведущий ролик

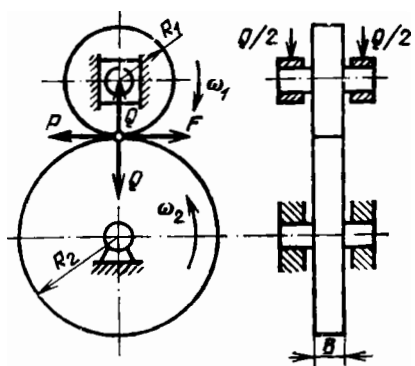


Рис. 4.15. Схема фрикционной передачи с роликами

(рис. 4.15); $F = Qf$; $P = CM_2/R_2$, где C — коэффициент надежности работы передач (для силовых передач $C = 1,2 \dots 1,5$; для приборных — $2 \dots 3$), необходимая сила прижатия роликов $Q > CM_2/iR_2$. Ширина роликов $B \geq 0,175QE/\rho[\sigma]^2_k$, где $E = 2E_1E_2/(E_1+E_2)$ — приведенный модуль упругости, МПа; E_1 и E_2 — модуль упругости материалов роликов; $\rho = R_1R_2/(R_1+R_2)$ — приведенный радиус кривизны роликов в зоне контакта; $[\sigma]_k$ — допускаемое контактное напряжение смятия для более

слабого из контактирующих материалов, МПа. Для закаленной стали $[\sigma]_k = 800$ МПа, для незакаленной стали $[\sigma]_k = 500$ МПа, для текстолита $[\sigma]_k = 110$ МПа. С учетом упругого скольжения $i_{12} = \omega_1/\omega_2 = a(R_2/R_1)$, где $a = 1 - v_2/v_1 = 1,002 \dots 1,03$. В большинстве конструкций ФП необходима осевая сила прижатия P осуществляется пружиной.

Форму тел качения выбирают из условия уменьшения или устранения скольжения, зависящего от разности линейных скоростей соприкасающихся поверхностей. Пары качения изготавливают из закаленных до высокой твердости сталей для ФП, преимущественно работающих в масле; из стали и пластмассы — для ФП, работающих всухую.

Целесообразно рабочие поверхности ведомых роликов изготавливать из более износостойкого материала. В тихоходных и мало нагруженных ФП один из роликов футеруют резиной или кожей. ФП широко используется в лентопротяжных и шкально-верньерных МХ, счетно-решающих устройствах и других МХ РЭА.

Передачи гибкой связью (ГС). Применяются для передачи вращения между валом при больших межосевых расстояниях и для преобразования вращательного движения в прямолинейное, и наоборот. Достоинства: простота конструкции и дешевизна, возможность передачи движения на большие расстояния с различными преобразованиями. Недостатки — ограниченный диапазон перемещения рабочих органов, невысокая нагрузочная способность и чувствительность к резким колебаниям нагрузки.

Различают передачи с непосредственными соединениями, когда ГС закреплена каким-либо способом на барабанах, и передачи фрикционным сцеплением. В качестве материала для гибких связей применяются гибкие троски (стальные диаметром $d = 0,6 \dots 1,02$ мм; капроновые — $d = 0,3 \dots 0,8$ мм и специальные для радиоприемников — $d = 0,8$ и $1,3$ мм) и гибкие стальные ленты, для которых применяются высокоуглеродистые и пружинные стали, толщиной 0,1; 0,12; 0,15; 0,18; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,3 и шириной 4...30 мм. Предел прочности при растяжении таких лент 735...1175 МПа, а относительное удлинение 1...8%.

На рис. 4.16 приведены схемы пе-

редач ГС. Для передач, преобразующей линейное перемещение ГС в вращательное движение ролика 1 (рис. 4.16,а), уравнение движения имеет вид: $\varphi_1 = (180/\pi)(2l/d+h)$, где φ_1 — угол поворота ролика; l — по-

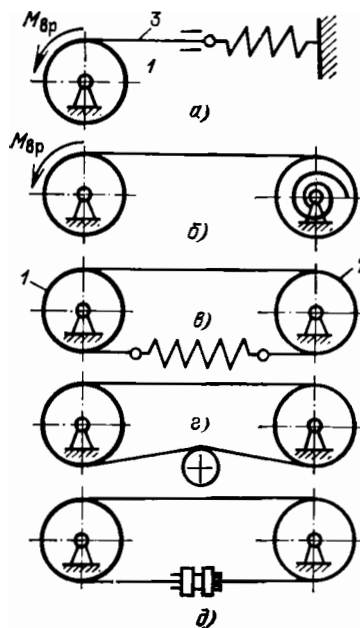


Рис. 4.16. Схемы передач гибкой связью

ступательное перемещение ГС; d — диаметр ролика; h — толщина ленты или диаметр тросика. Для передач (рис. 4.16, в): $\varphi_2 = \varphi_1(d_1+h)/(d_2+h)$. Передачи ГС могут работать как на ускоренно, так и на замедленно с i до 3:1 или 1:3. Необходимым условием работы передачи ГС является силовое или кинематическое замыкание передачи. Силовое замыкание передач с одной ветвью чаще всего осуществляется с помощью ПР, связанных с ведомым звеном (рис. 4.16, а, б). В кинематически замкнутых передачах натяжение ГС обычно производится ПР (рис. 4.16, в), натяжным роликом (рис. 4.16, г) или внешней стяжкой (рис. 4.16, д).

Шкивы и ролики для передач с гибкими тросиками выполняются с одной круговой или несколькими спиральными канавками. Профиль канавки для увеличения трения обычно делают клиновидным (рис. 4.17, а).

Крепление тросиков на шкивах показано на рис. 4.17, в, г. Ролики для передач с гибкой лентой выполняют с прямоугольной канавкой (рис. 4.17, б); крепление гибкой ленты показано на рис. 4.17, д.

Величина силы трения гибкой нити о неподвижный цилиндр (рис. 4.18) $F = S_1 - S_2 = (e^{\alpha} - 1)S_1$, где α — угол обхвата цилиндра гибкой нитью.

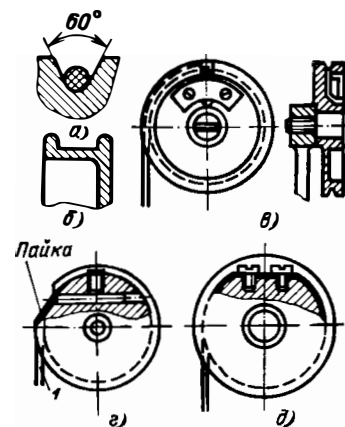


Рис. 4.17. Способы крепления гибких связей

Значение F сильно зависит от f и α . Например, при $f = 0,25$ и $\alpha = 8\pi$ силой $S_2 = 100$ Н можно уравновесить на сбегающей ветви нити силу $S_1 = 5300$ Н. Гибкая связь может пе-

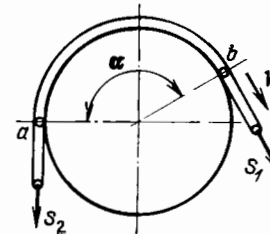


Рис. 4.18. К определению сил при гибкой связи

редавать шкиву с радиусом R вращающий момент $M < FR = RS_2(\alpha - 1)$. Если момент сопротивления вращению шкива будет больше чем FR , то гибкая нить будет скользить по шкиву и таким образом может предохранить МХ от перегрузки и поломки.

4.7. КУЛАЧКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Предназначаются для воспроизведения заданного закона движения рабочих звеньев или для сообщения им требуемых перемещений с остановками заданной продолжительности. КМ состоит из трех звеньев: 1 — ведущего кулачка, 2 — рабочего (ведомого) толкателя (коромысла) и 3 — стойки (рис. 4.19, а, б). Величина перемещений (S или a) и закон движения рабочего звена КМ определяются профилем кулачка. Профиль кулачка характеризуют (рис. 4.19, а):

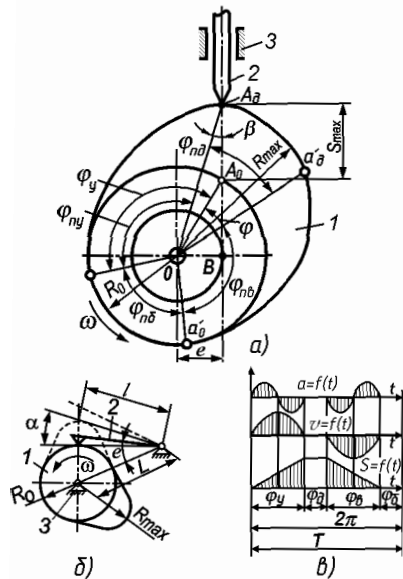


Рис. 4.19. Фазы движения толкателя кулачкового механизма

R_0 — наименьший радиус; R_{max} — наибольший радиус; $\varphi_{н.у}$ — угол профиля удаления; $\varphi_{н.д}$ — угол профиля дальнего стояния; $\varphi_{в.в}$ — угол профиля возвращения и $\varphi_{в.б}$ — угол профиля ближнего стояния. Эти углы называются рабочими углами кулачка. Очевидно, что $\varphi_{н.у} + \varphi_{н.д} + \varphi_{в.в} + \varphi_{в.б} = 2\pi$. Относительное движение рабочего звена КМ и кулачка определяется кинематическими (фазовыми) углами: $\varphi_y = \varphi_{н.у} + \varphi_e$ — углом удаления; $\varphi_d = \varphi_{н.д}$ — углом дальнего стояния; $\varphi_b = \varphi_{в.в} - \varphi_e$ — углом возвращения и $\varphi_6 = \varphi_{в.б}$ — углом ближнего стояния. При смещении толкателя $e=0$ угол смещения $\varphi_e =$

$=0$. Перемещение толкателя за период полного оборота кулачка ($\varphi = 2\pi$) обычно изображается в виде графика $S=f(t)$ (рис. 4.19, б). Путем графического дифференцирования $S=f(t)$ находятся $v=f'(t)$ и $a=f''(t)$.

Распространенные типы КМ показаны на рис. 4.20. Все КМ делятся на плоские (рис. 4.20, а—в) и пространственные (рис. 4.20, г). Применяются КМ с конусным (рис. 4.20, б),

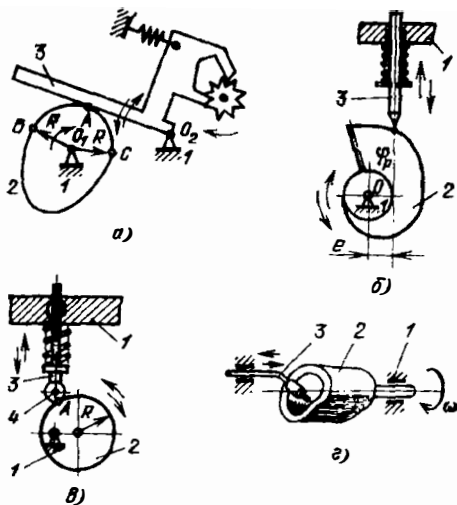


Рис. 4.20. Конструктивные схемы кулачковых механизмов

плоским (рис. 4.20, а) и роликовым (рис. 4.20, в) толкателями. Силовое замыкание открытых кинематических пар кулачок — толкатель обычно осуществляется ПР, а геометрическое — соответствующей формой кулачка и толкателя. Выбор типа КМ производится в зависимости от характера движения ведущего звена и требуемого движения ведомого звена, взаимного расположения траекторий точек этих звеньев, скоростей их движения, условий работы.

Закон движения рабочего звена должен обеспечивать выполнение заданных функций при наиболее благоприятных условиях работы МХ. Закон движения с постоянным ускорением (рис. 4.21, б) характеризуется тем, что во время первой половины фазы толкатель движется равноускоренно, а во время второй — равнозамедленно, при этом на границах фаз (при $t=0$; $t=T_\Phi/2$ и $t=T_\Phi$) ус-

корение мгновенно меняет свой знак, т. е. движение толкателя сопровождается мягким ударом. Поэтому этот закон движения применяется для механизмов со средней скоростью.

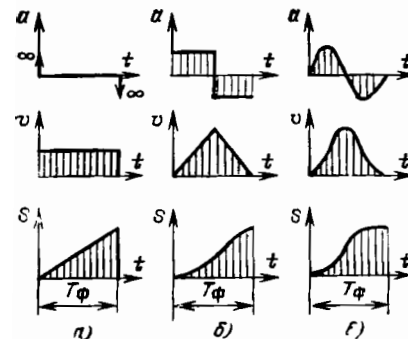


Рис. 4.21. Типовые законы движения рабочего звена кулачкового механизма

Закон движения с ускорением, изменяющимся по синусоиде (рис. 4.21, в), характеризуется тем, что во время движения толкателя отсутствуют резкие изменения ускорений и скоростей, что обеспечивает плавную, безударную работу механизма. Поэтому такой закон движения применяется для механизма с большой скоростью толкателя или коромысла.

Закон движения с постоянной скоростью (рис. 4.21, а) характеризуется тем, что в течение времени всей фазы $v = \text{const}$, а на границах фазы (при $t=0$ и $t=T_\Phi$) v мгновенно изменяет свое значение, т. е. движение толкателя сопровождается жестким ударом. Такой закон движения применяется только в тихоходных МХ.

Проектирование кулачковых механизмов. В работе КМ важную роль играет угол давления γ , находящийся между направлением действия силы нормального давления на кулачок ролика и линией действия скорости толкателя v_t (рис. 4.22):

$$\gamma = \arctg \left\{ \left[(v_t/\omega) \pm e \right] / (R_0 \cos \varphi + S_x) \right\}.$$

Здесь знак « \pm » принимается при смещении e в противоположную сторону от ω , а « $+$ » — при смещении e в другую сторону; S_x — ход толкателя. Для кулачкового механизма с коромыслом (рис. 4.19, б):

$$\gamma = \arctg \frac{[v_t/\omega + l - L \cos(\alpha + \theta)]}{L \sin(\alpha + \theta)},$$

где l — длина коромысла; L — расстояние от центра вращения кулачка до стойки коромысла.

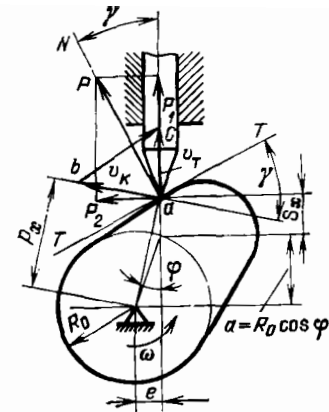


Рис. 4.22. К определению угла давления кулачкового механизма

Полученные выражения используют при проектировании КМ для определения R_0 , e , L и l . При этом принимают: для КМ с толкателем-стержнем $\gamma_{max} \leq \pi/6$, для КМ с вращающимся толкателем-коромыслом $\gamma_{max} \leq \pi/4$.

При проектировании КМ должны быть заданы или заранее выбраны: а) тип КМ; б) угловая скорость кулачка ω ; в) наибольшее перемещение толкателя S_{max} ; г) циклограмма работы $\Phi = \varphi_y + \varphi_d + \varphi_b + \varphi_6$; д) углы давления γ_y и γ_b ; е) закон движения толкателя.

Для определения основных размеров КМ по формулам для углов давления проще всего воспользоваться графическим решением этих уравнений [5]. Для этого выполняют построения, приведенные на рис. 4.23. Для определения R_0 и e кулачкового механизма с толкателем-стержнем полагают, что $\omega = \text{const}$ и направляют против часовой стрелки. По вертикальной оси откладывают перемещения различных точек, по горизонтальной — отношения v/ω в этих точках, которые определяют, используя график скорости $v=f(t)$. Построение производится в масштабе $K_S = S_{max}/S'_{max}$, где S'_{max} — наибольшее значение размера на графике, мм.

Концы отрезков v/ω соединяют плавной кривой. Проводят касатель-

ные $T_y - T_y$ и $T_b - T_b$, составляющие с направленным движением толкателя $S_0 - S_y$ заданные углы давления $\gamma_{y \max} = \gamma_{b \max}$. Тогда пересечения касательных осей соответствуют положению центра кулачка, а расстояние R_0 — наименьшему радиусу теоретического профиля кулачка при отрицательном смещении e . При этом все размеры получаются в масштабе K_s .

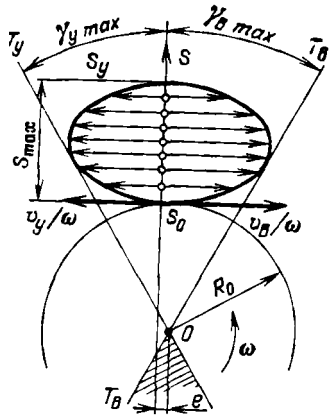


Рис. 4.23. К определению основных размеров кулачкового механизма

Для того чтобы γ_{\max} не превышал заданного значения, необходимо центр вращения кулачка расположить в заштрихованной зоне. Следовательно, при уменьшении γ размеры КМ увеличиваются. Графическое решение уравнения для КМ с коромыслом производится аналогично.

В процессе проектирования КМ всегда приходится строить профиль кулачка по заданному движению рабочего звена. Построение может быть выполнено графическим или более точным аналитическим методом. Для КМ РЭА, не имеющих больших движущих масс, скоростей и ускорений, точность графического решения вполне допустима. Методика построения профиля кулачка при известных R_0 , e и законе перемещения толкателя $S=f(\varphi)$ состоит в следующем (рис. 4.24) [6]. Выбирается центр кулачка O и на расстоянии, равном величине e , проводится ось толкателя yy . Из центра O радиусом R_0 делается засечка на ось yy ; получается точка B_0 — нижнее положение толкателя. На оси толкателя на-

мечаются точки B_1, B_2, \dots, B_7 , расстояния от которых до точки B_0 соответствуют значениям перемещений толкателя $S_1; S_2; S_3, \dots, S_7$ при углах поворота кулачка $\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3, \dots, \varphi_7$. Делая засечки радиусами $OB_1,$

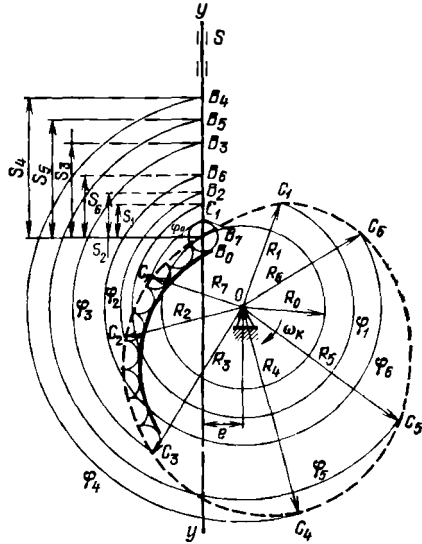


Рис. 4.24. Построение профиля кулачка

OB_2, \dots, OB_7 и проводя из точки O прямые, соответствующие углам поворота $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_7$, в местах пересечения засечек с прямыми получаем точки профиля кулачка C_1, C_2, \dots, C_7 . Соединив эти точки (пунктирная линия), получают теоретический профиль кулачка.

Построив эквидистантную кривую, отстоящую от теоретического профиля на расстоянии $r_{р.л.}$, получим действительный профиль кулачка. При этом радиус ролика $r_{р.л.} < 0,8R_k$, где R_k — наименьший внутренний радиус закругления кулачка. Для исключения заклинивания следует проверить условие $\gamma < \gamma_{\max}$.

При конструировании КМ для уменьшения трения и износа кулачка применяются толкатели с роликами (РЛ). Лучшей следует считать конструкцию РЛ со сферическим самоустанавливающимся шарикоподшипником, обеспечивающим полный контакт РЛ с кулачком. Толкатели с точечным контактом используются в точных механизмах при низких ско-

ростях и малых давлениях на толкателе.

При больших ускорениях и угловых скоростях для предотвращения отрыва толкателя от кулачка требуются сильные пружины, увеличивающие износ кулачков и толкателей. В связи с этим целесообразно применять геометрическое замыкание пары кулачок — толкатель, устраняющее Пр.

Быстроходные кулачки изготавливают из стали 20 или 20Х, цементуют и закалывают до HRC 56...62. Иногда применяют стали 45 и 40Х, а при больших удельных давлениях сталь ШХ12. Кулачки подвергают закалке и отпуску. Для уменьшения износа рабочие поверхности кулачка и толкателя шлифуют.

4.8. МЕХАНИЗМЫ ПРЕРЫВИСТОГО ДВИЖЕНИЯ

Служат для преобразования вращательного или колебательного непрерывного движения в движение вращательное или поступательное с периодическими остановками определенной продолжительности. Разновидностью таких механизмов являются мальтийские, которые применяются при средних и малых угловых скоростях ведущего звена.

Мальтийский механизм с внешним зацеплением (рис. 4.25,а) состоит из ведущего звена 1, представляющего

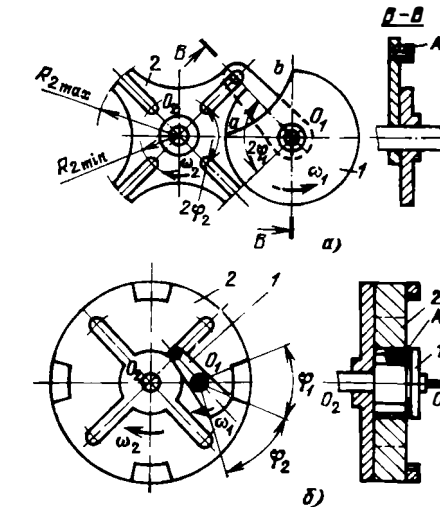


Рис. 4.25. Конструктивные схемы мальтийских механизмов

собой диск с вырезом ab , на котором крепится кривошип с пальцем A в виде ролика, и ведомого звена 2 — мальтийского креста с радиальными пазами. При вращении звена 1 его палец входит в паз креста и поворачивает его на угол $2\varphi_1 = 2\pi/z$, где z — число радиальных пазов. После выхода пальца из паза крест останавливается и его положение фиксируется диском ведущего звена. Выпуклая поверхность диска входит в соприкосновение с вогнутой поверхностью креста и препятствует повороту последнего до тех пор, пока палец A кривошипа не войдет в следующий паз креста. Крест и кривошип вращаются в противоположных направлениях. За один полный оборот кривошипа с одним пальцем крест делает $1/z$ оборота и остановку.

Мальтийский механизм с внутренним зацеплением (рис. 4.25,б) отличается от рассмотренного тем, что звенья 1 и 2 вращаются в одну сторону. Коэффициент полезного действия механизма 0,75...0,85; число пазов $z = 3 \dots 12$.

Период цикла движения $T = t_d + t_b = 60/n_1$, где t_d — время движения креста; t_b — время выстоя креста; n_1 — частота вращения кривошипа, мин⁻¹. Коэффициент движения механизма при внешнем зацеплении $K = t_d/T = (z-2)/2z$, при внутреннем $K = (z+2)/2z$. Закон движения креста $\omega_2 = f(\varphi_1)$ и $e_2 = f(\varphi_1)$ определяется по формулам для механизма с качающейся кулисой.

Для механизма с внешним зацеплением $\omega_{2\max} = \omega_1 R_1/R_{2\min} = \omega_1 i_{21\max} = \omega_1 \sin \varphi_2 / (1 - \sin \varphi_2)$.

Для механизма с внутренним зацеплением $\omega_{2\max} = \omega_1 R_1/R_{2\max} = \omega_1 \sin \varphi_2 / (1 + \sin \varphi_2)$.

Угловые ускорения креста в начальный и конечный моменты его движения в механизме с внешним зацеплением $e_{2\text{нач}} = e_{2\text{кон}} = \pm \omega_1^2 R_1/R_{2\max} = \pm \omega_1^2 \operatorname{tg} \varphi_2$.

Для уменьшения сил инерции масс, связанных с крестом, и динамических нагрузок на детали целесообразно увеличивать z , но при этом увеличивается K .

4.9. ВАЛЫ. ОСИ И НАПРАВЛЯЮЩИЕ (ОПОРЫ)

Общие сведения и классификация. По конструкции и форме валы (рис. 4.26) разделяются на прямые

(а), ступенчатые (б), карданные (в) и гибкие (г); оси — на прямые, ступенчатые и фланцевые.

Опорные части валов и осей называют цапфами, а детали опор, охватывающие цапфы, — подшипниками.

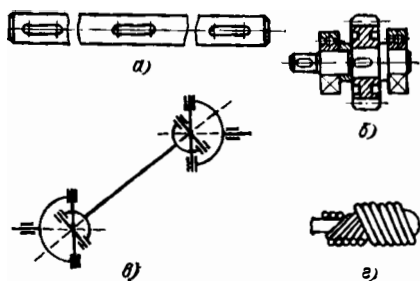


Рис. 4.26. Конструкции валов

При действии осевых нагрузок цапфы называют пятнами, а подшипники — подпятниками. Форма и размеры валов и осей определяются их назначением, расположением и способом крепления связанных с ними деталей.

По форме сечения валы (В) и оси (О) делятся на сплошные и полые. Полыми В и О делают для снижения массы, а также при необходимости пропускать через них другие В или провода. В МХ РЭА наиболее широко распространены прямые и ступенчатые В и О. Ступенчатая форма В и О удобна для монтажа на них вращающихся деталей, каждая из которых должна свободно проходить до места своей установки. Уступы на В должны быть достаточных размеров для восприятия осевых сил. Для уменьшения концентрации напряжений в местах перехода от одного участка В или О к другому разность между диаметрами ступеней должна быть минимальной. Однако не всегда возможно уменьшить концентрацию напряжений с помощью плавного переходного участка, так как для выхода шлифовального круга приходится предусматривать канавку. Торцы О и В и их ступеней выполняют с конусными фасками для обеспечения посадки деталей и снятия заусенцев. Соосность посадочных мест В обеспечивается указанным допуском по СТ СЭВ 636—76.

Опоры бывают с трением скольжения и трением качения, с упругими элементами, с газовой смазкой, в виде

прутных и магнитных подвесов. Различают торцевые (осевые) и радиально-упорные опоры, воспринимающие как радиальные, так и осевые силы.

Валы и оси. Основными материалами для валов и осей являются сталь Ст5 (без термообработки) и стали 40, 50, 40Х, У8А, У10А (термически обработанные). Валы, работающие при нагрузке с толчками, изготавливают из сталей 20 и 20Х, при этом цапфы В цементируют и закалывают.

Основными критериями работоспособности В и О являются прочность и жесткость.

Оси рассчитывают на прочность при изгибе по формуле $\sigma_{из} = M_{из}/0,1d^3 < [\sigma]_{из}$, где $\sigma_{из}$ — расчетные напряжения изгиба в опасном сечении оси, МПа; $M_{из}$ — изгибающий момент в опасном сечении, Н·мм; d — диаметр оси, мм; $[\sigma]_{из}$ — допускаемые напряжения на изгиб, МПа.

Для полых осей $\sigma_{из} = M_{из}/0,1d^3(1-c^4) < [\sigma]_{из}$, где $c = d_0/d = 0,6...0,7$ (d_0 — диаметр отверстия в полых осей, мм).

Валы рассчитывают на прочность при одновременном действии изгиба и кручения. Силы, действующие на В в разных плоскостях, раскладывают по двум взаимно перпендикулярным плоскостям и в них определяют опорные реакции и изгибающие моменты.

Суммарный изгибающий момент $M_{из} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$, где M_x и M_y — изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях в выбранном сечении вала.

Затем определяют наибольший приведенный момент: $M_{пр} = \sqrt{M_{из}^2 + 0,75M_k^2}$, где M_k — момент кручения, действующий на вал.

Тогда $\sigma_{из} = M_{пр}/0,1d^3 < [\sigma]_{из}$ или $d \geq \sqrt[3]{M_{пр}/0,1[\sigma]_{из}}$.

Оси не испытывают деформации кручения, следовательно, $d \geq \sqrt[3]{M_k/0,1[\sigma]_{из}}$.

Направляющие вращения с трением качения. По форме цапф подшипники скольжения (ПШС) делятся на цилиндрические, конические, шариковые и др. В механизмах РЭА в основном применяются цилиндрические и шариковые опоры. Опоры с цилиндрической рабочей поверхно-

стью (рис. 4.27, а—г) имеют большую площадь соприкосновения и надежно работают при значительных нагрузках и частотах вращения в условиях тряски и вибрации. Подшипники скольжения имеют момент трения больше, чем шариковые подшипники.

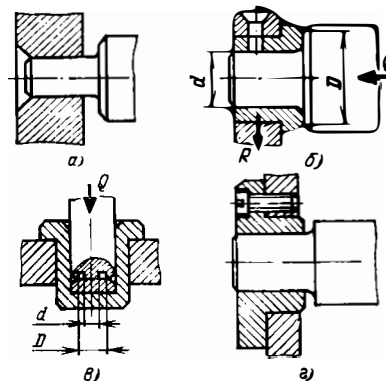


Рис. 4.27. Конструктивные схемы цилиндрических опор

Подшипники скольжения, воспринимающие только радиальную нагрузку, показаны на рис. 4.27, г, а радиальную и осевую — на рис. 4.27, б. Для уменьшения трения, износа и нагрева рабочие цапфы и ПШС должны иметь шероховатость поверхности $R_a = 0,63...0,16$ мкм и должны быть смазаны. Для ПШС применяются следующие материалы: при больших удельных давлениях и средних скоростях скольжения — бронзы Бр ОФ10-10, БР ОС10-10, Бр ОЦС6-6-3; при значительных удельных давлениях и малых скоростях — Бр АЖ9-4, Б-2 и латунь ЛС59-1. Для ПШС также применяют текстолит, волокнит, капрон и др.

Расчет ПШС, воспринимающих радиальную нагрузку R , выполняют по формулам: $P = R/dl < [P]$; $v = \pi dn/60 \cdot 1000$; $Pv < [Pv]$, где d и l — диаметр и длина рабочих поверхностей опоры, мм; n — частота вращения вала, мин⁻¹; $[P]$ — допускаемое удельное давление, МПа.

Расчет ПШС (рис. 4.27, б, в), воспринимающих осевую нагрузку Q : $P = 4Q/\pi(D^2 - d^2) \leq [P]$;

$v_{ср} = \pi(d + D)n/2 \cdot 60 \cdot 1000$;

$Pv_{ср} \leq [Pv]$.

Опоры с шаровой цапфой (рис. 4.28) обеспечивают точную центровку и позволяют осуществлять вращение с одновременным покачиванием оси относительно центра опоры. К их недостаткам относятся большие сопротивления и износ. Материал цапф: стали 45, 50, У10А, У12А; бронзы Бр АЖ9-4. Материал шарика — стали ШХ10 и ШХ15. Материал подшипника — бронзы Бр АЖ9-4; БрОФ10-1; Ст. 30.

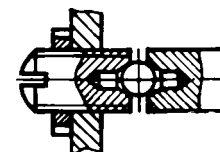


Рис. 4.28. Конструктивная схема шаровой опоры

Направляющие вращения с трением качения. Направляющие качения по сравнению с ПШС имеют малый момент трения и износ, меньшую чувствительность к изменению температуры окружающей среды, высокую точность вращения, нормально работают при тряске и вибрации. К недостатку подшипников качения следует отнести менее плавный и шумный ход, большой диаметр, недостаточную точность направления. По форме тел качения подшипники качения делятся на шариковые и роликовые. Различают два вида шарикоподшипников (ШПШ), применяемых в механизмах РЭА: 1) стандартные ШПШ, изготавливаемые специализированными заводами в соответствии с действующими стандартами; 2) специальные (насыпные) ШПШ, используемые тогда, когда нельзя применить стандартные подшипники.

Стандартные ШПШ по характеру воспринимаемой нагрузки делятся на одно- и двухрядные радиальные, радиально-упорные и упорные. Радиальные ШПШ воспринимают в основном нагрузку, перпендикулярную к вращающейся оси. Радиальные однорядные ШПШ (рис. 4.29, а) могут воспринимать осевую нагрузку одновременно в обе стороны (до 70% от неиспользованной допустимой радиальной нагрузки). Такие ПШ допускают перекося внутреннего кольца по отношению к наружному от 0,25 до 0,5°, имеют наименьшие потери на

трение по сравнению с другими типами ШПШ. Радиальные двухрядные самоустанавливающиеся ШПШ (рис. 4.29, б) кроме радиальной могут воспринимать небольшую осевую нагрузку (до 20% от неиспользованной

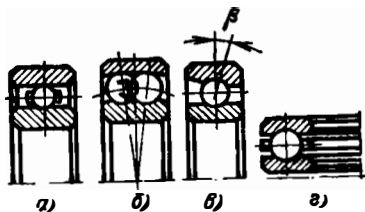


Рис. 4.29. Основные типы шаркоподшипников

радиальной нагрузки); работают при перекосах, достигающих до 2...3°. Радиально-упорные ШПШ (рис. 4.29, в) в зависимости от расчетного угла контакта β , величина которого бывает 12, 26 или 36°, кроме радиальной воспринимают осевую нагрузку (в одну сторону) до 70, 150 и 200% от неиспользованной допустимой радиальной нагрузки. Такие ШПШ допускают устранение люфтов в опорах. С увеличением угла β в них снижается быстроходность. Упорные ШПШ (рис. 4.29, г) применяют только тогда, когда для восприятия осевой нагрузки не могут быть использованы радиальные или радиально-упорные ШПШ.

Точность ШПШ зависит от точности выполнения размеров и отклонений формы и взаимного расположения поверхностей колец и шариков. ШПШ (согласно ГОСТ 520—71) выпускают пяти классов точности: 0; 6; 5; 4 и 2, которые даны в порядке повышения точности. В механизмах РЭА применяются ШПШ классов 0; 6 и реже 5. На рис. 4.30 показаны различные способы установки валов на ШПШ. Основной причиной выхода из строя ШПШ, работающих в

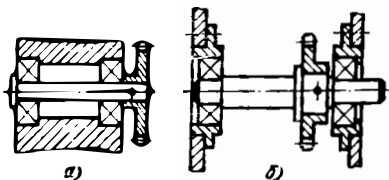


Рис. 4.30. Варианты фиксации шаркоподшипников на валу и в корпусе

нормальных условиях, является выкрашивание рабочих поверхностей колец и шариков. Методика подбора и проверки долговечности ШПШ изложена в ГОСТ 18854—82 и 18855—82. При выборе ШПШ с большим числом оборотов одним из основных критериев является долговечность их работы, характеризуемая коэффициентом работоспособности [5]:

$$C_p = R(nh)^{0.3} K_K K_B K_T,$$

где R — радиальная нагрузка, кгс; n — частота вращения, мин⁻¹; h — число часов работы ШПШ; K_K — коэффициент, учитывающий, какое кольцо ШПШ вращается (при включаемся во внутреннем кольце $K_K=1$, при наружном $K_K=1,2$); K_B и K_T — коэффициенты, учитывающие характер нагрузки и влияние температуры на долговечность ШПШ (при спокойной работе $K_B=1$; при нагружении с умеренными толчками $K_B=1,3 \dots 1,8$; при ударном нагружении $K_B=2 \dots 3$; при $t \leq 125^\circ\text{C}$ $K_T=1$; при $t=125 \dots 250^\circ\text{C}$ $K_T=1,05 \dots 1,4$). Значения C_p , K_K , K_B и K_T приведены в соответствующих каталогах и справочниках [5].

При действии на радиальные ШПШ радиальных и осевых нагрузок

$$C_p = (RK_K + mA) K_B K_T (nh)^{0.3},$$

где A — осевая нагрузка на ПШ, кгс; m — коэффициент приведения осевой нагрузки к эквивалентной радиальной.

Для радиально-упорных ШПШ

$$C_p = [RK_K + m(A-S)] K_B K_T (nh)^{0.3},$$

где S — осевая составляющая, равная $1,3R \operatorname{tg} \beta$.

Для упорных ШПШ

$$C_p = AK_B K_T (nh)^{0.3}.$$

При заданной h и известной n вычисляют расчетное значение C_p . Затем по C_p , предварительно выбрав внутренний диаметр ПШ d , подбирают по каталогу необходимый типоразмер ПШ из условия $C \geq C_p$.

Насыпные ШПШ применяются в тех случаях, когда под них отведено мало места или когда стандартные ШПШ не удовлетворяют каким-либо конструктивным требованиям. У таких ПШ сепаратор, внутреннее и наружное кольца отсутствуют, а поверхности качения выполняют непосредственно на оси и в корпусе механизма. Основные типы насыпных

ШПШ показаны на рис. 4.31, где два типа (а и г) выполнены непосредственно в корпусе механизма, а другие два (б и в) имеют специальные кольца, которые жестко крепятся к деталям механизма. При расчете

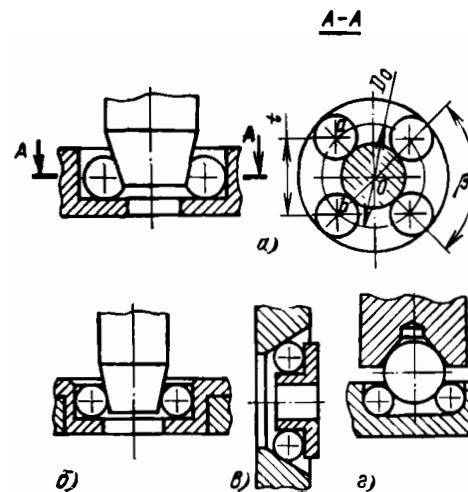


Рис. 4.31. Конструктивные схемы насыпных подшипников

геометрических размеров насыпных ШПШ задаются диаметром шариков d и числом их z .

Диаметр центров шариков из треугольника aOb (рис. 4.31, а)

$$D_0 = t / \sin(\beta/2) = t / \sin(180^\circ/z),$$

где t — шаг между шариками, который принимается равным (1,005... 1,01) d . В механизмах РЭА чаще всего применяются шарики следующих диаметров: 1,58; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6 и 8 мм.

Направляющие прямолинейного движения применяются в МХ в качестве опор деталей, имеющих возвратно-поступательное перемещение. Они классифицируются по характеру трения, форме рабочих поверхностей, характеру замыкания кинематической пары и по конструкции (рис. 4.32).

Различают направляющие с трением скольжения (рис. 4.32, а—г), с трением качения (рис. 4.32, е, ж) и с другими элементами (рис. 4.32, з). Конструктивно первые два вида направляющих выполняются с силовым замыканием (открытые) и с геометриче-

ским замыканием (закрытые). При этом направляющая может охватывать ползун или, наоборот, ползун может охватывать направляющую. Направляющие с трением качения выполняются с роликами и с шариками, а по форме рабочих поверхностей различают цилиндрические (рис. 4.32, а, в) и призматические (рис. 4.32, г, ж). Плавность и легкость движения ползуна (каретки) в них зависит от сил трения. В открытых направляющих сила трения меньше, чем в закрытых. Наибольшее трение в направляющих типа «ласточкин хвост». В направляющих с трением качения силы трения в 10—15 раз меньше, чем в направляющих с трением скольжения. Расчет рабочих поверхностей направляющих и ползуна ведется на ограничение удельного давления

$$p = N/S \leq [p].$$

Здесь N — нормальное давление на поверхность соприкосновения ползуна с направляющей; S — площадь этой поверхности; $[p]$ — допускаемое удельное давление.

Для ползуна и направляющей выбирается пара таких материалов, которые при высокой износостойкости имеют малый коэффициент трения

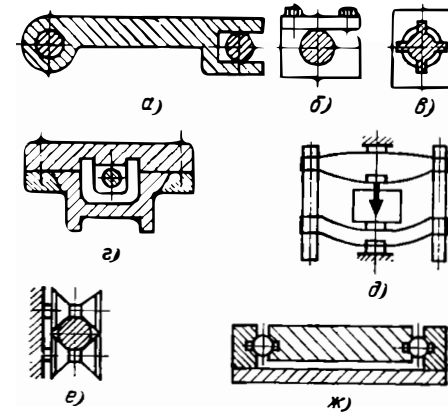


Рис. 4.32. Конструктивные схемы направляющих прямолинейного движения

скольжения. Материалом для направляющих обычно служат сталь 40, 50, У8А, а для ползуна — бронзы БрОЦС10-2, БрОФ10-1, латунь ЛС59-1, текстолит ПТК.

4.10. МУФТЫ

Назначение и классификация. Муфты предназначаются для соединения валов или других вращающихся деталей, для передачи крутящего момента. Они используются для передачи вращения от двигателя к механизму, его включению и выключению, переключения скоростей, предохранения от перегрузки и для выполнения других функций. По назначению, конструкции и условиям работы МФ делятся на постоянные (соединительные) и сцепные (управляемые и самоуправляющиеся). Конструкции и основные параметры многих МФ регламентируются ГОСТами и ОСТами.

При выборе конструкции МФ необходимо учитывать ее назначение, особенности компоновки и сборки МХ, величину и характер действия нагрузки и условия эксплуатации.

Постоянные соединительные муфты. Предназначаются для постоянного соединения вращающихся деталей. Делятся на две группы: глухие, жестко соединяющие валы, и подвижные, допускающие некоторую неточность сборки.

Для валов, передающих незначительные крутящие моменты, применяют глухую МФ, соединяемую коническими штифтами (рис. 4.33,а). Для передач значительных крутящих моментов применяют глухую со шпонками (рис. 4.33,б) или дисковую МФ (рис. 4.33,в). Для соединения втулки с валом в зависимости от погрешности соединяемых деталей применяют посадки с минимальным нулевым зазором типа H/h и переходные типы H/k по 7—8 квалитетам [7]. Штифты располагают под углом 90° друг к другу. Втулка может быть изготовлена из любых материалов. Ориентировочные размеры: $L = (3 \dots 5)d$; $D = 1,5d$; $d_{ш} = (0,25 \dots 0,3)d$. Втулку рассчитывают на кручение, а соединения штифтами или шпонками — на срез и смятие.

Недостатком этих МФ является

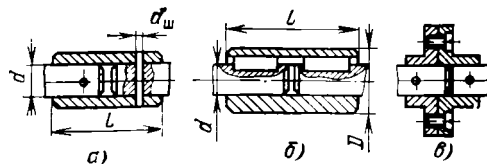


Рис. 4.33. Конструкции глухих муфт

требование строгой соосности соединяемых валов. Смещение и перекос валов вызывает дополнительные деформации изгиба и повышает давление на опоры.

Подвижные МФ разделяются на расширительные, допускающие осевое смещение вала; крестовые, допускающие радиальное смещение вала; поводковые; мембранные и упругие, допускающие осевое и радиальное смещение валов.

На рис. 4.34,а показана торцевая расширительная МФ, на 4.34,б — МФ с ведущим штифтом. Размеры МФ выбирают исходя из условий смятия соприкасающихся поверхностей. Обычно $l = d$, $\delta = (0,25 \dots 0,3)d$, $d_{ш} = (0,25 \dots 0,3)d_{в}$. Расширительные МФ применяют лишь при передаче небольших нагрузок и малых угловых скоростях ввиду интенсивного износа рабочих поверхностей.

Крестовые МФ (рис. 4.35) состоят из двух неподвижных фланцев с вырезами или выступами 1 и 2, закрепляемых на соединяемых валах. Между этими фланцами помещается подвижная часть МФ 3 с выступами или вырезами. Перпендикулярное рас-

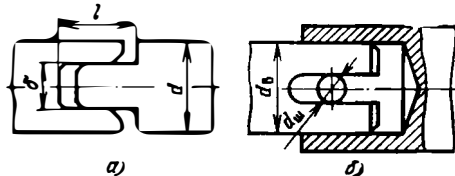


Рис. 4.34. Конструкции расширительных муфт

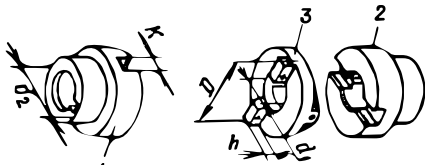


Рис. 4.35. Конструктивная схема крестовой муфты

положение пазов позволяет МФ компенсировать несоосность валов за счет скольжения выступов креста в пазах полумуфт. Для повышения КПД требуется смазка трущихся поверхностей и их точная приработка с шероховатостью по 9...12 классам и посадкой типа ходовой (H/f) по 6...7 квалитетам. Детали МФ изготавливаются обычно из стали. Выступы креста и пазы полумуфт центрируются. Если валы должны быть электрически изолированы друг от друга, то крестовину делают из электроизоляционного материала. В табл. 4.4 приведены основные размеры МФ.

Таблица 4.4

Рекомендуемые размеры, мм, крестовой муфты (рис. 4.35)

d_1	d_2	D	h	K
4	8	20	2	4
6	12	20	2	4
8	15	25	3	5
10	18	30	3	6

Недостатком крестовых МФ является увеличение мертвого хода по мере износа выступов. В тех случаях, когда мертвый ход (МРХ) недопустим, применяют беззазорные конструкции крестовых МФ с прижимным устройством.

Поводковые МФ (рис. 4.36) состоят из двух дисков со ступицами, жестко укрепленными на концах ва-

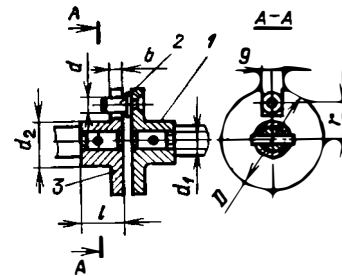


Рис. 4.36. Конструкция однопальцевой поводковой муфты

ликов. На диске 1 одной полумуфты закреплен палец 2, который входит со скользящей посадкой в радиаль-

ный паз второй полумуфты 3. Недостатком поводковых муфт является наличие МРХ за счет посадки пальца в пазу; величина МРХ увеличивается по мере износа трущихся поверхностей паза и пальца и определяется размером образующегося зазора. Для улучшения условий работы поводковой МФ предпочтительно применять поводки с двумя пальцами. В этом случае уменьшается износ трущихся частей МФ, а также устраняется радиальное давление на валок, наблюдаемое в однопальцевых поводках. Однако двупальцевые поводки сложнее в изготовлении и, кроме того, требуют полной соосности соединяемых валов, что затрудняет сборку механизма.

В табл. 4.5 приведены размеры однопальцевых поводковых МФ [8].

Таблица 4.5

Рекомендуемые размеры, мм, однопальцевой поводковой МФ (рис. 4.36)

d_1	b	d	d_2	r	D
4	2	3	10	10	25
5	2	3	11	12	30
6	2	4	12	12	32
8	3	4	15	14	38
10	3	5	18	14	40
12	3	5	20	16	45

Примечание: $l = (1,5 \dots 2)d_1$.

В точных передачах при малых угловых скоростях, где не допускается наличие МРХ, применяются различные поводковые муфты, в которых МРХ выбирают плоской или цилиндрической винтовой ПР. Муфта, в которой МРХ выбирают плоской пружиной 1, показан на рис. 4.37. Они нормально работают, если момент $M_{пр}$, создаваемый ПР, больше рабочего $M_{раб}$, требующегося на вращение ведущего валика, т. е. $M_{пр} \geq (1,3 \dots 2,5)M_{раб}$.

Мембранные МФ применяются для передачи вращения между валами, расположенными под углами до 3° , имеющими несоосность до $\pm 0,7$ мм. Их достоинство — отсутствие МРХ, поэтому они применяются в приборах и отсчетных устройствах с реверсными низко- и среднескоростными ме-

Таблица 4.6

Рекомендуемые размеры, мм.
двухмембранной МФ (рис. 4.38,б)

d_1	d_2	D_1	D_2	D_3
4	8	35	22	29
6	12	35	22	29
8	15	45	30	38
9	18	45	30	38
10	18	55	35	46

ханизмами. На рис. 4.38,а изображена МФ с одной кольцевой мембраной. Упругое кольцо (мембрана) 2 прикрепляется к планкам полумуфт 1 и 3 в диаметрально противоположных точках. Перекос осей валов до-

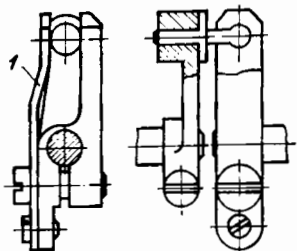


Рис. 4.37. Конструкция поводковой муфты с пружиной

пускается за счет упругой деформации мембраны. На рис. 4.38,б показана двухмембранная МФ, которая дает меньшие колебания скоро-

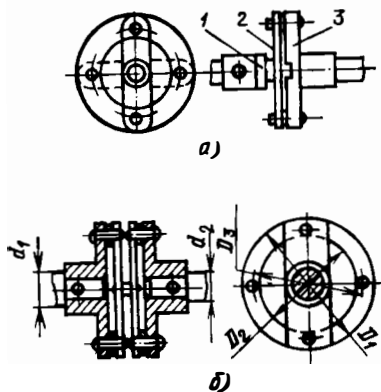


Рис. 4.38. Конструкции мембранных муфт

сти ведомого вала, чем одномембранная. Основные размеры двухмембранной МФ приведены в табл. 4.6 [8].

Мембраны МФ изготавливаются из стали 65Г, фосфористой бронзы БрОФ10-1, текстолита и других материалов.

Упругие МФ (рис. 4.39) способны компенсировать в небольших пределах линейные и угловые смещения валов. Кроме того, они служат и для амортизации динамических нагрузок, передаваемых на вал. Упругий эле-

мент 2, изготавливаемый из кожи или твердой резины и имеющий четыре отверстия, располагается между двумя одинаковыми фланцами 1 и 3 с закрепленными в них пальцами 4. При

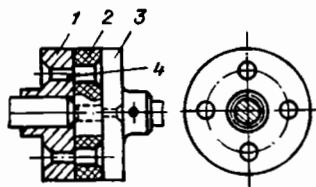


Рис. 4.39. Конструкция упругой муфты

расчете такой МФ производят проверку на прочность упругого элемента, определяя его толщину, внешний диаметр и диаметр пальца. Пальцы МФ проверяются на изгиб. Некоторые типы упругих МФ стандартизированы (ГОСТ 2124—75).

Сцепные управляемые муфты. Применяются для соединения и разъединения двух валов (В) или для соединения В с насаженной на него деталью. Они делятся на кулачковые, зубчатые и фрикционные. Кулачковые и зубчатые МФ осуществляют жесткое соединение В и сохраняют их взаимное расположение после соединения. Включение МФ возможно только при малых угловых скоростях (до 10 рад/с). Фрикционные МФ после включения не обеспечивают определенного положения между соединяемыми В. Включение возможно при любых скоростях движения.

Кулачковые и зубчатые МФ требуют точной соосности соединяемых В. У кулачковых МФ выступы-кулачки, расположенные на торце одной полумуфты, при осевом пере-

мещении входят во впадины между кулачками второй полумуфты. На рис. 4.40,а показана кулачковая муфта, соединяющая вал 3 с полумуфтой 1, свободно вращающейся на валу. Полумуфта 2, соединенная с ва-

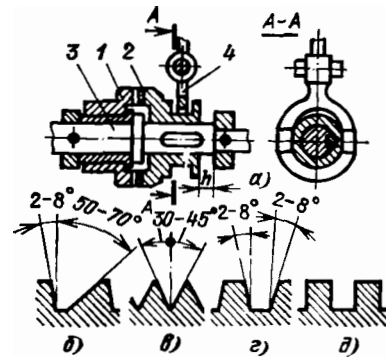


Рис. 4.40. Конструкции кулачковых муфт

лом 3 при помощи шпонки, может перемещаться на расстояние h для отключения МФ, которое производится рычагом 4. Число кулачков в МФ зависит от величины передаваемого крутящего момента и времени включения МФ, которое определяется временем поворота одной полумуфты относительно другой на величину одного кулачка, т. е. $t_b = 60/nz$, откуда $z = 60/nt_b$, где z — число кулачков; n — частота вращения муфты, мин⁻¹; t_b — время включения, с.

В таких МФ применяются кулачки различной формы. При передаче больших и средних нагрузок в реверсивных МХ применяются кулачки прямоугольного профиля (рис. 4.40,д). Основным их недостатком является наличие мертвого хода; преимуществом — отсутствие необходимости прижимать кулачки друг к другу после включения МФ, $z \geq 2$. Треугольный профиль используется при передаче небольших нагрузок, обеспечивает работу МФ без МРХ, обеспечивает быстрое включение (рис. 4.40,в), но требует значительного осевого прижимающего усилия. Число кулачков $z = 15 \dots 60$. Трапецидальный профиль (рис. 4.40,г) используется при передаче больших моментов. Сила прижатия меньше, чем у треугольного профиля, $z = 3 \dots 15$. Несимметричный профиль (рис. 4.40,б) применяет-

ся для обеспечения легкого включения МФ при их неревверсивном вращении. Кулачковые МФ обычно изготавливаются из легированной стали 20Х или 20ХН2 с цементацией и закалкой кулачков до твердости HRC 54...60. Основным недостатком всех кулачковых МФ является невозможность включения на ходу при больших разностях угловых скоростей ведомого и ведущего валов.

Применение и конструктивное выполнение зубчатых МФ аналогично кулачковым, для сцепления на торцевых поверхностях дисков МФ фрезеруются зубья.

В зависимости от формы поверхностей трения фрикционные МФ делятся: на дисковые (с плоскими рабочими поверхностями), конусные (с конической поверхностью) и цилиндрические (колодочные и ленточные).

В дисковой фрикционной муфте (рис. 4.41,а) диск 1 жестко закреплен на валу 2, а диск 3 может пере-

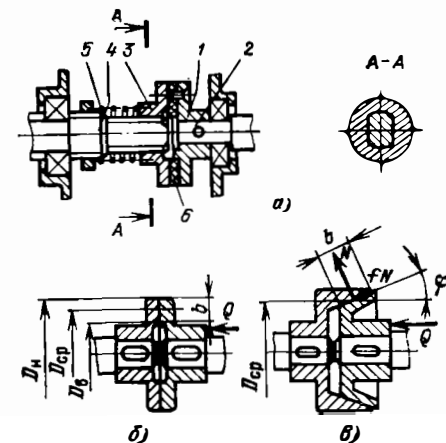


Рис. 4.41. Конструкции фрикционных муфт

мещаться вдоль вала 4. Под действием пружины 5 диск 3 прижимается к диску 1 и передает определенный крутящий момент. Для увеличения передаваемого момента к диску 1 крепится кольцо 6 из фрикционного материала. Силу нажатия пружины Q (рис. 4.41,б) в зависимости от передаваемого муфтой крутящего момента M_k можно определить из условия: $Q = CM_k / fR_{ср}$, где $C = 1,25 \dots 1,5$ — коэффициент запаса сцепления; f — коэффициент трения между

Таблица 4.7

Коэффициенты трения материалов дисков муфт

Материалы	Условия работы		
	без смазки	со смазкой	с попаданием смазки
Сталь по стали	0,18 и больше	0,05 ... 0,08	0,1
Сталь по бронзе	0,18	0,08	0,11
Бронза по бронзе	0,17	0,12	0,15
Сталь по асбесту	0,3 ... 0,45	0,08	0,2
Сталь по фибре	0,2	0,12	0,17
Сталь по текстолиту	0,2	0,1	0,12

Таблица 4.8

Допускаемые удельные давления, МПа, для муфт

Материалы	Типы муфт		
	дисковые	конусные	цилиндрические
Закаленная сталь по стали	0,39 ... 0,58	—	—
Сталь по бронзе	0,39 ... 0,49	0,59	0,59
Сталь по асбесту	0,19 ... 0,24	0,3	0,3
Сталь по фибре	0,34 ... 0,39	0,34 ... 0,39	0,34 ... 0,39
Сталь по текстолиту	0,49 ... 0,59	—	—

дисками; $R_{ср}$ — средний радиус рабочих поверхностей дисков, $R_{ср} = (D_n + D_b)/4$. Обычно $D_b/D_n = 0,5 \dots 0,8$. Удельное давление на диске фрикциона: $p = 4Q/\pi(D_n^2 - D_b^2) \leq [p]$, где $[p]$ — допускаемое удельное давление.

Момент, который можно передать дисковой муфтой, $M_k = 2\pi l [p] b R_{ср}^2$, где b — ширина трущихся поверхностей. Рекомендуемые значения коэффициентов трения для МФ приведены в табл. 4.7. Допускаемые удельные давления для МФ приведены в табл. 4.8.

Конусная фрикционная МФ (рис. 4.41, в) имеет коническую поверхность трения и обычно применяется для передачи небольших крутящих моментов. Для облегчения выключения МФ и предотвращения ее заклинивания угол φ не должен быть меньше угла трения. Для металлических поверхностей трения принимают $\varphi \geq 10 \dots 15^\circ$. К недостаткам следует отнести требование строгой соосности валов; к достоинствам — меньшую силу нажатия ПР, меньшие размеры и более надежное сцепление, чем у дисковых МФ. Задаваясь $R_{ср}$, можно определить ширину поверх-

ности трения b ; задаваясь отношением $\psi = b/R_{ср} \geq 0,3 \dots 0,5$, — значение $R_{ср}$: $b \geq CM_k/2\pi R_{ср}^2 [p] \psi$;

$$R_{ср} \geq \sqrt[3]{CM_k/2\pi\psi[p]f}$$

Осевая сила, необходимая для включения муфты, $Q = N \sin \varphi = CM_k \sin \varphi / R_{ср}$.

Момент, который может передать конусная муфта, определяют по формуле для дисковой муфты.

Сцепные самоуправляющиеся муфты. Самоуправляющиеся МФ автоматически срабатывают в зависимости от изменения крутящего момента, скорости или направления движения. По назначению и характеру работы эти МФ делятся на предохранительные и центробежные.

Предохранительные МФ (МФ предельного момента) служат для защиты механизма от перегрузки, когда передаваемый крутящий момент достигает предельной величины. В механизме РЭА применяются в основном фрикционные предохранительные МФ. Фрикционные предохранительные МФ принципиально не отличаются от фрикционных МФ ручного

управления. Усилия пружин, прижимающих трущиеся поверхности, рассчитывают по величине максимального допускаемого крутящего момента. Муфты бывают с постоянным усилением пружин и с переменным (регулируемым). Для уменьшения удельного давления на контактирующие поверхности фрикционной предохранительной МФ может быть использована конструкция многодисковой МФ.

Центробежные МФ используются для автоматического сцепления или расцепления В при достижении ведущим В определенной скорости (для повышения плавности разбега механизма; для разгона двигателя с небольшим пусковым моментом без нагрузки и последующим плавным включением нагрузки; для отключения механизма, когда частота вращения двигателя превышает допустимый предел). По принципу действия центробежные МФ являются фрикционными, у которых включение и выключение осуществляется автоматически при определенной угловой скорости (в результате взаимодействия центробежных сил инерции специальных грузиков с тормозными колесиками и пружинами).

4.11. ФИКСАТОРЫ И ОГРАНИЧИТЕЛИ

Фиксаторы. Предназначены для точной установки и удержания подвижных звеньев механизма в определенном положении; могут быть с жесткой и упругой фиксацией. Фиксаторы с упругой фиксацией срабатывают автоматически под действием пружин и надежно удерживают фиксируемое звено в заданном положении при предусмотренных условиях эксплуатации. Фиксаторы для вращательного движения (рис. 4.42), применяемые в механизмах РЭА, могут быть выполнены с рычагом, со штоком, с шариком, с роликом на рычаге, с рычагом-пружиной (1 — подвижный элемент; 2 — пружина; 3 — рычаг; 4 — шток; 5 — шарик; 6 — ролик; 7 — рычаг-пружина).

Фиксаторы для поступательного движения применяются реже. Они представляют собой рейку с отверстиями и пазами, точно устанавливаемую в определенных положениях с помощью различных фиксирующих элементов. Так, на рис. 4.42, е рейка 1 с отверстиями под действием пружины 2 и конусообразного штока 3 точно фиксируется с шагом s .

На рис. 4.42, в показана схема сил, действующих в упругом фиксаторе.

На рис. 4.42, в показана схема сил, действующих в упругом фиксаторе.

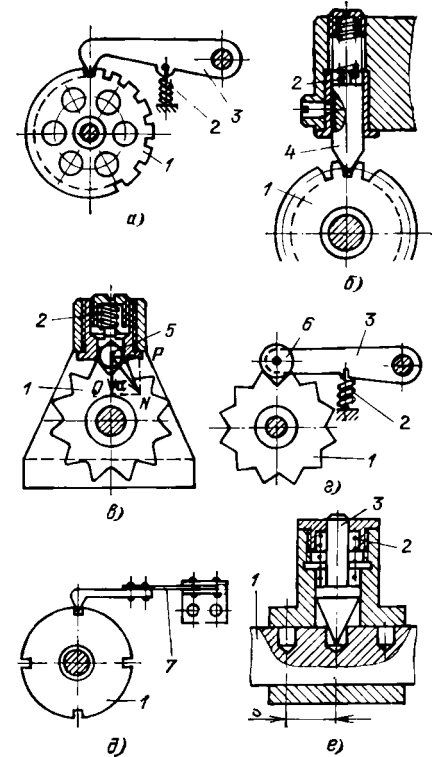


Рис. 4.42. Конструкция фиксаторов

Для вывода шарика из фиксированного положения требуется приложить к нему силу $P = Q(\operatorname{tg} \alpha + \varphi)$, где α — угол наклона нормальной к поверхности шарика реакции гнезда; φ — угол трения между шариком и гнездом; Q — сила давления пружины. Рекомендуется принимать $\alpha = 45 \dots 50^\circ$ ($\alpha_{\max} \leq 70^\circ$), $\varphi = 5 \dots 8^\circ$.

Форма фиксирующих впадин оказывает влияние на быстродействие, точность и надежность работы фиксатора, а также на динамические свойства его. Для сохранения большой силы фиксации и облегчения переключения фиксатора рекомендуется применять фиксирующие впадины с выпуклым профилем с переменным углом α .

Ограничители движения. Предназначены для ограничения угла пово-

рота звеньев механизма в заданных пределах. Ограничители движения бывают ручные и механические; остановка движения происходит автоматически от привода.

Ручные стопоры служат для закрепления звеньев механизма в требуемых положениях. Работа большинства из них основана на использовании сил трения. Конструктивно они выполняются в виде различных зажимов. В механизмах РЭА используются чаще всего три вида механических стопоров: винтовые, дисковые и зубчатые.

Винтовой стопор (рис. 4.43) состоит из корпуса 1, винта 2, гайки 3,

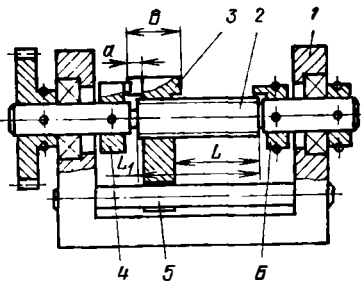


Рис. 4.43. Конструкция винтового стопора

двух упорных колец 4 и 6 и направляющей планки 5, которая предотвращает вращение гайки. Винтовой стопор останавливает движение винта, когда гайка доходит до упора 4 или 6. Числом оборотов винта n и шагом резьбы S обычно задаются. Тогда длина хода гайки и длина нарезанной части винта: $L = nS$; $L_1 = L + B - 2a$, где B — длина гайки; a — высота выступов гайки. Точная регулировка n может осуществляться при сборке осевым перемещением и поворотом упорных колец с последующим закреплением их штифтами.

Дисковый стопор с кулачковыми шайбами (рис. 4.44) применяется для стопорения на целое или дробное число оборотов. На валике стопора закреплен поводок 1 с выступом, увлекающим за собой первую кулачковую шайбу 2. Первая шайба приводит в движение вторую, вторая — третью и т. д. до тех пор, пока последняя шайба не упрется своим выступом в выступ упорной втулки 3, неподвижно закрепленной на корпусе. Задаваясь требуемым числом

оборотов валика, расчет стопора ведут по формулам:

$$K = 360 n / (360 - 2\beta) - 1;$$

$$\alpha = (360 - 2\beta) K - 360(n - 1) - \beta,$$

где K — число кулачковых шайб; β — угол выступа кулачковой шайбы и поводка; α — угол выступа упорной втулки.

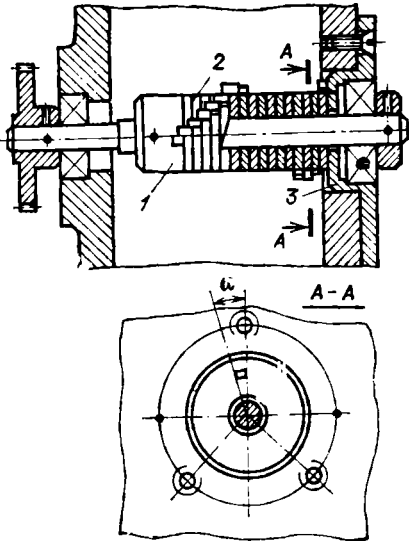


Рис. 4.44. Конструкция дискового стопора

Зубчатый стопор (рис. 4.45) прост по конструкции, занимает мало места, прост в изготовлении, состоит из двух сцепленных между собой зубчатых колес (ЗК) 1 и 4 и укрепленных на них кулачков 2 и 3. На рис. 4.45 изображено застопоренное положение ЗК при вращении их против

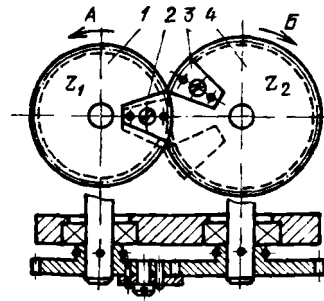


Рис. 4.45. Конструкция зубчатого стопора

стрелок А и Б. Штрихами показано застопоренное положение зубчатых ЗК, когда они будут вращаться по стрелкам А и Б. Одно из ЗК (1) называется стопорным и совершает расчетное число оборотов, другое колесо (4) является стопорящим. Передаточное отношение $n_2/n_1 = z_1/z_2$, или $n_2 = n_1 z_1/z_2$.

4.12. УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Классификация и применение. Основным свойством упругих элементов является их способность изменять размеры и форму под действием нагрузки.

Пружины (рис. 4.46) разделяют на: цилиндрические винтовые для сжатия и растяжения (а, б); прямые, рабо-

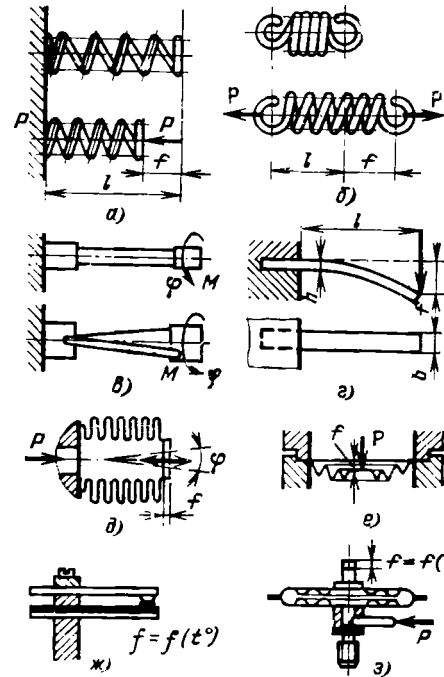


Рис. 4.46. Конструкции упругих элементов

ботающие на кручение (в); прямые, работающие на изгиб (г); сильфоны (д); мембраны (е); биметаллические, изгибающиеся при изменении температуры (ж); анероидные коробки (з).

Характеристикой упругого элемента называется зависимость между его прогибом f и нагрузкой P или между

углом закручивания φ и моментом M , вызывающим деформацию элемента. Эта зависимость может быть выражена функцией $f = f(P)$ или $\varphi = f(M)$ (рис. 4.47, а) линейного (прямая 1) или нелинейного (кривые 2, 3) вида. Жесткость K упругого элемента — предел отношения приращения нагрузки ΔP к приращению прогиба Δf , когда $\Delta f \rightarrow 0$:

$$K = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} (\Delta P / \Delta f) = dP / df$$

$$K = \lim_{\Delta \varphi \rightarrow 0} (\Delta M / \Delta \varphi) = dM / d\varphi.$$

Графически жесткость определяется через тангенс угла θ наклона касательной, проведенной к заданной точке характеристики: $\operatorname{tg} \theta = dP / df$ (рис. 4.47, а); она постоянна, если $K = P/f = \text{const}$ (линейные элементы). Чувствительность упругого элемента $S = 1/K = df/dP$; $S' = d\varphi/dM$.

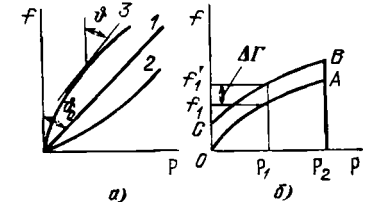


Рис. 4.47. К определению параметров упругих элементов

Упругим элементам свойственны явления упругого гистерезиса и упругого последствия, которые проявляются в том, что после прекращения изменения нагрузки упругий элемент некоторое время продолжает деформироваться (участки кривой АВ при $P_2 = \text{const}$ и СО при $P = 0$ на рис. 4.47, б), а при увеличении и уменьшении нагрузки характеристики элемента не совпадают друг с другом (кривые ОА и ВС). Суммарная абсолютная погрешность, вызванная последствием и гистерезисом при нагрузке P_1 , равна $\Delta \Gamma = f'_1 - f_1$, а относительная $\epsilon_r = (\Delta \Gamma / f_{\text{max}}) 100\%$. В упругих элементах $\epsilon_r = 0,5 \dots 1,5\%$. Относительная погрешность в работе упругого элемента при изменении температуры окружающей среды $\epsilon_t = (\Delta P_t / P_{\text{max}}) 100 = (P_{\alpha \epsilon} \Delta t / P_{\text{max}})$, где α_ϵ — температурный коэффициент модуля упругости материала элемента (для металлов берется со знаком минус).

По назначению упругие элементы делятся на измерительные, силовые и элементы для упругих связей. В зависимости от вида деформации материала упругих элементов последние рассчитываются на изгиб, кручение и сложные деформации. Для изготовления винтовых ПР, которые навиваются в холодном состоянии и не подвергаются закалке, применяется пружинная стальная холоднотянутая углеродистая проволока диаметром от 0,14 до 8 мм (ГОСТ 9389—75). Для пружин, работающих при повышенных температурах под действием ударной и циклической нагрузки, применяется стальная хромованадиевая проволока диаметром от 0,5 до 14 мм. Пружины после навивки подвергаются термообработке.

Для изготовления плоских, изогнутых и спиральных пружин (кроме заводных) применяется стальная термообработанная лента толщиной от 0,08 до 1,5 мм и шириной от 1,6 до 80 мм (ГОСТ 21996—76). Широко используются ленты из стали 65Г, У8А, У10А, а для более ответственных пружин — из стали 60 С2А и 70 С2ХА.

В тех случаях, когда пружина должна работать в магнитном поле, обладать хорошей электропроводностью или иметь высокую стойкость против коррозии, рекомендуется применять бронзы БрКМц3-1, БрОФ6.5—0,15; БрОЦ4—3 и БрБ2. Для предохранения от коррозии стальные пружины обычно подвергают кадмированию или цинкованию, а бронзовые — оксидированию или никелированию.

Винтовые и прямые пружины. Первые подразделяются на пружины растяжения, сжатия и кручения. При $H/D > 3$ во избежание выпучивания ПР сжатия должна работать в направляющих на стержне или в стакане (рис. 4.48,а). Для обеспечения надежной опоры и устранения перекоса концевые витки сжатия подгибаются и шлифуются. При больших нагрузках бывает целесообразно одну большую пружину заменить двумя или тремя меньшими по размерам (рис. 4.48,в).

Конические пружины применяются преимущественно как пружины сжатия (рис. 4.48,б). При $H/D < 4$ они могут работать без направляющих. Под нагрузкой длина их H может быть сокращена (до d).

У винтовых пружин, работающих на растяжение, в свободном состоянии обычно витки прижаты друг к другу. Часто для уменьшения разме-

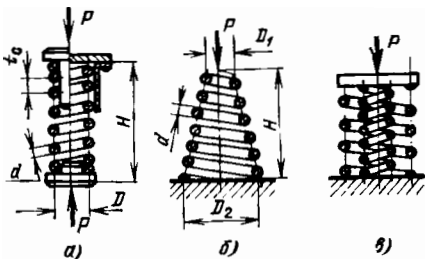


Рис. 4.48. К расчету винтовых пружин

ров ПР растяжения их изготавливают с предварительным натяжением, т. е. $P > 0$ при $f = 0$.

Цилиндрические ПР сжатия (рис. 4.49,а) и растяжения (рис. 4.49,б)

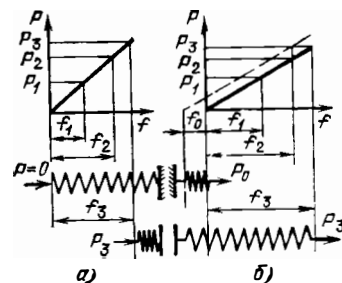


Рис. 4.49. К расчету пружин сжатия и растяжения

рассчитываются из условий прочности витка ПР на кручение. По условиям работы ПР определяются: нагрузка на ПР P_2 — наибольшая; $P_1 = (0,3 \dots 0,8)P_2$ — наименьшая и $P_3 \approx (1,1 \dots 1,2)P_2$ — предельно допустимая; рабочий ход ПР $h = f_2 - f_1$; индекс $C = D/d$; материал ПР, его допустимое напряжение $[\tau]$ и модуль сдвига G . Расчет ПР выполняется по следующим формулам.

Диаметр проволоки $d \geq \sqrt[3]{8P_2 C K' / \pi [\tau]}$, где K' — коэффициент, учитывающий увеличение напряжений на внутренней стороне витка при уменьшении C . Принимают: $K' \geq 1 \dots 1,15$ при $C = 16 \dots 10$; $K' = 1,18 \dots 1,25$ при $C = 8 \dots 6$; $K' = 1,4$ при $C = 4$. Рекомендуется при-

нимать $C = 16 \dots 18$ при $d < 0,4$ мм; $C = 12 \dots 6$ при $d = 0,4 \dots 2$ мм; $C = 10 \dots 4$ при $d > 2$ мм. Значение d принимается ближайшим по ГОСТ.

Средний диаметр ПР: $D = Cd$. Жесткость $K = Gd^4 / 8nD^3$. Число рабочих витков ПР $n = (P_2 - P_1) / (f_2 - f_1)$. Прогиб всей пружины при ее длине $L_p = \pi D n f = 8C^3 P n / G d$. Шаг пружины растяжения $t_p = d$, сжатия $t_c = d + f/n$. Длина развернутой проволоки $L = (\pi D n / \cos \lambda) + 2L_1$, где L_1 — развернутая длина прицепа; λ — угол подъема витков ($\operatorname{tg} \lambda = t / \pi D$). Для пружин растяжения $N = n$; для пружин сжатия $N = n + 1,5$, если крайние витки сошлифованы, и $N = n + 2$, если крайние витки подогнуты и сошлифованы. Длина цилиндрической части пружины в свободном состоянии $H = Nt$. В случае применения пружин растяжения с предварительным натяжением обычно принимают $P_0 \leq 0,3P_2$. Характеристика такой ПР показана на рис. 4.49,б штриховой линией.

Прямые пружины, работающие на изгиб, имеют прямоугольное сечение, реже круглое. Для консольных ПР (рис. 4.50,а) прямоугольного сечения шириной b и толщиной h : $P_{\max} = bh^2 [\sigma]_{\text{из}} / 6l$, $j = 2l^2 [\sigma]_{\text{из}} / 3hE$; для круглого сечения: $P_{\max} = \pi d^3 [\sigma]_{\text{из}} / 32l$, $j = 2l^2 [\sigma]_{\text{из}} / 3dE$. Прямые наборные пружины (рис. 4.50,б) применяются

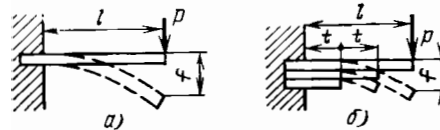


Рис. 4.50. К расчету прямых пружин

в тех случаях, когда нельзя получить требуемую силу пружины P путем увеличения ширины b . При числе пружин z : $P_{\max} = zb^2 [\sigma]_{\text{из}} / 6l$, $f_{\max} = l^2 [\sigma]_{\text{из}} / 2hE$, $t = l/z$.

Биметаллические пружины. Деформируются при изменении температуры. Изготавливаются из двух тонких металлических пластинок толщиной h_1 и h_2 с разными коэффициентами линейного расширения α_1 и α_2 . Для изготовления ПР используются термометаллы ТБ-1, ТБ-2, ТБ-3, ТБ-5, ТБ-6, ТБ-7 и др.

При нагревании ПР изгибается в сторону пластины с меньшим коэффи-

циентом расширения. Для получения наибольшей чувствительности необходимо соблюдать условие $h_1/h_2 = \sqrt{E_2/E_1}$.

Наибольший прогиб консольной ПР (рис. 4.51):

$$f = 0,75 \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{h_1 + h_2} l^2 (t_1 - t_2).$$

Сила P , которая создается биметаллической ПР, нажимающей на упор A :

$$P = \frac{(E_1 + E_2) bh^3}{8l^3} (f - f_{\text{уп}}),$$

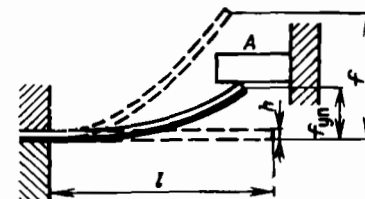


Рис. 4.51. Конструктивная схема биметаллической пружины

где $h = h_1 + h_2$; $f_{\text{уп}}$ — прогиб ПР при наличии упора. Следовательно, величина силы P может изменяться путем регулирования положения упора.

Мембраны. Применяются плоские, хлопающие и гофрированные металлические мембраны. Плоские мембраны (рис. 4.52,а) имеют низкую чувствительность, т. к. их прогиб ограничивается малыми упругими деформациями растяжения. Хлопающие мембраны имеют форму сферического купола (рис. 4.52,б). При определенной величине нагрузки, действующей на выпуклую сторону, мембрана «хлопает», т. е. резко меняет прогиб. Гофрированные мембраны имеют концентричные волнообразные складки — гофры (рис. 4.46,е). Характеристика мембраны зависит от ее материала, размеров, профиля гофров. Применя-

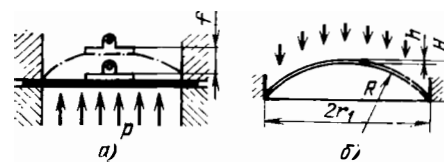


Рис. 4.52. Конструктивные схемы мембран

ются профили: трапецидальный, угловой, синусоидальный с постоянной и переменной глубиной и др. Такие мембраны обладают значительно большей чувствительностью, чем плоские. Для повышения чувствительности изготавливают гофрированные мембранные коробки.

Материалом для мембран служат: нержавеющие стали и сплавы 36ХНТ10; ЭИ702; бронзы БрОФ6,5—0,4; БрБ2,5; БрНТ1,9; нейзильбер НМц65—20 и др. Материалами для неметаллических мембран служат резина, прорезиненный шелк и кожа. Конструкция, основные параметры и размеры измерительных гофрированных мембран с трапецидальными профилями выбираются из таблиц ГОСТ.

4.13. ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Назначение и классификация. Отсчетное устройство (ОУ) аналоговой аппаратуры обычно состоит из шкалы (Ш) и указателя, причем подвижным может быть либо указатель, либо Ш. По типу указателя ОУ делятся на стрелочные и световые, где роль стрелки выполняет световой луч. Циферблаты, на которые наносится Ш, делают из металлов, пластмасс, стекла и бумаги.

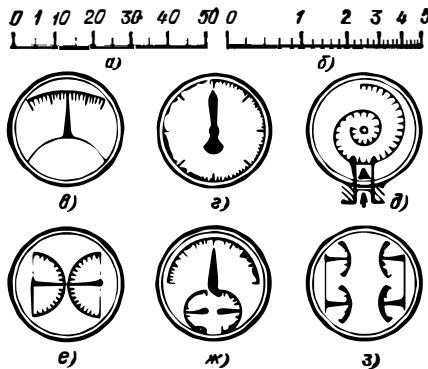


Рис. 4.53. Конструктивные схемы плоских шкал

По расположению в пространстве Ш можно разделить на плоские и пространственные. Плоские Ш (рис. 4.53) бывают прямолинейными (а — равномерная Ш; б — неравномерная); дугowymi (в), кругowymi (г)

и спиральными (д). На рис. 4.53, е — показаны многошальные плоские МХ. Пространственные Ш (рис. 4.54) можно разделить на цилиндрические (а), конические (б), винтовые барабанные (в) и сферические (г). Ряд

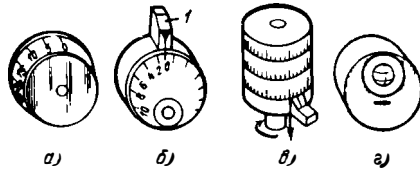


Рис. 4.54. Конструкции пространственных шкал

Ш стандартизирован согласно ГОСТ 5365—73.

Форму и размеры указателей выбирают в зависимости от назначения и конструкции РЭА и требуемой точности отсчета. Неподвижные указатели рекомендуется располагать в положении «12 часов» или «9 часов» часового циферблата. Законцовка стрелок и указателей должна быть простой, а толщина конца стрелки — не более ширины малого штриха. Если взгляд наблюдателя на указатель отклоняется от нормали к поверхности Ш, то возникает ошибка от параллакса, для уменьшения которой стрелки располагают в плоскости Ш или очень близко к ней, а концы стрелок делают плоскими, ножевидными или применяют зеркальный отражатель под Ш. На рис. 4.55—4.60 даны некоторые виды шкал, применяемых в РЭА [1].

Отсчетные устройства цифровых приборов позволяют получать показания непосредственно в цифровой форме. Для создания изображений цифр применяются цифровые индикаторы различной конструкции.

Расчет ОУ. Исходными данными для расчета и выбора типа ОУ являются: пределы изменения измеряемой величины ($X_{max} - X_{min}$) отсчетных единиц (о. е.); соответствующий этим пределам угол поворота α из валка исполнительного элемента, рад; назначение и класс точности изделия и соответствующие ему допускаемые значения погрешностей $[\gamma]$, %, и $[\Delta X]$; длина деления шкалы, мм; ориентировочные значения угла $\alpha_{шрад}$ и диаметра шкалы $D_{ош}$, мм.

При расчете ОУ с дуговой и круговой Ш определяют: цену деления

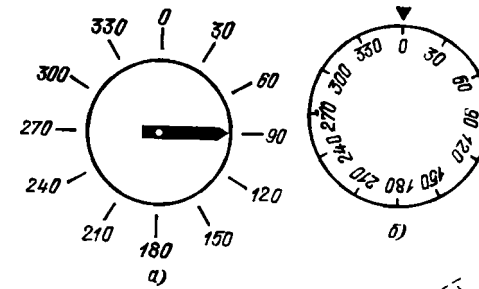


Рис. 4.55. Варианты дисковых шкал

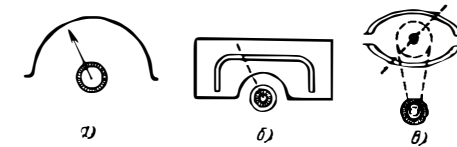


Рис. 4.56. Плоские шкалы (б и в — указатель виден только в прорези)

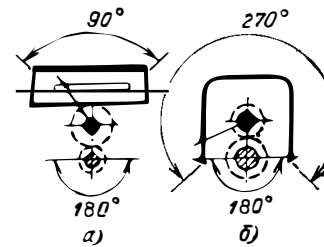


Рис. 4.57. Шкала с уменьшенным (а) и с увеличенным (б) углами поворота указателя

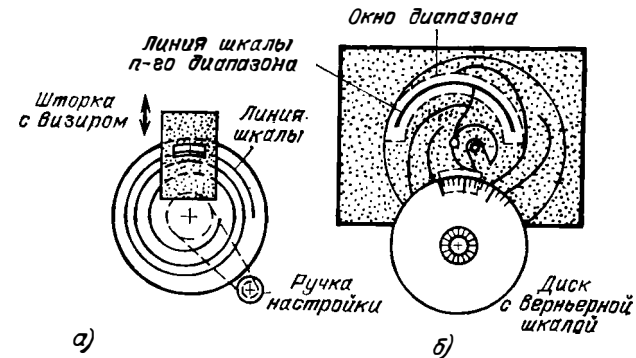


Рис. 4.58. Шкала многооборотная (а) и сменная (б)

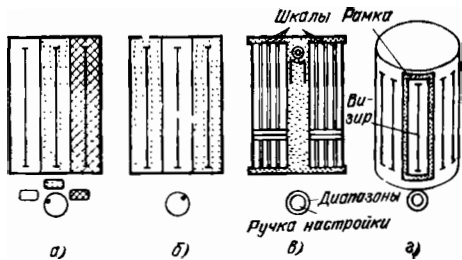


Рис. 4.59. Табличные шкалы вертикальные (а, б, в) и сменные барабанные (г)

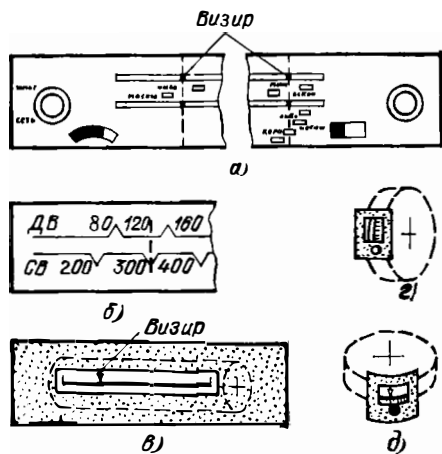


Рис. 4.60. Табличные шкалы с надписями или цифрами (а, б), горизонтальная (в) и вертикальная (г, д) барабанные

$H=2[\Delta X]$ о. е.; число делений $N_{ш}=(X_{max}-X_{min})/H$; расчетную длину $L_{ш}=N_{ш}b$, мм; расчетный диаметр $D_{ш}=2L_{ш}/\alpha_{ш}$. Если при $\alpha_{ш}=\alpha_{иэ}\leq 2\pi$ получают $D_{ш}\leq D_{ош}$, то применяют дуговую или круговую Ш, соединенную непосредственно с валком ИЭ. Из ряда нормальных диаметров Ш (35, 50, 65, 80, 100 ... мм) выбирают ближайшее большее значение для $D_{ш}$ и уточняют $L_{ш}=D_{ш}\alpha_{ш}/2$, мм, и $b=L_{ш}/N_{ш}$, мм. Если при $\alpha_{ш}=\alpha_{иэ}=2\pi$ получают $D_{ш}>D_{ош}$, то определяют расчетный $\alpha'_{ш}=2\pi D_{ш}/D_{ош}$, рад. При $2\pi<\alpha'_{ш}<8\pi$ применяют спиральную или винтовую Ш с отчетным МХ. При $\alpha'_{ш}>8\pi$ применяют ОУ с двумя Ш — одну для точного отсчета (ШТО), а вторую — для грубого от-

счета (ШГО). В таком устройстве ШГО обычно непосредственно соединяется с валком ИЭ, а ШТО делает полный оборот при повороте ШГО на одно деление. Определяют: $H_{што}=2[\Delta X]$, о. е.; $N=(X_{max}-X_{min})/H_{што}$; $N=N_{шго}N_{што}$. Задаются $N_{што}\geq N_{шго}$, при этом принимают $H_{што}$ равным 10, 20, 50 или 100. Находят расчетные $L'_{шго}=N_{што}b_{шго}$; $D_{шго}=L'_{шго}/\pi$. Рекомендуется принимать $D_{шго}=D_{што}$ из ряда нормальных диаметров круговых Ш. Затем уточняют: $L_{шго}=L'_{шго}$, мм; $b_{шго}=L_{шго}/N_{шго}$, мм; $L_{шго}=\pi D_{шго}$, мм; $b_{шго}=L_{шго}/N_{шго}$, мм; если $\alpha_{шго}<2\pi$, то $L_{шго}=D_{шго}\alpha_{шго}/2$, мм; $b_{шго}=L_{шго}/N_{шго}$, мм. При этом $b_{шго}$ и $L_{шго}$ должны быть не меньше нормальных значений для данного типа РЭА. Передаточное отношение ШТО и ШГО: $i_{шго-што}=N_{шго}$.

Погрешности ОУ. При совмещении штрихов шкалы и указателя сдвиг одного штриха относительно другого составляют: $\Delta b=0,05 \dots 0,1$ мм. Тогда погрешность от совмещения штрихов шкалы и указателя для линейных шкал $\Delta l_c=\Delta b$, мм; для круговых шкал $\Delta \varphi_c=\arctg \frac{2\Delta b}{D_{ш}}$, угл. мин.

Погрешность от параллакса для линейных шкал $\Delta l_n=0,12S$, для круговых шкал $\Delta \varphi_n=\arctg \frac{0,24S}{D_{ш}}$, где S — расстояние между плоскостями шкалы и указателя.

Общая погрешность отчетного устройства: для круговых шкал $\Delta \varphi_{\Sigma}=\sqrt{\Delta \varphi_c^2+\Delta \varphi_n^2+\Delta \varphi_{иэ}^2+(1,14\Delta \varphi_y)^2}$, угл. мин; для линейных шкал $\Delta l_{\Sigma}=\sqrt{\Delta l_c^2+l_n^2+\Delta l_{иэ}^2+\Delta l_y^2}$, мм, где $\Delta \varphi_y$ и Δl_y — погрешность установки шкалы в радиоаппаратуре; $\Delta \varphi_{иэ}$ и $\Delta l_{иэ}$ — погрешность изготовления шкалы.

Допускаемые отклонения на расстоянии от риски к риске, получаемые печатанием, устанавливаются: $\Delta \varphi_{иэ}=\pm 20'$ и $\Delta l_{иэ}=\pm 0,2$ мм; получаемые механической обработкой — $\Delta \varphi_{иэ}=\pm (3 \dots 12)'$, $\Delta l_{иэ}=\pm (0,05 \dots 0,15)$ мм.

4.14. МЕХАНИЗМЫ НАСТРОЙКИ

Общие сведения. Механизмы настройки осуществляют кинематическую связь между ИЭ, ОУ и рукоятками настройки или валком двигателя привода настройки. В современной РЭА широко применяется МХ фиксированной или плавной (ручной) дистанционной настройки. Механизмы фиксированной настройки применяются для перестройки ИЭ в пределах заранее подготовленных положений и бывают двух видов: с постоянной фиксацией (выбор определенных положений или частот производится в процессе изготовления и не меняется в течение срока службы) и с переменной (настройка и фиксация ИЭ на любых частотах из всей сетки опорных частот производится на время, определяемое условиями эксплуатации изделия). Механизмы плавной настройки, часто называемые верньерными устройствами, применяются для плавного изменения параметров ИЭ в пределах всего диапазона рабочих частот радиоаппаратуры.

МХ ручной настройки служат для точной настройки или перестройки ИЭ, имеющих вращательное или поступательное движение, вручную. МХ дистанционной настройки служат для управления РЭА с пультов управления, находящихся на некотором расстоянии от самой аппаратуры.

Электромеханический привод (П). Состоит из ЭД, осуществляющего преобразование электрической энергии в механическую, и редуктора, связывающего ЭД с ИЭ.

При проектировании привода выполняют кинематический расчет и подбор ЭД, расчет передачи на прочность и точность.

Для кинематического расчета необходимо знать крутящий момент ИЭ $M_{иэ}$, Н·мм, и частоту вращения ИЭ n , мин⁻¹.

Номинальная мощность ЭД без учета потерь на трение: $N=M_{иэ}\times \times n/9550$, Вт.

Зная род питания ЭД, напряжение, срок службы, реверсивность, подбирают тип ЭД. Округляя значение N , выбирают номинальную мощность ЭД, а затем определяют общее передаточное число редуктора $i_{общ}=\frac{n_{эд}}{n_{вых}}$, ($n_{эд}$ — мин⁻¹, $n_{вых}$ — мин⁻¹, выходного В редуктора).

Далее в зависимости от расположения входного и выходного валов разрабатывают кинематическую схему редуктора, определяют тип зубчатой передачи и производят разбивку общего передаточного числа по ступеням. Средние значения передаточных чисел для различных типов передач приведены в табл. 4.9 [5]. После предварительного выбора числа ступеней и определения передаточных чисел в каждой ступени производят проверку $i_{общ}=i_1i_2\dots i_n$, где i_1, i_2, i_n — передаточные числа отдельных ступеней.

Производят предварительную компоновку редуктора, на которой в зависимости от его заданных габаритов выбирают модули отдельных передач и числа зубьев ведущих и ведомых ЗК и окончательно выбирают тип ПШ.

Расчитывают мощность ЭД с учетом потерь на трение (КПД редуктора $\eta_{общ}=\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n, \eta_{иэ}$, где η_1, η_2, η_n — КПД каждой зубчатой пары; $\eta_{иэ}$ — КПД одной пары ПШ; n — число ступеней редуктора), определяют крутящий момент ЭД: $M_{эд}=M_{иэ}K_t/i_{общ}\eta_{общ}$; где K_t — коэффициент, учитывающий увеличение момента трения редуктора, работающего при отрицательных температурах (его значение в зависимости от температуры, смазки, материалов и т. д. лежит в пределах 1,5 ... 2,5 [5]).

Таблица 4.9

Рекомендуемые значения i зубчатых передач

Тип передачи	Прямозубая	Косозубая	Коническая	Червячная
Средние значения i	3 ... 5	3 ... 6	2 ... 4	10 ... 60

Если полученное значение $M_{ЭД}$ равно или меньше значения, принятого при предварительном выборе ЭД по мощности, то кинематический расчет на этом оканчивается; если же оно больше выбранного момента, то выбирают новый ЭД и повторяют расчет.

При проектировании редукторов подвергают проверочному расчету на прочность передачи, близкие к выходному звену редуктора, на которые воздействуют максимальные крутящие моменты.

Для редукторов, передающих значительные крутящие моменты, перед компоновкой определяют модуль зубчатого зацепления из расчета передачи на прочность. Расчет на прочность мелко модульных передач производится обычно или при выборе материалов (особенно пластмасс или легких материалов) или при большом сроке службы редуктора. Если при расчете возникают напряжения выше допустимых, то можно, увеличивая ширину зубчатого венца и не меняя модуля зацепления, снизить напряжения до допустимых величин.

Расчет элементов крепления ЗК на валах, таких как штифты, шпонки и др., производится по формулам, указанным в [5], при этом усилие, действующее на данный элемент: $P = 2M_{ЭД} i_n / d$, Н, где i_n — передаточное число от ЭД до В, на котором крепится ЗК; d — диаметр вала.

При расчете редукторов на точность обычно вычисляют для отчетных передач общую кинематическую погрешность, а для реверсивных — БЗ. Расчет редуктора на точность подробно изложен в [5].

Механизмы фиксированной настройки. К ним относятся переключатели барабанного, клавишного, кнопочного типов (МХ с постоянной фиксацией).

Переключатель барабанного типа на восемь поддиапазонов показан на рис. 4.61. В корпусе 1 на валике 2 установлен барабан поддиапазонов, который переключается ручкой 3. Фиксация положений производится с помощью фиксатора, состоящего из подвижного элемента 4, ролика 5 на рычаге 6 и пружины 7. Положения барабана указываются на Ш, состоящей из корпуса 8, в который вставляются сухарики 9 с соответствующими надписями. Барабан поддиапа-

зонов состоит из шайбы 10 с прямоугольными отверстиями и диска 11 с отгибками. В отверстия шайбы 10 вставляются швеллеры 12, которые другим концом привертываются к отгибкам диска 11. На каждом швел-

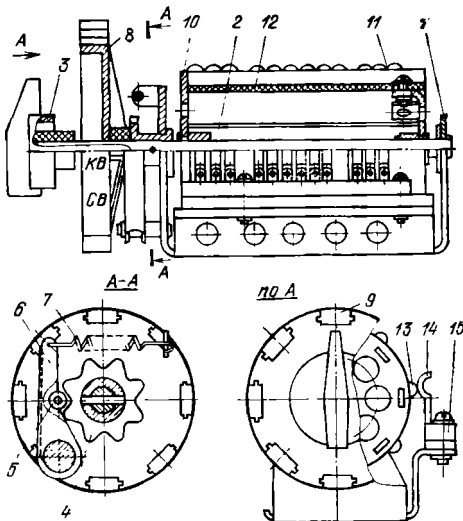


Рис. 4.61. Конструкция переключателя барабанного типа

лере 12 внутри барабана собирается каскад соответствующего диапазона, съем напряжения с которого производится через полукруглые контакты 13 на общие шины, представляющие собой фасонные ПР 14, которые крепятся к корпусу колодки 15 и винтами.

Переключатель кнопочного типа на восемь диапазонов показан на рис. 4.62. Кнопочный механизм представляет собой корпус 12, в котором с зазором установлено восемь планок 2 с кнопками 3. На рис. 4.62 все кнопки показаны в свободном (сброшенном) положении. При нажатии на кнопку 3 планка 2 перемещается на величину H , при этом выступ 1 планки сначала приподнимает скобу 4, которая затем опускается под действием ПР 5 и удерживает планку 2 за выступ 1 во включенном положении. Если одна из кнопок была включена, то при нажатии другой кнопки в тот момент, когда скоба 4 приподнимается выступом 1 планки 2, ранее включенная кнопка будет сброшена под действием ПР 6. К кно-

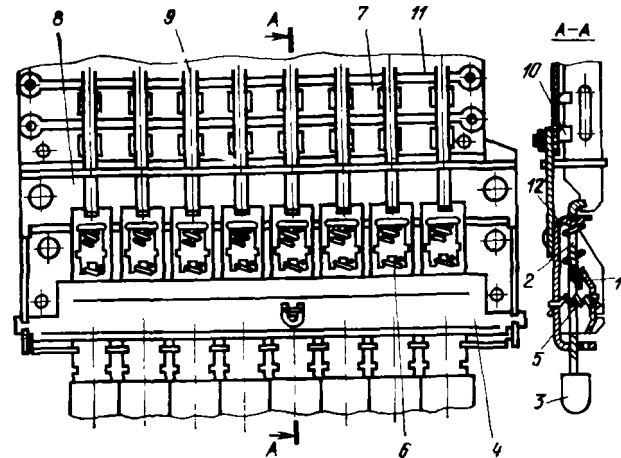


Рис. 4.62. Конструкция переключателя кнопочного типа

почному МХ привертывается плата 7, на которой установлены радиодетали всех восьми диапазонов. В направляющей 8 располагаются движки 9, соединенные с планками 2. При нажатии кнопки движок 9 будет перемещаться также на величину H и с помощью контактных ПР 10 подключать контакты соответствующего каскада к общим шинам 11, которые подпают к схеме ЭА. МХ с подстройкой в узких пределах показан на рис. 4.63. На подвижном диске с

ных положениях производится рычагом 4 под действием ПР 5. Механизм с переменной фиксацией всех восьми диапазонов показан на рис. 4.64. В корпусе механизма на подшипниках скольжения 1 установлено запоминающее устройство 2 с общим зажимом, фиксация шайб 3 с пазом которого производится рычагами 4, посаженными на оси 5, под

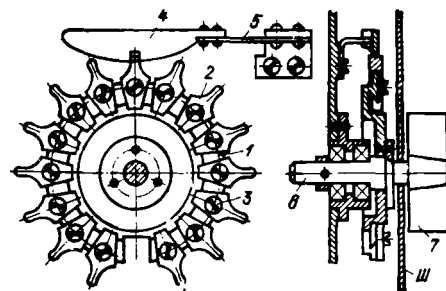


Рис. 4.63. Механизм фиксированной настройки с подстройкой в узких пределах

кольцевым пазом 1 устанавливаются сухарики 2 по числу положений ИЭ. При регулировке в заводских условиях сухарики 2 перемещают в узких пределах, а затем затягивают винтами 3. Дальнейшая фиксация подвижного элемента на заранее настроен-

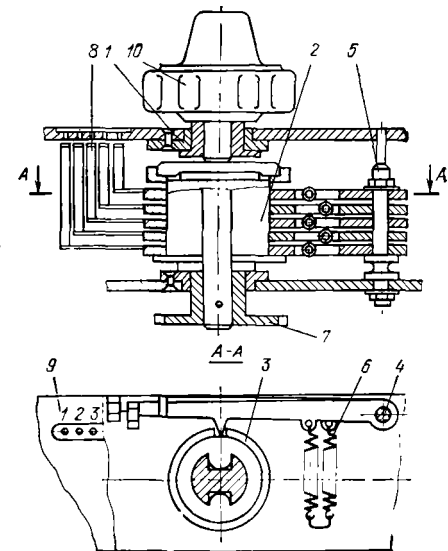


Рис. 4.64. Механизм с переменной фиксацией

действием ПР 6. Вращение на ИЭ передается ЗК 7. К каждому рычагу 4 прикреплен шторка 8, закрашенное поле которой, закрывая круглое окошко в передней плате 9, показывает номер рычага (канала связи), фиксирующего запоминающее устройство в данный момент. Перестройку данного МХ на новые частоты производят так: устанавливают МХ в одно из положений (например, 1-е), когда нижний рычаг 4 западает в паз нижней шайбы 3. Затем отвертывают ручку 10, после чего валик запоминающего устройства 2 можно легко совместно с ИЭ установить в новое положение и снова застопорить ручкой 10.

Механизмы плавной настройки. По способу передачи движения от ручки настройки до ИЭ МХ бывают: с гибкой связью (ГС), фрикционные, зубчатые, червячные и винтовые. Кинематическая схема механизма наст-

точными ЗК, позволяющими уменьшить диаметр барабана, показана на рис. 4.66. Для данного МХ $L_{ш} = 0,0087 D_{бар} \omega_{ИЭ} i_{зп}$, мм; где $i_{зп} = z_5/z_4$; $n_{рч} = L_{ш}/\pi d_{шк}$.

Фрикционные МХ настройки обычно бывают двухскоростными. На рис. 4.67 показан шариковый планет-

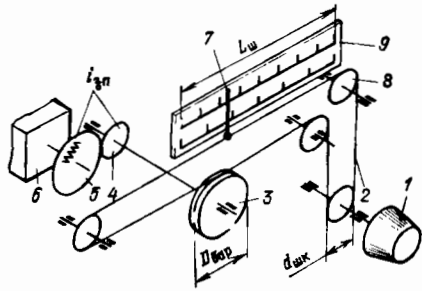


Рис. 4.66. Кинематическая схема механизма настройки с гибкой связью и зубчатыми колесами: 1 — ручки настройки; 2 — гибкая связь; 3 — барабан; 4, 5 — зубчатые колеса; 6 — исполнительный элемент; 7 — указатель; 8 — направляющие стойки; 9 — шкала

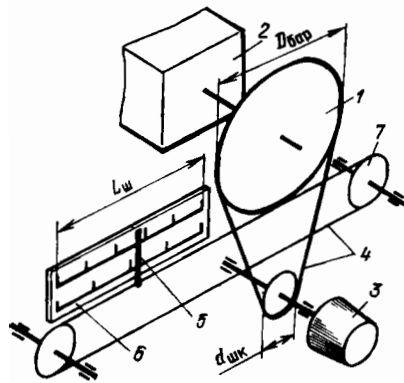


Рис. 4.65. Кинематическая схема настройки с гибкой связью: 1 — барабан; 2 — исполнительный элемент; 3 — ручка настройки; 4 — гибкая связь; 5 — указатель; 6 — шкала; 7 — направляющие стойки

ройки с ГС показана на рис. 4.65. Длина Ш данного МХ $L_{ш} = 0,0087 D_{бар} \omega_{ИЭ}$, мм, где $D_{бар}$ — диаметр барабана, мм; $\omega_{ИЭ}$ — рабочий угол поворота ИЭ, град.

Число оборотов ручки для перестройки в пределах всей шкалы $n_{рч} = L_{ш}/\pi d_{шк} = 0,00277 \omega_{ИЭ} D_{бар}/d_{шк}$, где $d_{шк}$ — диаметр шкива ручки.

Кинематическая схема с промежу-

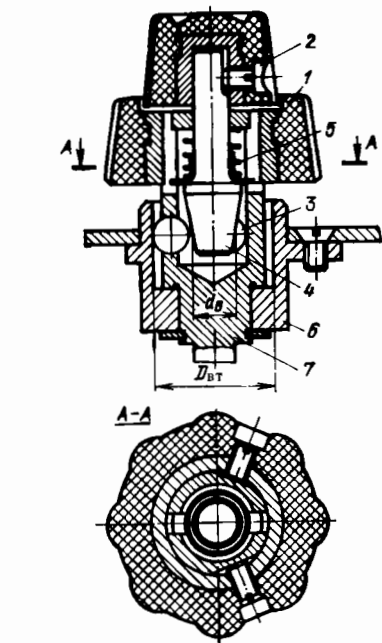


Рис. 4.67. Механизм настройки с планетарной фрикционной передачей

тарный механизм. Для грубой настройки используется ручка 1, передающая вращение непосредственно на ось 7 ИЭ. Для точной настройки используется ручка 2, вращающая валик 4 ПМ, осуществляющего замедление: $i = 1 + D_{вт}/d_v$, где $D_{вт}$ — диаметр втулки; d_v — диаметр валика в месте контакта шариков с конусом ($i = 3,5 \dots 5$).

Кинематическая схема ручной настройки радиоприемника, использующая для точной настройки шариковый ПМ, приведена на рис. 4.68. Ки-

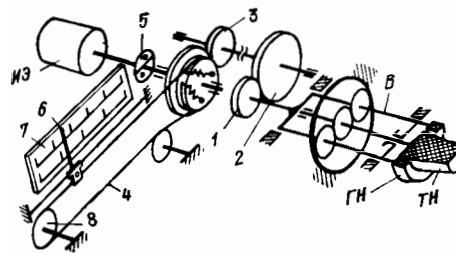


Рис. 4.68. Кинематическая схема приемника с гибкой связью и планетарным механизмом

нематическая схема односкоростного зубчатого механизма показана на рис. 4.69. Вращение с ручки 1 через две пары ЗК 2 передается на полушфту 3, соединяемую с ИЭ. Настройка МХ производится по Ш 4 относительно указателя 5. Между Ш 4 и полушфтой 3 для увеличения длины $L_{ш}$ применяется пара ЗК 6.

Кинематическая схема двухскоростного механизма настройки показана

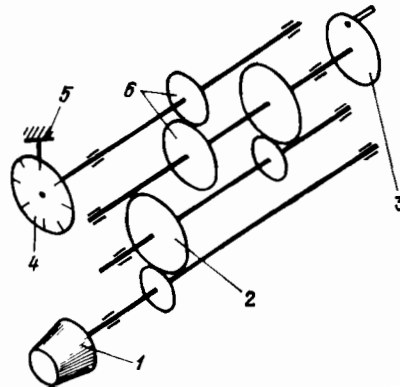


Рис. 4.69. Кинематическая схема односкоростного зубчатого механизма настройки

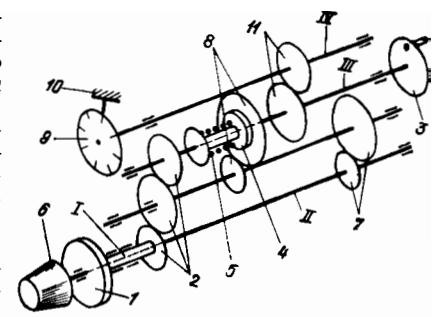


Рис. 4.70. Кинематическая схема двухскоростного зубчатого механизма настройки

на рис. 4.70. От ручки грубой настройки 1 вращение через ЗК 2 передается на полушфту 3, соединяемую с ИЭ. При этом ФМ 4, работающая под действием ПР 5, прокручивается вхолостую. При вращении ручки точной настройки 6 движение через ЗК 7 и 8 передается на ФМ 4, а далее на полушфту 3. При этом ручка грубой настройки 1 будет проворачиваться в обратную сторону. Настройка МХ производится по Ш 9 относительно указателя 10. Для увеличения длины Ш применяются ЗК 11.

На рис. 4.71,а показана кинематическая схема червячного МХ настройки, а на рис. 4.71,б — КС МХ с рейкой для поступательного перемещения ИЭ.

4.15. МЕХАНИЗМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Механизмы дистанционного управления, предназначенные для того, чтобы сигнал, соответствующий какой-либо физической величине (перемещению, частоте вращения и т. п.), передать на расстояние, состоят из датчика, приемника и линии связи [7]. При передаче сигнала такие МХ должны устанавливать однозначное соответствие этих величин на входе и выходе, их применяют для переключения каналов на требуемую частоту, индикации углового положения и в других случаях.

Электромеханические дистанционные передачи. Используют для настройки РЭА, имеющей дискретную секцию опорных частот, или для переключения поддиапазонов [5]. Пример МХ на шесть фиксированных положений показан на рис. 4.72. Он имеет ис-

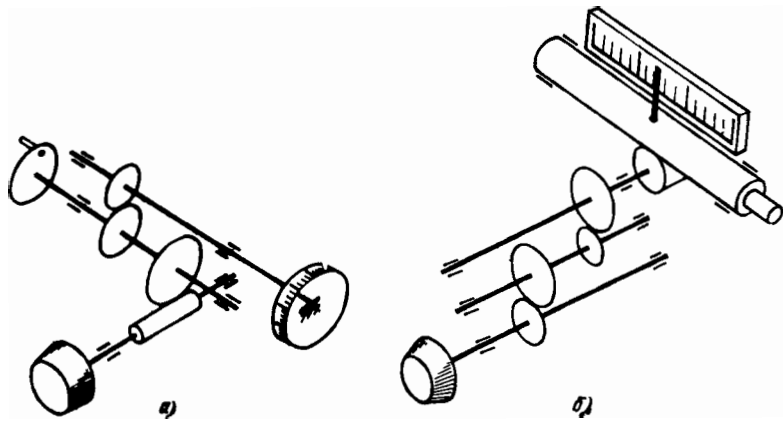


Рис. 4.71. Кинематическая схема механизма настройки с червячной (а) и реечной (б) передачами

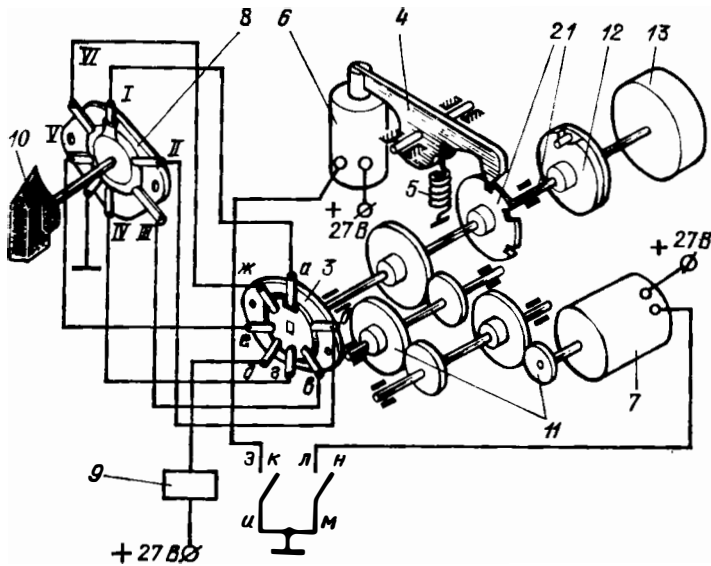


Рис. 4.72. Кинематическая схема дискретной дистанционной передачи

полнительный вал 1 (с подвижным элементом 2 фиксирующей пары с шестью пазами), который вращает ротор переключателя 3; рычаг 4, точно фиксирующий подвижный элемент 2 под действием ПР 5; ЭМ 6, который отводит рычаг 4 на время переключения; редуктор с ЭД 7, приводящий МХ в движение; систему коммутации (состоит из задающего переключателя 8, переключателя 3 и ре-

ле 9, расположенных в пульте управления). При установке задающего переключателя 8 пульта управления на любой из шести каналов с помощью ручки 10 напряжение через переключатель 3 подается на реле 9, которое замыкает контакты з-и и л-м, включая ЭМ 6 и ЭД 7. Движение через ЗК 11 подается на валик 1, который будет вращаться до тех пор, пока ротор переключателя 3 не

разорвет цепь питания реле 9. Контакты реле разомкнутся, т. е. прекратится питание ЭД 7 и ЭМ 6. Рычаг 4 под действием ПР 5 точно установит валик 1 в новое положение, соответствующее включенному каналу. Вместе с валиком 1 через поводковую МФ 12 на новом канале остановится переключатель диапазонов 13.

Дистанционные передачи с шаговым электродвигателем. ШЭД при работе сохраняют синхронизм при вращении и реверсе, допускают длительную фиксированную стоянку роторов, когда по обмоткам управления проходит постоянный ток [5]. При подаче питания в обмотку статора ШЭД и наличии рассогласования магнитных полей статора и ротора возникает синхронизирующий момент, который стремится переместить ротор в положение максимального потокосцепления возбуждаемых обмоток. Таким образом, при последовательном изменении токов в обмотке статора ротор перемещается синхронно с полем, а затем фиксируется при прекращении вращения поля. Питание ШЭД и его коммутацию осуществляют с помощью электронных коммутаторов. Отечественной промышленностью выпускаются ШЭД с угловым шагом 36; 22,5; 15; 3 и 1,5 град. Точность останова ШЭД $\Delta\theta \approx \arcsin M_n/M_{max}$, град, где M_n — момент сопротивления нагрузки; M_{max} — максимальный статический синхронизирующий момент.

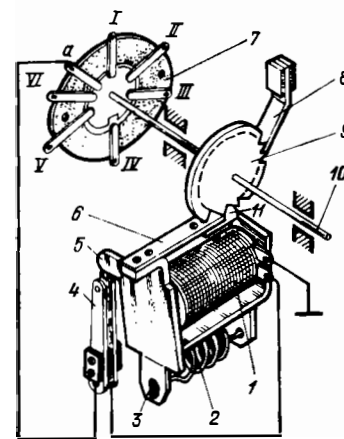


Рис. 4.73. Кинематическая схема дистанционной передачи с электромагнитным искателем

Дистанционные передачи с электромагнитным искателем. КС передачи приведена на рис. 4.73. Необходимый угол поворота В 10 обрабатывается с помощью ЭМ 1, обеспечивающего линейное перемещение якоря 3 с собачкой 11, используемое затем для вращения В 10 с ротором переключателя 7 от закрепленного на нем храпового колеса 9 до требуемого положения, когда система питания ЭМ 1 обесточивается. Собачка 11 соединена с якорем 3 пластинчатой ПР 6. В отведенном положении якорь удерживается винтовой ПР 2.

При подаче напряжения с пульта управления на какой-то контакт переключателя 7 (например, 1) оно через общий контакт (а) и замкнутую контактную группу 4 попадает на обмотку катушки ЭМ. Возникший в нем магнитный поток притягивает якорь 3 к его сердечнику. При этом собачка 11 перемещается на величину шага храпового колеса, а хвостик 5 якоря 3 размыкает контактную группу 4, которая обесточивает катушку ЭМ 1. Тогда под действием винтовой ПР 2 якорь возвращается в исходное положение, поворачивая при этом собачкой 11 храповое колесо 9 на один зуб. При отходе якоря от сердечника контактная группа 4 вновь замыкается и подает напряжение на ЭМ 1. Так продолжается до тех пор, пока ротор переключателя не разорвет цепь ЭМ. Вал 10 остановится в новом положении. Ограничитель 8 удерживает храповое колесо 9 от проворачивания при перемещении собачки вперед, т. е. при притягивании якоря к сердечнику ЭМ. Точность установки ИЭ в каждом положении будет определяться погрешностью фиксации храпового колеса собачкой 11 и ограничителем 8.

Сельсинные дистанционные передачи. Сельсинны представляют собой специальные индукционные малогабаритные электрические машины переменного тока. Основными преимуществами передач с сельсиннами является большой синхронизирующий момент и относительно малый момент трения [5]. В зависимости от конструкции применяемых сельсиннов передача может работать в индикаторном или трансформаторном режиме [7]. Сельсинные системы бывают одно- и двухскоростными. На рис. 4.74 приведена одна из кинематических схем двухскоростной следящей системы. В

пульте управления находится «грубый» 1 и «точный» 2 сельсинны — датчики, связанные между собой ЗП 4. Установка датчиков производится ручной настройкой 3 по шкале 5. Сельсинны 1 и 2 электрически связаны

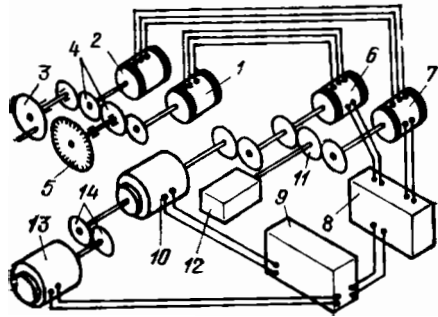


Рис. 4.74. Кинематическая схема сельсинной дистанционной передачи

с сельсиннами-приемниками 6 («грубый») и 7 («точный»), которые связаны через селектор сигнала 8 с усилителем 9. От напряжения с выхода усилителя вращается асинхронный ЭД 10, а через ЗП — роторы сельсиннов 6 и 7 и ИЭ 12. Сельсинны-приемники связаны между собой ЗП 11, имеющей то же передаточное отношение, что и сельсинны-датчики.

С помощью тахогенератора 13, связанного с ЭД 10 через ЗП 14, осуществляется отрицательная обратная связь по скорости — подачей напряжения с тахогенератора на вход усилителя 9, что обеспечивает устойчивость следящей системы. Недостатком сельсинной системы является относительно большое время перестройки [5, 7].

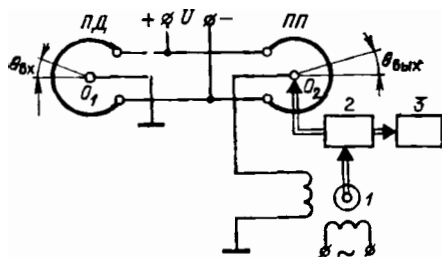


Рис. 4.75. Схема потенциометрической дистанционной передачи

Потенциометрические дистанционные передачи. Служат для плавной перестройки ИЭ и работают на принципе пропорциональной следящей системы, элементы которой соединены по мостовой схеме.

Схема потенциометрической дистанционной передачи приведена на рис. 4.75. Поворот потенциометра-датчика ПД на угол $\theta_{вх}$ вызывает напряжение разбаланса в диагонали O_1O_2 мостовой схемы, которое подается на ЭД 1. Вращение двигателя через редуктор 2 передается на ось потенциометра-приемника ПП и одновременно ИЭ 3. Вращение ЭД происходит до тех пор, пока за счет поворота оси на угол $\theta_{вых}$ мостовая схема не достигнет равновесного состояния, определяемого равенством произведений сопротивлений противоположных плеч, в результате чего напряжение дебаланса в диагонали моста между точками O_1O_2 будет равно нулю. Для устойчивой работы передачи в цепь диагонали моста подключают усилитель. Точность перестройки передачи, характеризующаяся углом рассогласования $\Delta\theta$, зависит от момента трения в передаче, момента нагрузки на приемнике, чувствительности потенциометров и других факторов. Обычно величина угла рассогласования лежит в пределах $\Delta\theta = 1 \dots 2^\circ$ [5].

4.16. МЕХАНИЗМЫ СИНХРОННО-СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

Синхронно-следящие системы являются разновидностью дистанционных передач, в которых для преодоления ЭД значительного момента нагрузки на ведомом В с целью обеспечения его питания применяют усилитель [7]. В такой системе задаваемой величиной является угол поворота входного (задающего) В, а регулируемой — угол поворота выходного (обрабатываемого) В, на котором расположен ИЭ (нагрузка). Задающим устройством такой системы являются сельсинны или потенциометры; устройством, приводящим в движение ИЭ, — ЭД, хотя могут применяться и гидронемопроводы.

В РЭА синхронно-следящие системы входят в системы автоматической подстройки частоты РЛС, системы настройки приемно-передающих

радиостанций и другие устройства. Синхронно-следящие системы бывают непрерывного и релейного действия. В системах непрерывного действия управление ЭД осуществляют непрерывно по определенному закону; в системах релейного действия — дискретно за счет срабатывания реле, входящего в цепь управления ЭД в моменты, когда ошибка угла достигает определенного значения.

Синхронно-следящие системы могут работать по двум принципиально различным циклам: разомкнутому и замкнутому. В системе, работающей по разомкнутому циклу (рис. 4.76)

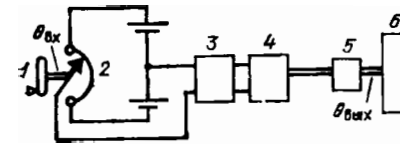


Рис. 4.76. Схема разомкнутой системы следящего привода

задающее устройство состоит из потенциометра 2, который связан с осью управляющего устройства 1. В результате поворота оси 1 на угол $\theta_{вх}$ на вход усилителя 3 подается напряжение, пропорциональное углу поворота $\theta_{вх}$. Усиленное напряжение поступает на исполнительный ЭД 4, который через редуктор 5 поворачивает В управляемого объекта 6 на угол $\theta_{вых}$. В идеальной системе $\theta_{вых} = \theta_{вх}$ во все моменты времени. В действительности из-за инерционности элементов схемы это равенство не соблюдается.

Системы, работающие по замкнутому циклу (рис. 4.77), отличаются тем, что в них угол поворота вала ИЭ 7,

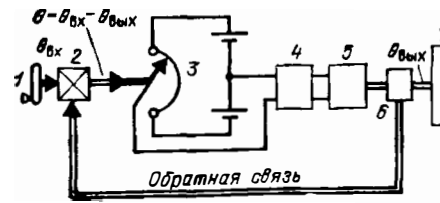


Рис. 4.77. Схема замкнутой системы следящего привода

равный $\theta_{вых}$, сравнивается с углом поворота $\theta_{вх}$ оси управляющего уст-

ройства 1, связанного с потенциометром 3, при помощи вводимого сравнивающего устройства 2. Получающаяся в результате сравнения разность $\theta = \theta_{вх} - \theta_{вых}$ в виде напряжения рассогласования поступает на вход усилителя 4. Усиленное напряжение подается на исполнительный ЭД 5, который через редуктор 6 поворачивает входной вал ИЭ до момента сведения разности $\theta_{вх} - \theta_{вых}$ к нулю. Процесс стабилизации носит колебательный характер, но при правильно подобранных характеристиках системы его показатели могут свидетельствовать об устойчивости процесса.

Основные требования к следящему приводу сводятся к обеспечению устойчивости и точности его работы. Передаточное отношение i редуктора следящего П выбирают таким, чтобы максимальная частота вращения его выходного В $\omega_{с max}$ обеспечивалась бы при вращении ЭД с номинальной частотой ω_n . т. е. $i = \omega_n / \omega_{с max}$. Уменьшение частоты вращения выходного В редуктора достигается снижением частоты вращения ЭД путем выбора соответствующей схемы регулирования. Для уменьшения нагрузки на элементы системы в переходном режиме ее инерционные характеристики должны выбираться из условия получения наименьшего динамического момента, а ЭД должен иметь необходимое отношение $T_{max} / T_n = \gamma$, где T_{max} и T_n — соответственно максимальный и номинальный вращающие моменты ЭД. Для следящего П рекомендуют $\gamma = 2,5 \dots 3$ [7]. Примером замкнутой системы этого П может быть П системы стабилизации по крену самолетной радиолокационной антенны (рис. 4.78). Угол крена самолета $\theta_{вх}$, обработанный гидровертикалью 1 и преобразованный с помощью потенциометра 2 сопротивлением R_1 в электрический сигнал, через шунтирующий резистор сопротивлением R_2 подается на вход усилителя 3. Полученное на выходе усилителя напряжение воздействует на управляющую обмотку ЭД 4, который через редуктор 5 обеспечивает поворот антенны 6 по крену до тех пор, пока связанный с ней потенциометр обработки 7, создающий на входе усилителя 3 напряжение противоположной полярности, не обеспечит на усилителе входной сигнал, равный нулю. При $R_2 =$

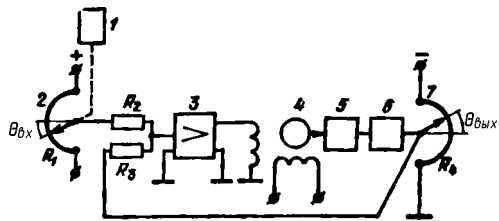


Рис. 4.78. Принципиальная схема следящего привода стабилизации антенны по курсу самолета

$=R_3$ это будет соответствовать равенству углов поворота щеток потенциометров 2 и 7, имеющих сопротивления R_1 и R_4 .

4.17. МЕХАНИЗМЫ ПРИВодОВ АНТЕНН РЛС

Приводы (обычно электромеханические) обеспечивают определенное движение антенны. Выбор типа П зависит от назначения и характеристик РЛС, вида объекта, на котором она устанавливается, степени стабилизации, допустимой массы, потребляемой мощности и т. д. В качестве передаточных МХ в П могут использоваться ЗП различных видов, кроме ЧП (из-за низкого КПД и повышенного МРХ). Так как П часто работают в системе реверса и управляются вспомогательными МХ, то к ним предъявляют требования ограничения МРХ, что требует учета работы П в широком диапазоне температур, а значит, выполнения условий температурной компенсации.

П антенны обзорной РЛС состоит из программного устройства, а также отдельных или совмещенных П азимута, угла места и стабилизации осевого и используют ЭД постоянного или переменного тока с питанием непосредственно от сети и управлением от программного устройства через комплекс усилитель — ЭД.

Выбор кинематической схемы привода зависит от габаритов и расположения привода на исполнительном МХ, требований по кинематической и динамической точности, МРХ, необходимости связи со вспомогательными устройствами (вращающими трансформаторами, тахогенераторами, порошковыми МФ и др.).

На рис. 4.79 изображена КС привода антенны самолетной РЛС. ЭД через трехступенчатый редуктор поворачивает на определенный угол зубчатый сектор, на В которого закреплен отражатель. На валу 3

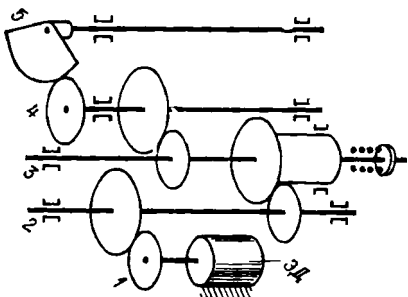


Рис. 4.79. Кинематическая схема привода антенны самолетной РЛС

установлена многодисковая предохранительная МФ, момент трения которой регулируется путем изменения деформации ПР посредством гайки. Валики 1, 2, 3, 4 устанавливаются на ШПШ. Расчет потребляемой мощности ЭД силового привода МХ РЭА и выбор его типа являются сложной задачей. Более подробно КС, конструкция и расчет приводов изложены в [7].

4.18. ЛЕНТОПРОТЯЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

В общем случае ЛПМ состоит из следующих узлов (У): подающего (служит для установки подающей катушки с Л и иногда обратного движения — перемотки); преобразования информации; транспортировки (ведущий У); приемного (содержит приемную катушку, на которую на-

матываются Л при рабочем ходе и осуществляется ускорения перемотки Л вперед); направляющих стоек и РЛ (располагаются вдоль лентопротяжного тракта); МХ привода (обеспечивает работу У транспортировки и приемного); стабилизации движения Л; органов управления; опорных элементов. Возможно совмещение функций некоторых У, либо их исключение.

В основном применяются ЛПМ с непрерывным рабочим движением ленты с заданной линейной скоростью. В качестве примера такого МХ на рис. 4.80 приведена схема ЛПМ магнитофона. Лента 2 с подающей катушки 1 протягивается транспортирующим У 4 через информационный У 3. Приемная катушка 5 осуществляет намотку Л, а направляющие РЛ 6 обеспечивают правильное положение Л. Транспортирующим У в такой схеме является пара фрикционных роликов: ведущего и прижимного.

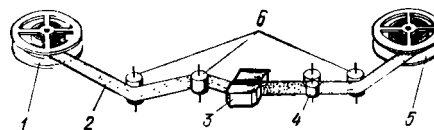


Рис. 4.80. Кинематическая схема ЛПМ с непрерывным движением ленты

Полный перечень рабочих операций ЛПМ: пуск Л; рабочий ход Л вперед с заданной скоростью или на заданную длину; рабочий ход назад с той же скоростью; ускоренный ход вперед; ускоренный ход назад; останов.

В зависимости от способа передачи крутящего момента от ЭД на ведущий ролик различают ведущие У прямого и косвенного приводов. В узле прямого привода ведущим является вал ЭД или посаженный на

него ведущий РЛ; ротор такого привода отличается простой конструкции, но ПШ ЭД нагружаются усилием прижатия Л. Кроме того, неравномерность вращения ЭД передается протыгиваемой Л, что является недостатком этой конструкции. В У косвенного привода ведущий РЛ устанавливаются на отдельных ПШ; он приводится во вращение ЭД через передаточный механизм. Для стабилизации вращения на оси ведущего В закрепляют маховик. Прижатие Л к ведущему РЛ осуществляют прижимным РЛ. Обычно ведущий РЛ выполняется стальным, а поверхность прижимного РЛ делают обрешиненной. Для повышения твердости ведущий РЛ термически обрабатывают и хромируют.

При расчете ЛПМ последовательно определяют распределение сил сопротивления и движения Л; силы сопротивления движению Л в рабочей зоне; вращающие моменты ЭД с учетом механических передач; геометрию ременных, фрикционных и зубчатых передач; время работы, пуска, остановки; частоты вращения; емкости кассеты.

Расчет сил сопротивления в рабочей зоне начинают с определения сил натяжения Л перед первой по ходу движения МГ

$$T_1 = qbR e^{\alpha f},$$

где q — удельное давление Л на МГ, Н/см² (выбирается из табл. 4.10); b — ширина Л или ширина контакта Л с МГ, см; R — радиус площадки контакта этой пары, см; α — угол обхвата МГ лентой, рад (от 10 до 20°); f — коэффициент трения Л по МГ.

Натяжение Л после последней МГ или неподвижной стойки

$$T_n = T_1 e^{(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \dots + \alpha_{n-1} f_{n-1})}.$$

Номинальная скорость Л, см/с, при фрикционном способе транспор-

Таблица 4.10

Удельное давление Л на МГ

Толщина Л, мкм	150	100	55	37	27	18	12 (9)
q , Н/см ²	0,9...1	0,7...0,8	0,55...0,6	0,35...0,4	0,2...0,25	0,15...0,18	0,08...0,1

тирования ведущим У прямого привода

$$v_{Л} = [\pi (d_B + \delta) (1 - S_K) n] / 60,$$

косвенного привода

$$v_{Л} = \{ \pi (d_B + \delta) [1 - (S_K + S_1 + S_2) n] / (60 i_1, i_2) \},$$

где d_B — диаметр ведущего В, см; δ — толщина Л, см; $S_K = 0,005 \dots 0,03$ — коэффициент упругого скольжения в зоне контакта ведущего В с Л; S_1, S_2 — коэффициенты упругого скольжения первой и второй ступеней фрикционного редуктора; n — частота вращения ведущего ЭД, мин⁻¹; i_1, i_2 — передаточное число первой и второй ступеней редуктора. Расчетные значения частоты вращения ведущих В без учета упругого скольжения в зоне контакта Л с ведущим В для стандартного ряда линейных скоростей ее движения приведены в [9, табл. 3.4].

Основным показателем приемных и подающих У является характеристический коэффициент $N = T_{max} / T_{min}$, где T_{max}, T_{min} — максимальные и минимальные натяжения Л. Чем ближе этот коэффициент к единице, тем лучше. Идеальным является случай, когда $N = 1$. Характеристикой приемных и подающих У является также частота вращения катушек, мин⁻¹, в зависимости от изменения D рулона Л при постоянных стандартных линейных скоростях ее движения [9, табл. 3.5].

Минимальная мощность двигателя привода ведущего ролика, Вт:

$$W = T_{рл} \omega_{рл} K / \eta,$$

где $T_{рл}$ — момент сил сопротивления вращению, приведенный к ведущему РЛ, Н·м; $\omega_{рл}$ — частота вращения ведущего РЛ, с⁻¹; η — КПД передаточного механизма; $K = 3 \dots 5$ — коэффициент надежности.

В МХ магнитной записи применяют синхронные и асинхронные двигатели переменного тока с частотой вращения 1000...3000 мин⁻¹ и ЭД постоянного тока с частотой вращения 2000...6000 мин⁻¹. ЭД ведущего РЛ должен обладать жесткой механической характеристикой. Электродвигатель с передачей движения на ведущий РЛ гибкой связью выбирают с частотой вращения 1000...1500 мин⁻¹, так как большие зна-

чения частоты вращения вызывают акустический шум и износ ПШ, а меньшие повышают неравномерность хода. Кассетные ЭД работают примерно в одинаковых условиях и для постоянства натяжения Л должны иметь мягкую механическую характеристику (серпесные ЭД).

Характерные КС некоторых ЛПМ. В КС бытового ЛПМ с одним электродвигателем двухдорожечного магнитофона (рис. 4.81) ведущий РЛ 2 является продолжением осн ЭД 1.

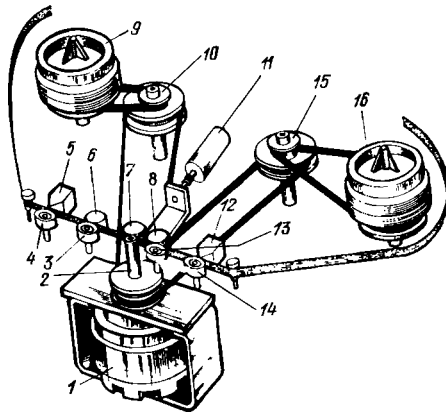


Рис. 4.81. Кинематическая схема ЛПМ двухдорожечного магнитофона

Узлы подмотки 16 и обратной перемотки 9 одинаковы и выполнены с применением электромагнитных ФМ. Передачу движения на У 9 и 16 осуществляют с помощью пассиков через промежуточные шкивы 15 и 10. Прижим Л к ведущему В 2 производят прижимным РЛ 7, а к МГ нижней дорожки 5 и 6 и верхней дорожки 8 и 12 — РЛ 4, 3, 13 и 14. Управление прижимным РЛ 7 происходит с помощью электромагнита 11. Натяжение ленты в режиме записи — воспроизведение осуществляют за счет создаваемого массой кассеты с лентой момента трения между подкассетником и шкивом при выключенных электромагнитных ФМ.

КС упрощенного ЛПМ дана на рис. 4.82. Вращение ЭД 8 передается двумя пассиками 7 и 4. Для увеличения угла обхвата шкива подающего У и изменения направления подающего 3 и приемного 5 У слу-

жит обводной РЛ 2. При рабочем ходе за счет ФМ приемный У подматывает Л, а подающий У натягивает Л у МГ 11 и 12. В режиме перемотки с помощью одного из обводных РЛ — (6 или 1) произ-

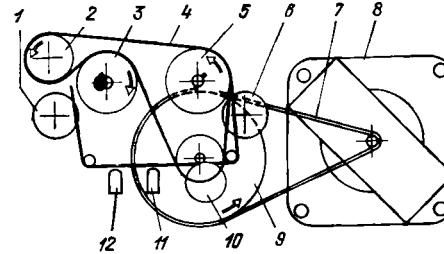


Рис. 4.82. Кинематическая схема ЛПМ с двумя пассиками

водится выключение ФМ соответствующего У. Для остановки и перехода с одного режима на другой движение Л тормозится ФМ. Применение двух пассиков позволяет упростить конструкцию ЛПМ и обеспечивает необходимую развязку между ведущим, подающим и приемным У ЛПМ.

В КС ЛПМ, приведенной на рис. 4.83, вращение от ЭД 7 передается У механизма одним пассиком 5. Под-

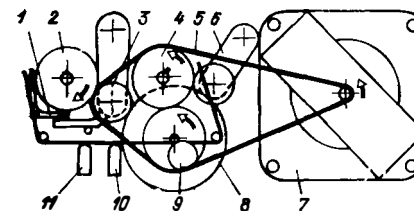


Рис. 4.83. Кинематическая схема ЛПМ с одним пассиком

мотка Л на приемный У 4 осуществляется ФМ, а требуемое натяжение Л на участке подающий У — ведущий В — с помощью специального тормоза 1. При перемотке вперед РЛ 6 выключает ФМ приемного У, натяжение Л обеспечивается тормозом 1. При перемотке назад обводной ролик 3 входит в зацепление со шкивом подающего У 2, передавая момент вращения ЭД подающему У, при этом требуемое натяжение

Л производится ФМ приемного У.

В КС ЛПМ с тремя электродвигателями кассетного магнитофона (рис. 4.84) вращение от ЭД 7 с помощью пассика 6 передается маховику ведущего У 4, установленного на плате 1. Сердечники кассеты 2 и 3 устанавливаются непосредственно на осях двух других ЭД. Требуемое натяжение при рабочем ходе Л осуществляется подачей небольшого напряжения на ЭД приемного и подающего У. При перемотках на соответствующий ЭД подается полное напряжение питания, подтормаживание при этом осуществляется шунтированием противоположного ЭД резистором небольшого сопротивления.

В КС ЛПМ кассетного магнитофона с закрытым трактом протяги-

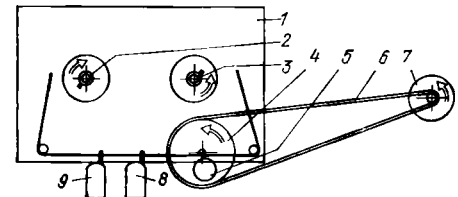


Рис. 4.84. Кинематическая схема ЛПМ с тремя электродвигателями

вания Л (рис. 4.85) [2] вращение от ЭД 1 передается маховикам ведущих У 12 и 6, подающему 2 и приемному 3 У с помощью пассика 8. Линейная скорость протягивания Л ведущим У 6 должна быть несколько большей, чем у ведущего

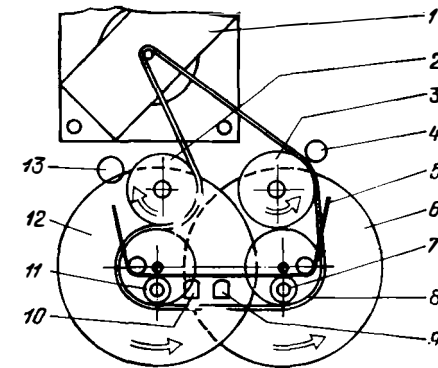


Рис. 4.85. Кинематическая схема ЛПМ кассетного магнитофона с закрытым трактом протягивания ленты

У 12. Натяжение L в зоне МГ определяется в основном этой разностью. Требуемое натяжение L на сердечниках кассет достигается применением ФМ. Ролики 4 и 13 выключают соответствующую ФМ при перемотках. При такой схеме МГ оказываются полностью защищенными от влияния подающего и приемного У. Однако при конструировании такого ЛПМ возникают трудности, связанные с размещением стирающей головки 10, которая из-за малых размеров окошек кассеты получается достаточно сложной.

В ЛПМ для осуществления постоянства средней скорости v ленты с увеличением радиуса рулона ρ применяются наматыватели, у которых обеспечивается проскальзывание ведомого элемента относительно ведущего. Наиболее распространены три типа наматывателей с фрикционными сухого трения. У 1-го типа наматывателя (рис. 4.86,а) с постоянным вращающим моментом трения между ведущим 3 и ведомым 2 звеньями создается за счет усиления 4. Фрикционное кольцо 5 при-

клеено к жестко укрепленному на В 1 диску 2. Момент трения при постоянном усилии ПР Q постоянный $M_{тр} = 2fQ(R_2^3 - R_1^3) / 3(R_2^2 - R_1^2)$, где f — коэффициент трения скольжения между трущимися поверхностями; R_1 и R_2 — наименьший и наибольший радиусы кольца трения. Натяжение подмотки $P_n = M_{тр} / \rho$, где $\rho = \sqrt{l^2 \delta \mu / \pi + r^2}$. Здесь l — длина L ; δ — толщина L ; μ — коэффициент заполнения, учитывающий неплотность намотки ($\mu = 1,05 \dots 1,10$); r — радиус сердечника приемной катушки. Характеристика наматывателя 1-го типа показана на рис. 4.86,б.

Узел 2-го типа наматывателя с переменным вращающим моментом дан на рис. 4.87,а. Трение между ведущим шкивом 1 и ведомым подкассетником 3 с фетровым кольцом 2 создается за счет сил тяжести катушки G_1 , ленты, намотанной на катушку, G_2 и подкассетника G_3 :

$$M_{тр} = 2f(G_1 + G_2 + G_3) \times (R_2^3 - R_1^3) / 3(R_2^2 - R_1^2),$$

где $G_2 = q_1 l$, q_1 — сила тяжести 1 м ленты.

Варьируя силу тяжести подкассетника, можно добиться выполнения условия (рис. 4.87,б): $P_{n1} = P_{n2} = P_{n \text{ нач}} = P_{n \text{ кон}}$.

Третий тип наматыватели (рис. 4.88) скомбинирован из первых двух. В этом случае в У намотки применяется ПР для создания постоянного момента трения, но кроме того, момент трения создается и силой тяжести катушки с лентой [10].

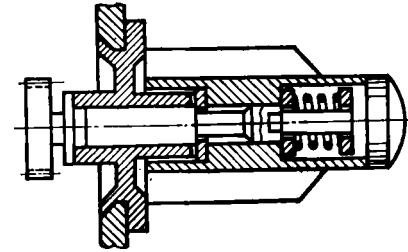


Рис. 4.88. Конструкция 3-го типа наматывателя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элементы приборных устройств/Под ред. О. Ф. Тищенко. — М.: Высшая школа, 1978.

2. Кругликов Д. А. Любительские кассетные магнитофоны. — М.: Энергия. 1978.

3. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. — М.: Машиностроение, 1981.

4. Первицкий Ю. Д. Расчет и конструирование точных механизмов. — Л.: Машиностроение, 1976.

5. Пименов А. И. Механизмы настройки РЭА. — М.: Высшая школа, 1977.

6. Рошин Г. И. Конструирование механизмов радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Высшая школа, 1973.

7. Рошин Г. И. Несущие конструкции и механизмы РЭА. — М.: Высшая школа, 1981.

8. Справочник конструктора точного приборостроения/Под ред. Ф. Л. Литвина. — М. — Л.: Машиностроение, 1964.

9. Справочник по технике магнитной записи/Под ред. О. В. Порицкого, Е. Н. Травникова. — Киев: Техника, 1981.

10. Варламов Р. Г. Основы художественного конструирования аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1967.

5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ

Основные аббревиатуры

ЭД	— электродвигатель
АЭД	— асинхронный электродвигатель
ВЭД	— волновой электродвигатель
ДКР	— электродвигатель с катящимся ротором
СЭД	— синхронный электродвигатель
ШЭД	— шаговый электродвигатель
ЭММ	— электромагнитная муфта
ГЭММ	— гистерезисная электромагнитная муфта
ЗЭММ	— зубчатая электромагнитная муфта
ИЭММ	— индукционная электромагнитная муфта
ПЭММ	— порошковая электромагнитная муфта

ФЭММ	— фрикционная электромагнитная муфта
ИП	— источник питания
ИЭ	— исполнительный элемент
КФ	— конструктивный фактор
НС	— намагничивающая сила
ПВ	— продолжительность включения
САР	— система автоматизированного регулирования
САУ	— система автоматизированного управления
ФВ	— фазовращатель
ЧПУ	— числовое программное управление
ЭМ	— электромагнит
ЭМП	— электромагнитный привод
ЭМУ	— электромагнитное устройство
ЭСФ	— элемент смещения фазы напряжения на 90°

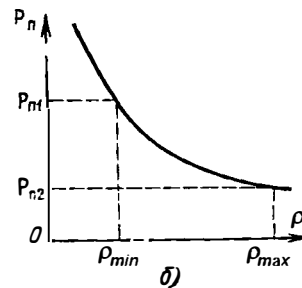
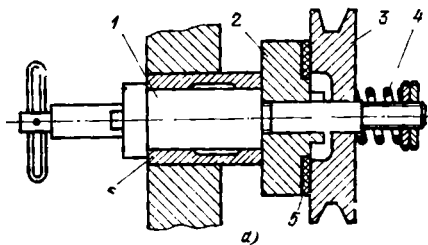


Рис. 4.86. Конструкция 1-го типа наматывателя (а) и его характеристика (б)

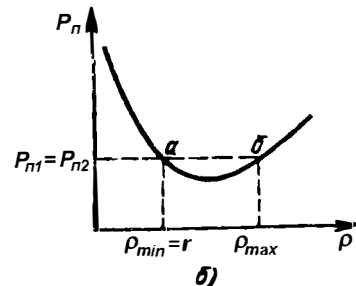
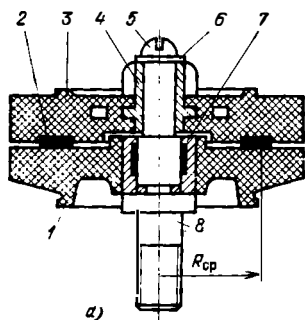


Рис. 4.87. Конструкция 2-го типа наматывателя (а) и его характеристика (б)

5.1. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Электродвигатели малой мощности (до 750 Вт) подразделяют на исполнительные (ЭД САР, САУ, следящих приводов РЭА) и силовые приводные ЭД. Исполнительные ЭД работают в переходном режиме с частыми пусками, остановами, реверсом. Характеризуются высоким быстродействием, малой инерционностью, широким диапазоном регулирования частоты вращения, стабильностью характеристик, малым моментом трения, малой мощностью управления, отсутствием самохода, высокой надежностью и сравнительно высокими КПД и коэффициентом мощности. Силовые ЭД работают в установившемся режиме. Имеют высокие энергетические показатели, большой срок службы, низкую стоимость, а также достаточное быстродействие и стабильность характеристики.

Электродвигатели различают по величине и виду напряжения питания (постранный, одно- и многофазное переменное); стабильности частоты вращения при изменении нагрузки (асинхронные и синхронные); характеру вращения ротора (непрерывное или дискретное на фиксированный угол, шаг); конструктивными особенностями и принципу действия.

Электродвигатели характеризуются следующими параметрами: частотой вращения; номинальной n , холостого хода n_0 , синхронной n_c ; номинальным M и пусковым M_n моментами вращения; перегрузочной способностью M_{max}/M ;

потребляемой P_1 , выходной (на валу) $P_в$ и управляющей P_y мощностями; КПД $\eta = P_в/P_1$; коэффициентом мощности $\cos \varphi$; напряжениями питания (возбуждения) $U_1(U_в)$, управления U_y , трогания $U_{тр}$ и частотой f ; моментами инерции ротора J_p и нагрузки J_n ; электромеханической постоянной времени τ_m ; временем разгона t_p ; массой G , габаритами, стоимостью; механической характеристикой $n = n(M)$ (оценивается жесткостью); регулировочной характеристикой $n = n(U_y)$ (оценивается линейностью).

В качестве исполнительных ЭД чаще всего применяют ЭД= независи-

мого возбуждения, двухфазные и совмещенные АЭД, ШЭД; в качестве силовых — ЭД= коллекторные и бесконтактные, одно- и трехфазные АЭД, СЭД, универсальные коллекторные.

Электродвигатели постоянного тока

Различают ЭД= с электромагнитным возбуждением (независимым, параллельным, последовательным, смешанным) от обмоток возбуждения и с магнитоэлектрическим возбуждением от постоянных магнитов. Последние не требуют ИП для возбуждения, их магнитный поток мало зависит от температуры, они имеют сравнительно высокий КПД и наименьшую массу на единицу мощности (рис. 5.1). Их недостаток — быстрое

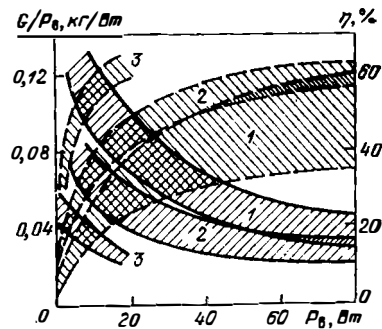


Рис. 5.1. Зависимости массы на единицу мощности (сплошные линии) и КПД (штриховые линии) от мощности на валу: 1 — область для ЭД_~; 2 — для коллекторных ЭД_~; 3 — для ЭД_~ с постоянными магнитами

старение, сравнительно высокая стоимость постоянных магнитов, малая мощность (до нескольких десятков ватт). Механические характеристики различных ЭД= показаны на рис. 5.2.

Схемы управления исполнительными ЭД= показаны на рис. 5.3. Они существенно влияют на характеристики ЭД (рис. 5.4). Последние построены в относительных единицах: $\alpha = U_y/U_в$ (в процессе управления коэффициент сигнала α может изменяться от 0 до 1,25); $n^1 = n/n_0$; $M^1 = M/M_n$.

Якорное управление ЭД= обеспечивает линейность механических и регулировочных характеристик; однозначность регулировочной харак-

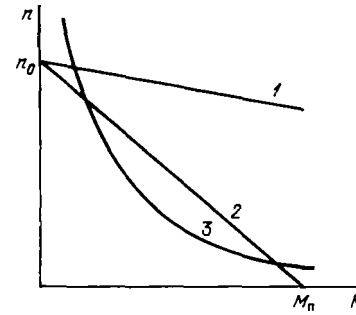


Рис. 5.2. Механические характеристики различных ЭД=: 1 — силовые ЭД= с независимым возбуждением; 2 — исполнительные ЭД= с параллельным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов; 3 — ЭД= с последовательным возбуждением

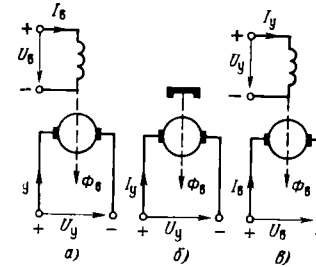


Рис. 5.3. Схемы якорного электромагнитного (а) и магнитоэлектрического (б) и полюсного (в) управления ЭД=

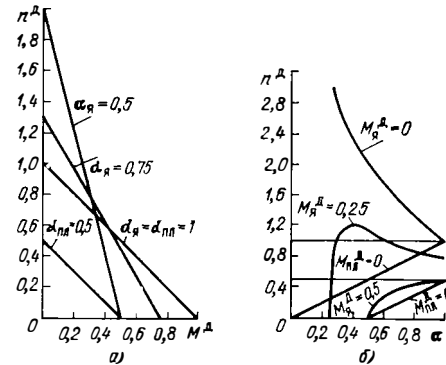


Рис. 5.4. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики исполнительного ЭД= с якорным и полюсным управлением

теристики при всех значениях M ; большую крутизну механической характеристики (более быстрый разгон якоря); параллельность механических характеристик (однаковое время разгона при всех коэффициентах сигнала управления); меньшие потери при неподвижном якоре (его обмотка при этом отключается, а потери в обмотке возбуждения невелики, при возбуждении же от постоянных магнитов потери при неподвижном якоре отсутствуют); предотвращение подгорания коллектора при неподвижном якоре; меньшую индуктивность цепи управления (способствует более быстрому прогнанию переходных электромагнитных процессов); отсутствие самохода.

Основным достоинством полюсного управления является меньшая мощность управления. Оно применяется (сравнительно редко) для управления ЭД= небольшой мощности, при этом момент нагрузки M_n не должен быть ниже 50% от M_n при номинальном U_y .

Основные достоинства ЭД=: высокое использование объема; в 2—4 раза меньше габариты и масса, чем у ЭД_~; отсутствие самохода и устойчивость механической характеристики; высокая степень линейности регулирования (даже при ударной нагрузке); широкий диапазон плавного регулирования n ; большой M_n ; высокое быстродействие.

Недостатки ЭД=: наличие прерывистого контакта между щетками и коллектором (радиотехнические помехи); коммутационное искрение; большие по сравнению с ЭД_~ габариты и масса усилительных устройств.

В бесконтактных ЭД= функции коллектора и щеток выполняют более надежные полупроводниковые коммутаторы, которые обеспечивают также функции управления ЭД, регулируют частоту вращения, осуществляют реверс, пуск и торможение. Они не создают акустических и радиопомех, допускают пространственное разделение коммутатора и силовой части ЭД, но обладают худшими массогабаритными и стоимостными показателями.

Из обширной номенклатуры серий ЭД= малой мощности: ДПМ, ДПР, СЛ, ПЛ, Д, ДП, ДК, МИ, ПБС, ДВИ, БК, ДБ, ДБУ, ПЯ и других

[2, 9, 10] в РЭА и средствах автоматизации чаще используют ЭД=серий ДПМ, ДПР [6].

Четырехгабаритная серия ДПМ — двухполюсные приводные ЭД с возбуждением от постоянного магнита. Шестигабаритная серия ДПР — исполнительные ЭД= с полым малоинерционным немагнитным якорем для САУ и САР. Коллекторные ЭД= серии ДП исполнений Р09 и Р11 (табл. 5.1, 5.2, рис. 5.5) дешевле ДПМ и ДПР, предназначены для работы в качестве силовых ЭД в приводах различных механизмов (исполнение Р09) и в качестве силовых и исполнительных ЭД в следящих системах и приводах различных механизмов (исполнение Р11).

Электродвигатели работают при следующих условиях: температура окружающего воздуха от -50 до +60°С; относительная влажность 98% при 25°С; атмосферное давление не ниже 53 600 Па; вибрационные нагрузки с частотой 1...200 Гц при ускорении 49,1 м/с²; многократные ударные нагрузки с ускорением 147 м/с² длительностью 2...15 мс.

Сокращенное и полное условные обозначения ЭД — по ГОСТ 23264—78. ЭД изготавливаются с одним или двумя выходными валами (ГОСТ 12080—66); исполнение закрытое, степень защиты IP44 (ГОСТ 17494—72); исполнение по способу

монтажа 1М3681 и 1М3682 (ГОСТ 2479—79). Направление вращения вала левое или правое. Реверсирование ЭД без предварительной остановки вала не допускается. Режим работы продолжительный, отдельные типоразмеры исполнения Р09 имеют режим работы повторно-кратковременный. Значение t_m исполнения Р11 в нормальных климатических условиях 0,025 с. Гарантийный срок эксплуатации 2,5 г со дня начала эксплуатации и не более 3 лет со дня отгрузки ЭД.

Новой разработкой являются ЭД=серии ДБУ — бесконтактные со встроенным редуктором; предназначены для работы в следящих системах и маломощных ЭМП различного назначения. По устойчивости к механическим воздействиям, воздействию температуры, влажности и по защищенности от внешней среды соответствуют ГОСТ 12997—76 группе 3. Выполнены в виде двух конструктивных элементов — электромеханической части (с редуктором или без него) и полупроводникового коммутатора. Широкие функциональные возможности ЭД обусловлены тремя каналами управления: импульсным, амплитудным и реверса.

Условное обозначение, например ДБУ-0,6-10,5 или ДБУ-1,0-171, состоит из наименования серии ДБУ, номинальной мощности на валу (0,6 или 1,0 Вт), передаточного числа редуктора ($i_{ред}$ =4; 10,5; 32,1; 81; 171). При отсутствии редуктора условное обозначение состоит только из первых двух групп знаков.

Основные технические данные следующие: номинальная частота вращения при мощности 0,6 Вт 2400 (без редуктора); 575, 219, 72, 28, 14 мин⁻¹ с соответствующим $i_{ред}$; при мощности 1 Вт — 2700, 650, 248, 81, 32, 15 мин⁻¹ с соответствующим $i_{ред}$; напряжение питания 24 В;

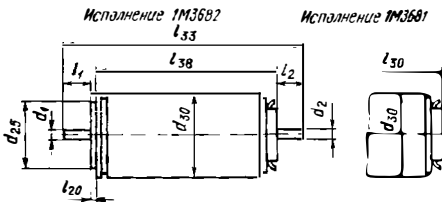


Рис. 5.5. Основные размеры ЭД=серии ДП

Тип	d_1	d_2	d_{25}	d_{30}	l_1	l_2	l_{20}	l_{30}	l_{33}	l_{38}	G, кг
ДП20-1М3681/1М3682-Р09/Р11	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	0,056/0,083
ДП25-1М3681/1М3682-Р09/Р11	3	-/3	20	25	10	-/10	1,6	79,6	89,6	68	0,10/0,15
ДП32-1М3681/1М3682-Р09/Р11	4	-/4	25	32	12	-/12	2,0	94	106	80	0,19/0,32
ДП40-1М3681/1М3682-Р09/Р11	—	—	—	40	—	—	—	—	—	—	0,32/0,60

Примечания. Размер в числителе относится к исполнению 1М3681, в знаменателе — к исполнению 1М3682. Масса ЭД в числителе относится к исполнению Р09, в знаменателе — к исполнению Р11.

Таблица 5.1

Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии ДП исполнения Р09

Тип	$M \times 10^{-4}$, Н·м	I , А	$M_n \times 10^{-4}$, Н·м	η , %	Наработка, ч
ДП20-0,6-4-6-1М3681/1М3682-Р09	—	—	—	40	1000
ДП20-1,6-6-6-1М3681/1М3682-Р09	—	—	32	42	500
ДП20-1,6-10-6-1М3681/1М3682-Р09	—	—	43	45	100
ДП20-0,6-4-12-1М3681/1М3682-Р09	—	—	25	37	1000
ДП20-1,6-12-1М3681/1М3682-Р09	—	—	43	42	500
ДП20-1,6-10-12-1М3681/1М3682-Р09	—	—	69	45	100
ДП20-1,6-27-1М3681/1М3682-Р09	—	—	39	41	500
ДП20-1,6-10-27-1М3681/1М3682-Р09	—	—	66	45	100
ДП25-1,6-3-12-1М3681/1М3682-Р09	50	0,32	88	48	1000
ДП25-2,5-6-12-1М3681/1М3682-Р09	39	0,42	152	56	500
ДП25-4-10-12-1М3681/1М3682-Р09	38	0,65	210	57	100
ДП25-1,6-3-27-1М3681/1М3682-Р09	50	0,15	85	47	1000
ДП25-2,5-6-27-1М3681/1М3682-Р09	39	0,18	170	57	500
ДП25-4-10-27-1М3681/1М3682-Р09	38	0,29	200	57	250
ДП32-4-3-12-1М3681/1М3682-Р09	128	0,65	290	59	750
ДП32-6-6-12-1М3681/1М3682-Р09	98	0,88	422	62	250
ДП32-10-10-12-1М3681/1М3682-Р09	98	1,40	560	64	100
ДП32-4-3-27-1М3681/1М3682-Р09	128	0,30	255	56	750
ДП32-6-6-27-1М3681/1М3682-Р09	98	0,39	420	63	250
ДП32-10-10-27-1М3681/1М3682-Р09	98	0,64	590	63	100
ДП40-10-3-12-1М3681/1М3682-Р09	—	—	670	63	100
ДП40-16-6-12-1М3681/1М3682-Р09	—	—	933	70	100
ДП40-10-3-27-1М3681/1М3682-Р09	—	—	638	61	500
ДП40-16-6-27-1М3681/1М3682-Р09	—	—	933	68	250
ДП40-25-10-27-1М3681/1М3682-Р09	—	—	1275	70	100

Примечание. В условном обозначении типа первая группа знаков (две цифры) — диаметр корпуса, мм, вторая — номинальная мощность ЭД на валу, Вт, третья — номинальная частота вращения, 1000 мин⁻¹, четвертая — номинальное напряжение питания, В, группа знаков 1М3681/1М3682 — соответствующий способ монтажа по ГОСТ 2479—79, последняя группа знаков — исполнение ЭД.

Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии ДП исполнения Р11

Тип	$M \times 10^{-4}$, Н·м	i , А	$M_n \times 10^{-4}$, Н·м	η , %	Наработка, ч
ДП20-1-4-12-1М3681/1М3682-Р11	—	—	73,5	51	2000
ДП20-1-6-6-12-1М3681/1М3682-Р11	—	—	93	55	1000
ДП25-2-5-4-12-1М3681/1М3682-Р11	59	0,39	215	60	2000
ДП25-4-6-12-1М3681/1М3682-Р11	64	0,60	265	62	1000
ДП25-2-5-4-27-1М3681/1М3682-Р11	59	0,17	195	59	2000
ДП25-4-6-27-1М3681/1М3682-Р11	64	0,27	295	63	1000
ДП32-6-3-12-1М3681/1М3682-Р11	190	0,96	510	60	2000
ДП32-10-6-12-1М3681/1М3682-Р11	157	1,34	930	70	1000
ДП32-6-3-27-1М3681/1М3682-Р11	190	0,42	640	63	2000
ДП32-10-6-27-1М3681/1М3682-Р11	157	0,57	930	71	1000
ДП40-16-3-12-1М3681/1М3682-Р11	—	—	1720	69	1000
ДП40-25-6-12-1М3681/1М3682-Р11	—	—	1960	76	750
ДП40-16-3-27-1М3681/1М3682-Р11	—	—	1720	68	1500
ДП-40-25-6-27-1М3681/1М3682-Р11	—	—	2260	75	1000

Примечание. См. примечание к табл. 5.1.

$\tau_m \leq 0,015$ с; J_p (без редуктора) $0,95 \cdot 10^{-6}$ кг·м²; КПД не менее 25%; срок службы 10 лет; средний ресурс до списания 25 000 ч; габаритные размеры: электромеханической части без редуктора $\varnothing 25 \times 60$; редуктора $\varnothing 25 \times 25$; коммутатора $90 \times 90 \times 20$ мм; масса электромеханической части 0,3, редуктора 0,07 и коммутатора 0,08 кг.

Электродвигатели переменного тока

В силовых и управляемых ЭД различают АЭД и СЭД, которые могут быть с механической, электромагнитной или с обонми видами редукций.

Силовые (одно- и трехфазные, а также универсальные) АЭД имеют жесткую механическую характеристику и применяются в нерегулируемых ЭМП, где требования к стабильности n сравнительно невелики. Однофазные ЭД по сравнению с трехфазными, а также универсальные при однофазном включении по сравнению с трехфазным включением имеют худшие технико-экономические характеристики (например, их M меньше на 15...30%). Силовые АЭД часто выпускаются на повышенные частоты: 400, 500, 1000 Гц, что позволяет уменьшить габариты и массу, увеличить n .

Управляемые АЭД (двухфазные с короткозамкнутым ротором в виде «беличьей клетки» и полым ротором — ферромагнитным или немагнитным) имеют мягкую механическую характеристику и широко применяются в регулируемых ЭМП и следящих системах. АЭД с короткозамкнутым ротором характеризуются более высокими энергетическими показателями, чем ЭД с полым ротором, надежностью, меньшими массой и габаритами. Из-за большего J_p , худшего быстродействия и большего $U_{тр}$ их целесообразно применять в относительно маломощных ЭМП, а ЭД с полым ротором — в более мощных.

Электродвигатели с полым немагнитным ротором характеризуются наименьшим J_p , лучшим быстродействием, малым $U_{тр}$, плавностью и бесшумностью хода, малой нелинейностью механических и регулировочных характеристик (до 5...15%), что обеспечивает устойчивую работу

в большом диапазоне изменения n ($n_{max}/n_{min}=100 \dots 200$). Их КПД всего 20...40% в номинальном режиме и уменьшается в режиме управления, соэф низкий, масса и габариты большие.

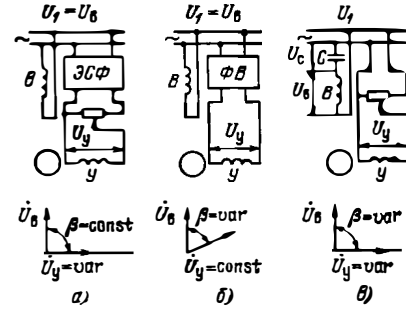


Рис. 5.6. Схемы включения исполнительных АЭД при различном управлении:

а — амплитудном; б — фазовом; в — амплитудно-фазовом

Электродвигатели с полым ферромагнитным ротором характеризуются отсутствием самохода, большей линейностью механических и регулировочных характеристик. Из-за больших J_p и $U_{тр}$ их применение в регулируемых ЭМП ограничено.

Управление исполнительными АЭД может производиться различными способами (рис. 5.6). Механические и регулировочные характеристики исполнительных АЭД в относительных единицах при различных способах управления приведены на рис. 5.7, а на рис. 5.8 показаны зависимости мощности управления от коэффициента сигнала при различных способах управления. Сопоставление свойств исполнительных ЭД показывает, что при всех способах управления механические характеристики нелинейны до 10%, регулировочные — до 20%; механические характеристики устойчивы во всем диапазоне изменения коэффициента сигнала; M_n ЭД прямо пропорционален сигналу управления и в относительных единицах равен эффективному коэффициенту сигнала; небольшие M и P_b развиваются ЭД при амплитудно-фазовом управлении; по P_u экономичны ЭД с амплитудным и амплитудно-фазовым управлением; эти же ЭД имеют и наибольший КПД; из-за более просто-

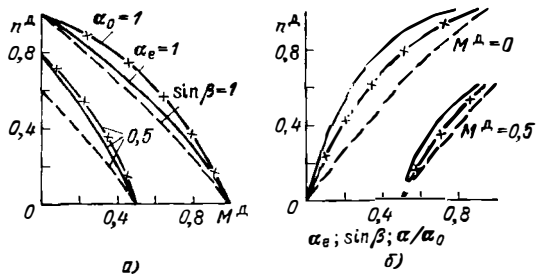


Рис. 5.7

Рис. 5.7. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики исполнительных АЭД при амплитудном (—), фазовом (---) и амплитудно-фазовом (-X-X) управлении

Рис. 5.8. Зависимости мощности управления ЭД от коэффициента сигнала при амплитудном (—), фазовом (---) и амплитудно-фазовом (-X-X) управлении

го управления амплитудно-фазовый способ получил наиболее широкое распространение.

Промышленность выпускает обширную номенклатуру различных серий АЭД малой мощности — силовые: однофазные (АД, ДАП, КД, МО), трехфазные (ДАТ, АПН, 4А),

универсальные (УЛ); управляемые (ДИД, ДГ, ДАМ, ДАУ, АДП, АД, ИД, ИЭ, ДКИ, ЭМ) [2, 6, 9, 10]. В последнее время разработаны и внедряются силовые АЭД с короткозамкнутым ротором серии ДА (ДАТ — трехфазные, ДАО — однофазные), отличающиеся меньшими

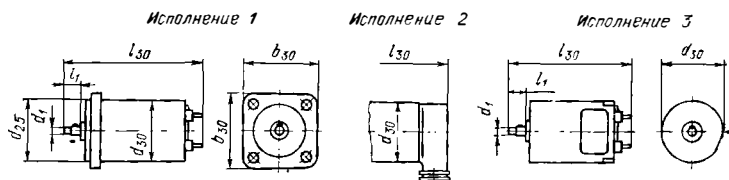


Рис. 5.9. Основные размеры ЭД серии ДА

Габарит	Исполнение						Исполнение		
	b_{30}	d_1	d_{25}	d_{30}	l_1	l_{30}			
	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1	2	3	
ДА11	36	3	32	32	10	66	98	—	
ДА21	47	4	40	40	12	84	102	84	
ДА22	47	4	40	40	12	94	114	94	
ДА31	56	5	50	50	14	88	110	88	
ДА32	56	5	50	50	14	102	124	102	
ДА41	66	6	60	60	16	103	120	103	
ДА42	66	6	60	60	16	118	135	118	
ДА51	86	8	80	80	20	119	141	119	
ДА52	86	8	80	80	20	144	170	144	
ДА53	86	8	80	80	20	173	—	—	
ДА61	106	9	95	100	20	145	—	145	
ДА62	106	9	95	100	20	170	195	170	
ДА71	126	10	120	120	30	185	—	—	

габаритами, высокой теплостойкостью, большой гарантийной наработкой. ЭД предназначены для работы в приводных устройствах. Серия охватывает диапазон мощностей от 1,6 до 750 Вт. Они рассчитаны для работы при температуре окружающего воздуха от -60 до $+100^\circ\text{C}$; относительной влажности 98% при 35°C ; атмосферном давлении не ниже 667 Па; вибрационных нагрузках с частотой 5...2000 Гц при ускорении 98,1 м/с²; многократных ударных нагрузках с ускорением до 392 м/с² длительностью 2...10 мс (рис. 5.9).

В условном обозначении ЭД (например, ДАТ 42271) буквы и цифры означают: буквы ДАТ (или ДАО) — двигатель асинхронный трехфазный (или однофазный); первая цифра — порядковый номер габарита (1...7); вторая цифра — длину в габарите (1...3); третья цифра — синхронную частоту вращения (1—1500, 2—3000, 4—6000, 5—8000, 6—12000, 9—15000 мин⁻¹); четвертая цифра — напряжение питания (1—36, 2—40, 5—127, 7—220, 8—380 В); пятая цифра — конструктивное исполнение (1 — фланцевое с открытыми контактными клеммами, 2 — фланцевое с защитным кожухом на торцевой поверхности, имеющей контактные клеммы, 3 — с креплением по цилиндрической поверхности корпуса); цифра после тире (при ее наличии) — электрическую модификацию (1 — повышенным пусковым моментом).

Исполнение ЭД закрытое; выходной конец вала — один; крепление фланцевое (исполнения 1, 2) или по цилиндрической поверхности корпуса (исполнение 3); рабочее положение в пространстве произвольное; режим работы продолжительный; га-

рантийная наработка 5000 ч для ЭД на частоты 400 и 1000 Гц; 10 000 ч для ЭД на частоту 50 Гц.

Синхронные электродвигатели

Применяются в устройствах, где требуются постоянная частота вращения и абсолютно жесткая механическая характеристика (в лентопротяжных механизмах, самопишущих приборах, программных и часовых механизмах и т. п.).

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (рис. 5.10,а) обладают хорошими энергетическими показателями — КПД, $\cos \varphi$, большей удельной мощностью на единицу массы, повышенной перегрузочной способностью, стабильностью n , хорошей синфазностью вращения, что особенно важно в групповых приводах. Недостатками являются худшие пусковые характеристики (меньший M_n и большая кратность пускового тока), а также большая стоимость.

Реактивные СЭД (рис. 5.10,б) нашли широкое применение. Они просты, конструктивно надежны в работе, дешевы, однако имеют невысокие энергетические показатели: КПД=5...50%, $\cos \varphi=0,2...0,5$, сравнительно небольшие развиваемые моменты $M_n=(1,0...1,5)M$, $M_{max}=(1,2...2,2)M$, чувствительны к колебаниям $U_{пт}$.

Гистерезисные СЭД (рис. 5.10,в) имеют весьма ценные качества: большой M_n , постоянный на период пуска; высокий КПД (до 60%), плавность входа в синхронизм при больших J_n ; незначительные изменения тока — на 20...30% от пуска до холостого хода и на 1...3% от холостого хода до номинальной на-

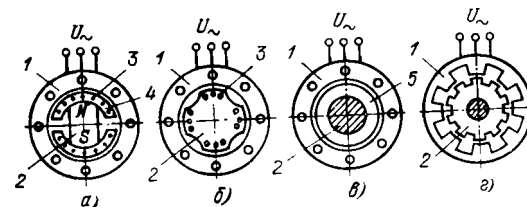


Рис. 5.10. Основные конструктивные схемы СЭД: а — постоянными магнитами (число пар полюсов $2p=2$); б — реактивный ($2p=4$); в — гистерезисный; 1 — статор; 2 — ротор; 3 — пусковая обмотка типа «большая клетка»; 4 — полюсные наконечники; 5 — магнитотвердый материал, имеющий широкую петлю гистерезиса

грузки; малое t_p ; высокую температурную стабильность пусковых и рабочих характеристик; большую механическую прочность и симметрию ротора; высокую надежность, малый уровень шума, сравнительно небольшие габариты и массу. Недостатками гистерезисных ЭД являются: низкий $\cos \varphi = 0,3 \dots 0,45$; малая стабильность мгновенной частоты вращения — качание ротора при резко изменяющихся нагрузках; технологический разброс характеристик ЭД, связанный с изменением свойств магнитотвердых материалов при незначительном отклонении режима термообработки; сравнительно высокая стоимость.

В редукторных СЭД (рис. 5.10,2) осуществляется электромагнитное редуцирование частоты вращения ротора n_p по отношению к частоте вращения поля статора n_c . Потребляемая мощность при пуске и в установившемся режиме практически одинакова, что позволяет использовать их для создания вращающегося момента при неподвижном роторе. Различают редукторные СЭД с электромагнитным возбуждением (на статоре или роторе), с постоянными магнитами, без возбуждения (реактивные). Число зубцов статора и ротора Z_c и Z_p ; обычно $Z_p > Z_c$, а

частота вращения $n_p = (Z_p - Z_c) \times n_c / Z_p$. Отношение $n_c / n_p = K_p$ — коэффициент электромагнитной редукции. В зависимости от K_p ротор может вращаться по или против направления вращения магнитного поля статора. Редукторные СЭД надежны и долговечны, просты по конструкции и обслуживанию, имеют малые n_p , плохую равномерность n_p и повышенный нагрев из-за отсутствия самовентиляции; их КПД = 20 ... 40%. Выпускаются на небольшие мощности.

Электродвигатели с катящимся ротором (ДКР). Отличие от ЭД других типов заключается в эксцентричном расположении ферромагнитного безобмоточного ротора в расточке статора (рис. 5.11,а). Обмотка статора создает в воздушном зазоре несимметричное вращающееся магнитное поле (рис. 5.11,б), под действием которого ротор за счет сил одностороннего магнитного притяжения $F_{м.п}$ катится по направляющим статора синхронно с полем. При этом одновременно с медленным вращением ротора вокруг своей оси с частотой вращения n_p ось ротора O_p совершает круговое движение по окружности с радиусом $O_p O_c$, равным смещению ротора в расточке статора.

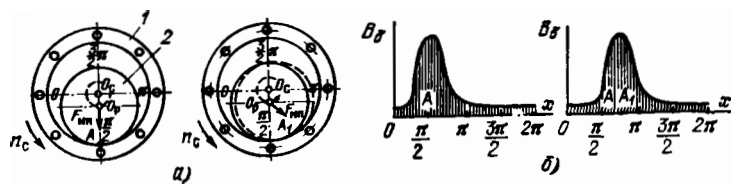


Рис. 5.11. Принцип действия ДКР (а) и распределение магнитной индукции B_d в расточке статора (б): 1 — статор, 2 — ротор

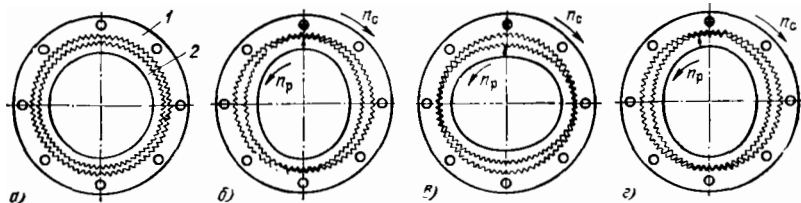


Рис. 5.12. Принцип действия ВЭД: а — вращающееся магнитное поле статора отсутствует; б — поле действует по вертикальной оси; в — поле повернуто по часовой стрелке на 90° ; г — то же, на 360° ; 1 — статор, 2 — ротор

Частота вращения

$$n_p = \frac{60 f}{P} \frac{R_c - R_p}{R_p},$$

где R_c и R_p — радиусы направляющих статора и катков ротора. Отношение $n_c / n_p = K_p = R_p / (R_c - R_p)$ — коэффициент редукции ($K_p \leq 1500$).

Двигатели с катящимся ротором обеспечивают малые n_p (до десятков мин⁻¹) при больших M без применения механических редукторов; хорошее быстродействие ($t_p \leq 0,01$ с при $f = 50$ Гц; время реверса 0,015 ... 0,025 с); малое время торможения; отсутствие самохода и выбега; небольшая кратность пускового тока ($I_{п.к} / I = 2 \dots 3$); надежную работу практически без смазки, из-за отсутствия подшипников, что позволяет использовать ДКР в вакууме и в других тяжелых условиях работы.

Недостатками ДКР, ограничивающих их применение, являются: сложность кинематического звена для передачи M между несоосным ротором и выходным валом; создаваемые вибрации ротора и шум; нестабильная работа в условиях ударных и вибрационных нагрузок; сравнительно небольшой срок службы из-за быстрого износа поверхностей катков.

Электродвигатели с волновым ротором (ВЭД). Ротор ВЭД (рис. 5.12,а) гибкий, деформируется под действием вращающегося магнитного поля статора и синхронно перемещается с ним (рис. 5.12,б,в), обкатывая статор ротором (рис. 5.12,г),

который вращается в сторону, противоположную полю, с частотой:

$$n_p = \frac{60 f}{P} \frac{Z_c - Z_p}{Z_p},$$

где Z_c и Z_p — число зубцов венцов статора и ротора, обычно $Z_c > Z_p$. Отношение $n_c / n_p = K_p = Z_p / (Z_c - Z_p)$ — коэффициент редукции.

По типу генератора волны различают шаговые, синхронные и ВЭД постоянного тока.

Электродвигатели с волновым ротором имеют большие M (до сотен Н·м); широкий диапазон редукции (от 10 ... 15 до сотен тысяч) при объеме на 30 ... 40% меньше, чем у обычных ЭД с редукторами; высокое быстродействие (время пуска при $f = 50$ Гц составляет 3 ... 4 мс) из-за малого J_p ; малое время торможения и отсутствие выбега; динамически уравновешенный ротор, что обеспечивает низкий уровень вибрации и шума; высокую кинетическую точность волновой передачи (в 2—5 раз выше, чем у обычных зубчатых передач); меньшую неравномерность мгновенной n (в 2—3 раза ниже, чем у других типов ЭД); малый износ; возможность передачи вращения в герметизированный объем (через стенку). Их недостатки — в сложности конструкции и технологии, сравнительно невысоких массоэнергетических показателях.

Основные технические данные СЭД с постоянными магнитами (ДС, СДПМ); реактивных (СОЛ, СД, ДРС); гистерезисных (Г, ГТ, ГР, ТС, ДСГ, ДСП); реактивно-гистерезисных (ДСД, ДСПД); редукторных (ДСР,

Таблица 5.3

Основные технические данные электродвигателей с волновым ротором типа ДВШ

Тип	$f_{п.р}$, шаг/с	$f_{п.макс}$, шаг/с	$f_{макс}$, шаг/с	$M \times 10^{-4}$, Н·м	$I_{ф}$, А	$J_H \times 10^{-4}$, кг·м ²	G , кг	Габаритные размеры, мм	
								D	L
ДВШ-1-3-0,5	500	600	1000	600	0,5	0...2	0,55	50	112
ДВШ-2-20-0,45	1200	1400	2000	2500	2,5	0...50	1,7	80	150

Примечание. В условном обозначении типа группы цифр означают: первая — порядковый номер габарита, вторая — статический момент $M_{ст} \times 10^{-4}$, Н·м, третья — угол поворота ротора, град.

ДСР-К, ОРД, ДСМ, КРД, ДСКР, ДСРЗ) и со встроенным редуктором (ГР, ДСМ, ДСР, ДСР-К), с катящимся ротором (СДКР) и волновых (ДВШ) приведены в [2, 6, 9]. Для СЭД серий ДСР и ДСР-К требования регламентированы ГОСТ 21614—76.

Волновые синхронные ЭД ДВШ-1-3-05 и ДВШ-2-20-0,45 предназначены для работы в устройствах ЧПУ, дискретного действия, а также в качестве СЭД с большим диапазоном регулирования; они могут преобразовывать цифровую информацию управления в аналоговую (поворот вала), обладают высокой степенью точности, быстродействием и работают на значительные инерционные нагрузки, превышающие собственный момент на два порядка, устойчивы к механическим и климатическим нагрузкам. Их основные технические данные даны в табл. 5.3. Исполнение закрытое; выходной конец вала один; крепление фланцевое, напряжение питания 12 В.

Шаговые электродвигатели

Шаговые электродвигатели — синхронные ЭД, в которых каждому импульсу управления соответствует поворот вала на фиксированный угол — шаг. Величина шага определяется конструкцией ШЭД и коммутацией его m -фазных обмоток. ШЭД сопряжены с управляющими цифровыми устройствами, обеспечивают пошаговую отработку управляющих импульсов с большой точностью (даже в разомкнутых системах) и возможность фиксации положения вала при останове. Их параметры практически не зависят от колебаний напряжения питания, внешних условий, технологического разброса конструктивных параметров, колебаний нагрузки, ко-

торы могут внести ошибку обработки лишь в пределах одного шага.

Шаговые электродвигатели используются в качестве исполнительного силового элемента приводов механизмов, имеющих старто-стопное движение; для преобразования информации из унитарного кода в другой вид (типа вал — цифра) и т. п. Их различают: по числу фаз (одно-, двух- и многофазные); по типу ротора — активные (с возбуждением от постоянных магнитов — магнитоэлектрические, от обмоток возбуждения — электромагнитные) и пассивные (без возбуждения — индукторные и реактивные); по числу пакетов стали магнитопровода (одно-, двух- и многопакетные); по способу фиксации ротора при обесточенных обмотках управления — с внутренней и внешней фиксацией. Питание обмоток может быть одно- (от нуля до $+U$) или двухполярным (от $+U$ до $-U$); управление — симметричным (обмотки включаются поочередно равными группами) и несимметричным (поочередно неравными группами).

Наибольшее распространение получили ШЭД без обмотки возбуждения на роторе: с постоянными магнитами, реактивные и индукторные (с подмагничиванием). Шаговые электродвигатели с постоянными магнитами (рис. 5.13) имеют ротор из постоянного магнита без полюсных наконечников. В пазах статора размещается двух-, трех- или четырехфазная обмотка. В ШЭД с двухфазной обмоткой основной принята 4-тактная разнополярная коммутация с парным включением обмоток. Возможна 4-тактная коммутация с поочередным включением одной обмотки, однако при этом M снижается примерно в 1,5 раза. Применяется 8-тактная комбинированная система коммутации, которая позволяет вдвое уменьшить шаг и вдвое увеличить частоту уп-

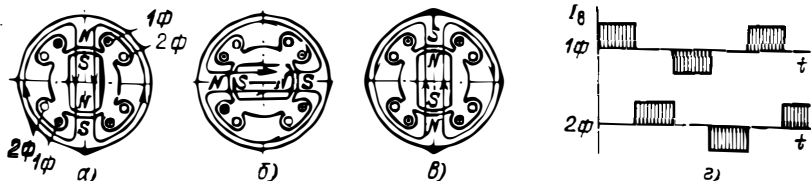


Рис. 5.13. Принцип действия ШЭД с постоянными магнитами: а, б, в — положения ротора (такты работы) при различных полярностях включения фаз; г — диаграмма изменения тока в фазах

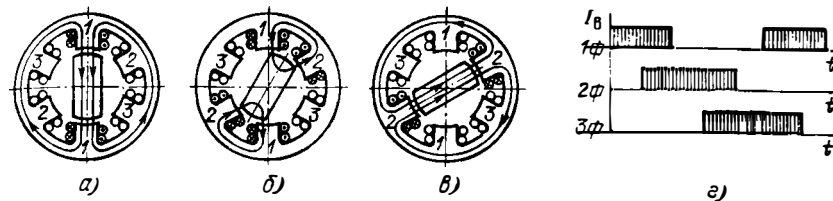


Рис. 5.14. Принцип действия реактивного ШЭД: а, б, в — такты работы; г — диаграмма изменения тока в фазах

равляющих импульсов. В ШЭД с трехфазной обмоткой используется 6-тактная разнополярная коммутация и возможна комбинированная 12-тактная коммутация. Они имеют шаг от 90 до 15°. Уменьшение шага возможно при увеличении числа фаз и тактов коммутации. Диапазон изменения частоты при 4-тактной коммутации обычно составляет 0...500 Гц; максимальной частоте подачи импульсов соответствует частота вращения 2000...3000 мин⁻¹. Шаговые электродвигатели с постоянными магнитами могут иметь внутреннюю магнитную фиксацию ротора при обесточенных обмотках. При этом фиксирующий реактивный момент составляет примерно 10% от максимального статического синхронизирующего момента.

Реактивные ШЭД (рис. 5.14) имеют пассивный ротор, выполненный из магнитомягкого материала. Статор имеет обычно шесть полюсных выступов, на которых располагают трехфазную сосредоточенную обмотку, питаемую от электронного коммутатора. Возможна трех- и шестифазная коммутация обмоток. Используется в основном однополярная 6-тактная несимметричная коммутация (см. рис. 5.14, г), которая дает меньший шаг и большую устойчивость работы ЭД. При этом шаг ЭД равен 30°. Шаг ЭД можно уменьшить, увеличивая число выступов на роторе (для крестообразного ротора шаг составляет 15°) или применяя полюсные выступы с гребенчатыми зубцовыми зонами (шаг 5...1°). По энергетическим показателям и значению синхронизирующего момента реактивные ШЭД уступают индукторным ШЭД аналогичных конструкций.

Индукторные ШЭД (рис. 5.15) имеют ферромагнитный зубчатый ротор из магнитомягкой электротехнической стали. На статоре с восемью полюс-

ными выступами располагается четырехфазная сосредоточенная обмотка возбуждения, питаемая от электронного коммутатора. Применяется, как правило, 8-тактная коммутация, которая дает меньший шаг и большую устойчивость работы ШЭД. Они имеют

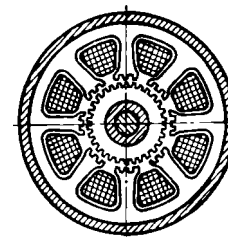


Рис. 5.15. Конструкция индукторного ШЭД

шаг 15° и менее (до долей градуса), определяемый числом выступов на роторе и статоре, который для этого выполняют с гребенчатыми выступами. Частота отработки шагов до нескольких килогерц, частота вращения ротора до 500...1000 мин⁻¹. Недостатком индукторных ШЭД с самовозбуждением является отсутствие внутренней магнитной фиксации ротора при обесточенных обмотках.

В зависимости от частоты управляющих импульсов (осуществляющих фиксированный останов, пуск и реверс) различают статический, квазистатический, установившийся и переходные режимы работы ШЭД. В статическом режиме на обмотку возбуждения подается U_+ , создающее неподвижное поле, поэтому ротор занимает определенное фиксированное положение, от которого он может отклоняться на угол рассогласования θ , зависящий от нагрузки.

В квазистатическом режиме обрабатываются единичные шаги таким образом, что к началу следующего

шага полностью заканчиваются переходные процессы и ротор приходит в неподвижное состояние. Предельная частота квазистатического режима ограничена временем затухания колебаний ротора, для уменьшения которого применяются различные демпфирующие устройства и обгонные муфты. Увеличить предельную частоту квазистатического режима можно путем увеличения числа обмоток управления или числа тактов коммутации; при этом уменьшается угол перемещения и кинетическая энергия ротора, что уменьшает его колебания.

Установившийся режим соответствует постоянной частоте управляющих импульсов и постоянной частоте вращения ротора, но при переходе из одного устойчивого состояния в другое возникают периодические и апериодические колебания относительно мгновенной точки устойчивого равновесия. При частоте управляющих импульсов f_i , меньшей частоты свободных колебаний ротора f_0 , угловое перемещение при каждом шаге, как и в квазистационарном режиме, сопровождается свободными колебаниями, которые существенно увеличивают динамическую ошибку при обработке ротором заданного перемещения. Частота свободных колебаний ротора

$$f_0 \approx 0,135 \sqrt{M_{max} P / (J_p + J_n)}$$

где M_{max} — максимальный электромагнитный момент при неподвижном роторе; J_p и J_n — моменты инерции ротора и нагрузки, приведенной к валу ротора.

При частоте управляющих импульсов, равной или меньшей в целое число раз f_0 , возникает явление электромеханического резонанса, которое при слабом демпфировании колебаний может вызвать нарушение периодичности движения ротора и привести к асинхронизму. При $f_i > f_0$ возникают вынужденные колебания с частотой, равной частоте управляющих импульсов; амплитуда их монотонно уменьшается с увеличением частоты.

Для устойчивой работы ШЭД необходимо $M_n/M_{max} \leq 0,3 \dots 0,5$, $J_n/J_p \leq 1 \dots 2$ и наличие внутреннего или внешнего демпфирования.

Основным требованием к ШЭД в переходных режимах (пуск, торможение, реверс, переход с одной частоты на другую) является сохране-

ние синхронизма при изменении частоты управляющих импульсов — отсутствие потери шага. Максимальная частота, при которой возможен пуск без нарушения синхронизма, называется частотой приемистости f_n ; она растет с увеличением синхронизирующего момента, уменьшением шага, момента нагрузки M_n и J_n .

Предельная частота f_t , при которой осуществляется торможение ШЭД без выбега (с сохранением синхронизма), как правило, выше f_n . Предельная частота реверса f_r , при которой реализуется реверс без выпадения из синхронизма, всегда меньше f_n и составляет $(0,2 \dots 0,5) f_n$. Только в ШЭД с большим демпфированием и при больших электромагнитных постоянных времени обмоток возбуждения частоты f_r и f_n сближаются и иногда бывают равными.

ШЭД характеризуются механическим шагом α_m (углом между двумя соседними устойчивыми положениями ротора); зависимостью статического синхронизирующего момента от углового положения ротора $M = M(\theta)$; механической характеристикой $M = M(f)$; частотами приемистости f_n и f_{nmax} ; статической погрешностью $\Delta \alpha_m$ (отношение установившегося действительного значения шага от идеального при подаче сигнала управления) и предельными динамическими характеристиками (зависимость f_n от момента сопротивления нагрузки M_n и ее момента инерции J_n) (рис. 5.16).

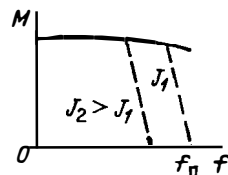


Рис. 5.16. Характеристики ШЭД: (—) механическая; (---) предельные динамические

При больших частотах вращения и больших шагах ротора применяют ШЭД с постоянными магнитами, расположенными на роторе, что позволяет получать относительно большие моменты и обеспечивать фиксацию ротора при обесточенных обмотках. При малых частотах применяют индукторные и реактивные ШЭД с гре-

бенчатыми выступами на полюсах статора [1].

Наиболее эффективный метод уменьшения дискретности ШЭД — использование принципа электрического дробления шага, который позволяет: увеличить до любого требуемого значения число электрических состояний на электрических входах ШЭД и в пределе обеспечить непрерывное изменение токов в его обмотках; обеспечить глубокое электрическое редуцирование шага и частоты вращения ШЭД; устранить вынужденные колебания, корректировать технологические недостатки ШЭД. При этом сохраняется импульсный характер управления, что дает возможность использовать наиболее эффективно микро-ЭВМ и микропроцессоры.

Из ШЭД различных типов [2, 6, 9] наибольшее применение получили ШЭД с постоянными магнитами ШДА, ДША, ДШ, ДШ-А; реактивные ШД и индукторные ШДР, РШД, ДШ, из которых чаще других исполь-

зуются ШЭД серии ДШ — четырехфазные, коммутация четырехтактная симметричная, включают в себя шесть типов ШЭД с постоянными магнитами (шаг 22,5°) и три типа индукторных (шаг 5,3 и 1°), охватывают диапазоны максимальных вращающих моментов от 0,012 до 0,56 Н·м, максимальных частот приемистости от 270 до 1000 Гц, массы от 0,21 до 2,5 кг.

Шаговые электродвигатели серии ДШ работают при температуре окружающего воздуха от -60 до +70°С; относительной влажности 98% при 35°С; атмосферном давлении от 133 Па до 148,6 кПа; вибрационных нагрузках с частотой 1...3000 Гц при ускорении 196 м/с²; многократных ударных нагрузках с ускорением 1471 м/с² длительностью 1...3 мс.

Для управления некоторыми ШЭД разработана серия коммутаторов (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Основные технические данные коммутаторов шаговых электродвигателей

Тип коммутатора	$P_{вых}, Вт$	Импульсы управления		$R_{вых}, Ом$	$G, кг$	$V, м³$	Тип ШЭД
		$U_y, В$	$t, с$				
МКТСР-4/2-27*-0,1	5	3	$2 \cdot 10^{-3}$	5000	0,02	10^{-5}	ДШР-1А; ДШР-1Б
МКТСР-4/2-27*-0,2	10	5	$3 \cdot 10^{-3}$	3000	0,03	$1,5 \cdot 10^{-5}$	ШДА-1ФК; ШДА-1
МКТСР-4/2-27*-0,5	25	6	$5 \cdot 10^{-3}$	2000	0,1	$15 \cdot 10^{-5}$	ШДА-3; ДШ-0,025А; ДРШ-0,25А; ШДР-231
КТС-4-28*-1	30	10	10^{-3}	1000	0,15	$2 \cdot 10^{-6}$	ДШ-0,04А; ДШ-0,1А; ШДР-5; ШДР-521
КТС-4-28*-2	50	12	$15 \cdot 10^{-3}$	500	0,175	$2 \cdot 10^{-6}$	ДШ-0,25А; ШДА-4
КТС-4-28*-3,5	100	15	$20 \cdot 10^{-3}$	250	0,25	$3 \cdot 10^{-6}$	ДШ-0,4А; ШДА-6

* Напряжение питания, В.

Выбор электродвигателя

Выбор ЭД, наиболее полно удовлетворяющего предъявленным к нему требованиям, целесообразно производить в два этапа.

На первом этапе производится выбор типа ЭД по результатам анализа предъявляемых требований с учетом специфики применения, рода тока, мощности, быстродействия, напряжения трогания, вида механической характеристики, условий эксплуатации и т. п. При этом то или иное требование может предопределять тип ЭД. Так, требование малого напряжения трогания ($U_{тр} \leq 0,05 U_n$) обеспечивается только ЭД с полым ротором. Высокое быстродействие и лучшие энергетические показатели для тока частоты $f=50$ Гц имеют ЭД с короткозамкнутым ротором типа «беличья клетка», для частоты $f=400$ Гц при диаметре корпуса $D > 60$ мм — ЭД с полым немагнитным ротором, а при $D \leq 60$ мм — ЭД с ротором типа «беличья клетка»; для частоты $f=1000$ Гц указанная граница лежит в пределах 30...40 мм. ЭД с малой степенью нелинейности механической характеристики и отсутствием самохода выполняются с большим активным сопротивлением ротора (с полым ротором). Наиболее надежны в эксплуатации и просты по устройству АД с короткозамкнутым ротором, менее надежны коллекторные ЭД и ЭД с полым ротором.

Рекомендуется применять: ЭД независимого возбуждения — в регулируемых ЭМП; независимого и параллельного возбуждения, с возбуждением от постоянных магнитов — при постоянной нагрузке для поддержания постоянной частоты вращения и работы привода вхолостую; последовательного возбуждения — при сильно меняющемся моменте нагрузки, потребности в большом M_n , для реверсных режимов работы; смешанного возбуждения — при работе как с большими M_n , так и в режиме холостого хода и при отрицательных нагрузках.

Применение бесконтактных ЭД предпочтительно в аппаратуре, работающей в условиях вакуума, в контакте с агрессивными и взрывоопасными средами; в аппаратуре, критичной к воздействию электромагнитных радиопомех и помех по цепям питания и с длительными сроками

службы. Это позволяет в некоторых случаях обойтись без дополнительных мер защиты.

Рекомендуется применять: ЭД асинхронные трехфазные — в регулируемых ЭМП при небольшой частоте включений; асинхронные с фазным ротором — в относительно мощных ЭМП с регулированием частоты вращения в небольших пределах; асинхронные двухфазные с короткозамкнутым ротором — в ЭМП и следящих системах мощностью до 200...300 Вт с регулированием частоты вращения; асинхронные двухфазные управляемые с полым ротором — в приборных следящих системах малой мощности.

Постоянную частоту вращения, жесткую механическую характеристику, высокие перегрузочную способность и энергетические показатели обеспечивают СЭД; дискретный характер вращения, возможность цифрового управления — ШЭД. Большие частоты вращения имеют ЭД повышенной частоты питания, малые — тихоходные ЭД (редукторные, волновые).

Для питания ЭД, работающих на подвижных объектах, предпочтительнее использовать ток повышенной частоты, так как это позволяет снизить массу и габариты ЭД.

Для ЭД, работающих при напряжении до 500 В, целесообразнее использовать более высокое напряжение, так как при той же мощности это приводит к уменьшению тока, что позволяет снизить сечение проводов и габариты коммутационно-регулирующей аппаратуры.

На втором этапе производится выбор конкретного типоразмера и исполнения ЭД, удовлетворяющего предъявленным требованиям. Выбирается подходящий ЭД по каталогу по следующим основным параметрам ЭД: напряжению и частоте питания, мощности на валу, вращающему моменту, частоте вращения ротора. Кроме этого, при выборе ЭД учитываются режим работы, быстродействие, диапазон регулирования частоты вращения, условия эксплуатации, ресурс, срок службы, габариты, вид крепления и др.

Выбору ЭД предшествуют кинематические расчеты привода или механизма (определяются нагрузочный момент и момент инерции, приведенные к валу ЭД, а также необходи-

мая мощность ЭД). Выбор ЭД ведется, как правило, методом последовательных приближений. Порядок выбора ЭД обуславливается: видом нагрузки (постоянная, переменная, зависящая от угла поворота и др.); режимом работы (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный, заторможенный); видом привода (нерегулируемый, регулируемый, силовой, приборный, следящий большой или малой мощности и др.); видом ЭД (асинхронный, коллекторный, синхронный, шаговый и др.); видом расчета (анализ, синтез, ориентировочный, точный); наличием исходных данных и другими факторами. В зависимости от указанных факторов методы выбора конкретного типа ЭД несколько различаются. Типовые, наиболее применяемые методы выбора ЭД применительно к системам автоматизации в телемеханике, приведены в [2].

5.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Основные размеры и параметры

A	— условная механическая работа
B	— магнитная индукция
B_δ	— магнитная индукция в рабочем зазоре
b	— толщина цилиндрической части каркаса
b_1	— толщина щеки каркаса
C	— толщина фланца магнитопровода, толщина дискового якоря
D	— наружный диаметр электромагнита
D_1	— внутренний диаметр магнитопровода (корпуса)
D_n	— наружный диаметр обмотки
$D_{ср}$	— средний диаметр обмотки
d	— диаметр якоря, сердечника
$d_{вн}$	— внутренний диаметр обмотки
$d_{нз}$	— диаметр обмоточного провода в изоляции
$d_{пр}$	— диаметр обмоточного провода по меди
F	— намагничивающая сила катушки
G	— масса
h_k	— высота намотки катушки
L	— общая длина электромагнита
$L_{пр}$	— длина обмоточного провода
l	— длина окна магнитопровода
l_k	— длина намотки катушки

N	— мощность
$n_{уд}$	— удельная мощность рассеяния на единицу поверхности охлаждения
P	— тяговое усилие
q	— сечение провода
$R(R_0)$	— сопротивление обмотки (в нормальных условиях)
S	— сечение магнитопровода
$t_{окр.ст}$	— температура окружающей среды
U	— расчетное напряжение
$U_{пт}$	— напряжение питания
W	— число витков
α	— угол конуса при вершине
Δ	— зазор между внутренним диаметром магнитопровода (корпуса) и наружным диаметром обмотки
δ	— рабочий зазор
$\delta_{н.п}$	— толщина немагнитной прокладки
$\delta_{п}$	— нерабочий (паразитный) зазор
$\delta_я$	— ход якоря
ε	— эксцентриситет якоря по отношению к воротничку
θ	— превышение температуры (перегрев)
μ_0	— магнитная постоянная
$\rho(\rho_0)$	— удельное сопротивление провода (в нормальных условиях)
φ	— поправочный коэффициент относительного падения намагничивающей силы

Общие сведения

Электромагниты предназначены для пространственного перемещения элементов механизмов или удержания их в определенных положениях. Они используются в качестве ИЭ в силовых, программных, шаговых и других механизмах; в перфорирующих, считывающих, печатающих и других устройствах ввода-вывода ЭВМ, в лентопротяжных и транспортирующих механизмах; в ЭМУ вибрационного и ударного действия; в коммутирующих устройствах НЧ, ВЧ и СВЧ, реле, контакторах, переключателях, распределительных устройствах, в электромагнитных муфтах; в различных фиксирующих, блокирующих, тормозных устройствах и во многих других случаях. ЭМ часто определяют основные технические характеристики изделий, в которых используются.

Различают ЭМ постоянного и пере-

менного тока. Электромагниты переменного тока в качестве ИЭ используются значительно реже из-за пульсирующего во времени тягового усилия, среднее значение которого меньше, чем в ЭМ_п (что требует увеличения габаритов и массы ЭМ_п); вибрации якоря и гудения, вызванных пульсацией тяговой силы; относительно низкой точности перемещения якоря; применения шихтованного материала, что ограничивает выбор форм магнитопровода.

Электромагниты постоянного тока не имеют указанных недостатков, обладают лучшими габаритно-массовыми и энергетическими показателями, что обусловило их широкое распространение. Они подразделяются на нейтральные, работа которых не зависит от полярности $U_{пт}$, и поляризованные, работа которых зависит от полярности $U_{пт}$ (управляющего сигнала). По способу включения различают ЭМ с параллельными (напряжения) и последовательными (тока) обмотками.

ЭМ могут быть продолжительного,

кратковременного и повторно-кратковременного (импульсного) режима работы; быстродействующими ($t < 0,005$ с), нормальными ($0,005 \leq t \leq 0,1$ с), замедленными ($0,1 < t \leq 1$ с) и с выдержкой времени ($t > 1$ с); с внешним притягивающимся (дисковым и клапанным), с втяжным, поворотным и другими видами якорей.

Наибольшее применение в РЭА получили нейтральные ЭМ_п с обмотками напряжения, нормальные по быстродействию, с втяжным и дисковым якорями (далее просто ЭМ), которые характеризуются простотой и компактностью конструкции, значительным раздвигаемым тяговым усилием (моментом), высокой точностью и стабильностью установки рабочих элементов в фиксированных положениях, большим сроком службы, простотой управления.

Конструкции электромагнитов

Конструктивные схемы ЭМ показаны на рис. 5.17, а в табл. 5.5 даны их основные параметры (для ЭМ с

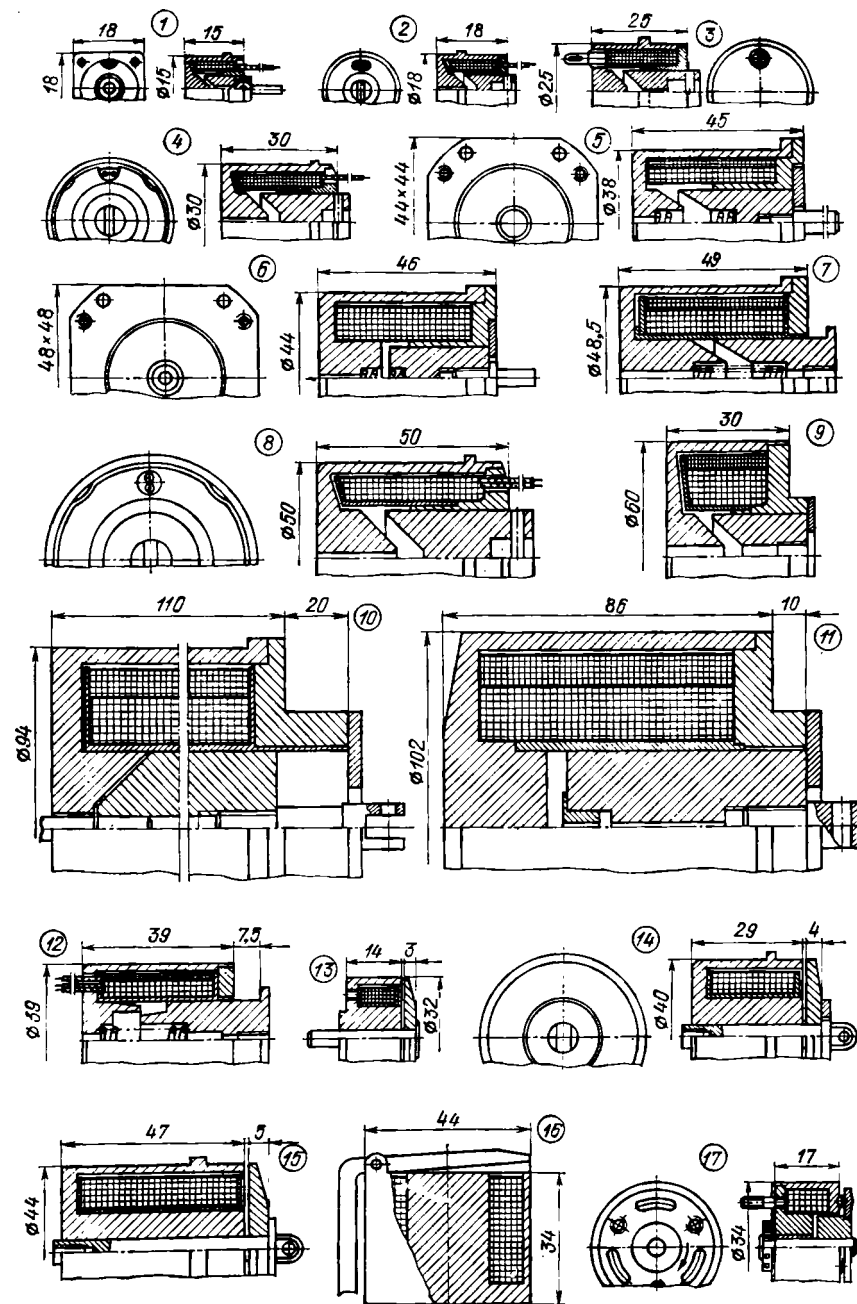


Таблица 5.5

Основные параметры электромагнитов

Номер по рис. 5.17	U, В	F, А	N, Вт	Режим работы ПВ, %	θ , °С	G, кг	$t_{окр. ср.}$ °С
1	27	235	4,2	<60	—	0,018	-40...+50
2	27	1480	182	<1	—	0,03	-50...+75
3	27	1860	132,5	<2	—	0,075	-50...+75
4	29	1770	98	<5	—	0,135	-50...+80
5	27	2600	146	<5	—	—	—
6	27	517	6,35	100	65	0,32	-40...+50
7	27	855	6,08	100	60	0,44	-40...+50
8	27	1710	121,5	<5	—	0,56	-40...+50
9	28	1290	15,9	100	95	—	—
10	28	3450	201	<5	—	0,62	-50...+80
11	27	3240	146	<5	—	—	—
12	27	504	14	100	102	0,58	-30...+45
13	220	10 300	420	<10	—	—	—
14	110	630	27,6	100	60	5,2	-40...+50
15	27	13 000	1100	<5	—	—	—
16	27	1230	17,8	100	40	4,7	-60...+70
17	20	1600	89	<5	—	—	—
18	20	378	4,1	100	60	0,29	-40...+50
19	26	352	8	<40	—	0,085	-40...+50
20	27	360	3,24	100	50	0,26	-40...+50
21	27	1210	15,2	100	95	0,45	-30...+45
22	27	615	5,53	100	52	0,35	-30...+50
23	28	615	15,7	<10	—	0,1	-40...+50

Рис. 5.17. ЭМ с втяжным якорем (1—11), с ферромагнитным шунтом (12), с дисковым якорем (13—15), клапанным типа (16) и с поворотным якорем (17)

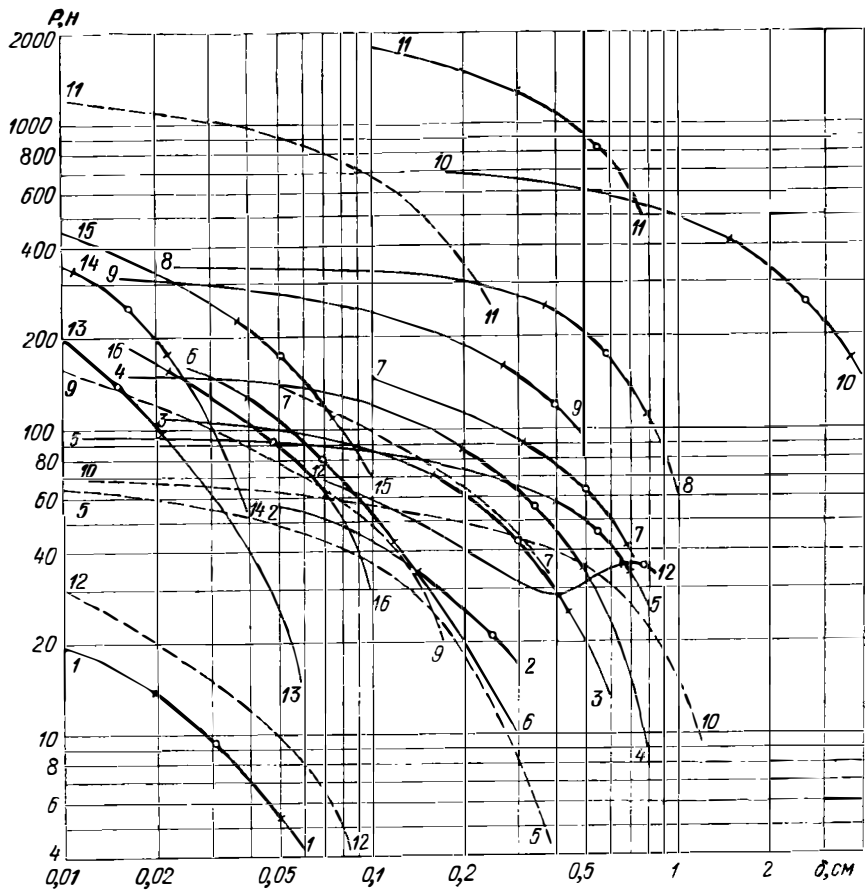


Рис. 5.18. Тяговые характеристики ЭМ

двумя обмотками значения над чертой соответствуют форсирующей обмотке, под чертой — удерживающей). Значения F , N , θ даны при указанных U в нормальных климатических условиях.

Экспериментальные тяговые характеристики (рис. 5.18) $P=f(\delta)$ ЭМ сняты при указанных в табл. 5.5 значениях F в ненагретом состоянии ($\theta \approx 0$), кружком отмечена максимальная условная механическая работа A_{max} , развиваемая ЭМ ($A=P\delta$); жирные линии — участки, на которых A снижается не более чем на 10% от A_{max} . Для двухобмоточных ЭМ сплошными линиями показаны тяговые характеристики при включении форсирующей (пусковой) обмотки, а штриховыми — удерживающей.

Подробные описания различных ЭМ приведены в [4, 5].

Инженерные методы расчета

Различают два типа проектных расчетов ЭМ (табл. 5.6 и 5.7): I типа, когда по заданным усилию P в начале хода якоря, ходу якоря $\delta_я$ и тепловому режиму $\theta_{доп}$ рассчитывают размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие минимальные габариты;

II типа, когда по заданным габаритам D и L , ходу якоря $\delta_я$ и тепловому режиму $\theta_{доп}$ рассчитывают размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие максимально возможное тяговое усилие.

Пояснения к расчетам. I. Методика

Таблица 5.6

Параметр	Конструктивный вид ЭМ		
	плужной с плоским стопом 1)	втяжной с коническим стопом 2)	с дисковым якорем 3)
Конструктивный фактор, kH_0^2/m	$K\Phi = 10^{-3} \sqrt{P/\delta}$		
Диаметр якоря или сердечника ⁴⁾ , м	$d = 1,79 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{B_\delta}$	$d = 1,79 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{B_\delta \sin \alpha/2}$	$d = 1,265 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{B_\delta}$
Наружный диаметр, м	$D = 2d$		
Длина ⁵⁾ , м	$L = 8,7 \cdot 10^2 (\delta + \delta_я) \sqrt{\frac{P\rho}{D^3 n_{уд}}}$	$L = 8,7 \cdot 10^2 (\delta \sin \frac{\alpha}{2} + \delta_я) \times \sqrt{\frac{P\rho}{D^3 n_{уд}}}$	$L = 12,3 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{P\rho}{D^3 n_{уд}}}$
Отношение L/D	0,7...1,8		
Магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл	$B_\delta = 1,79 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{P}}{d}$		
Максимальная магнитная индукция, Тл	$B = B_\delta / \varphi$		

Проектный расчет I типа

Параметр	Конструктивный вид ЭМ		
	втяжной с плоским стопом ¹⁾	втяжной с коническим стопом ²⁾	с дисковым якорем ³⁾
Внутренний диаметр магнитопровода ⁴⁾ , м	$D_1 = 0,87D$		
Толщина фланца или дискового якоря ⁴⁾ , м	$C = 0,12D$		
Длина окна под катушку, м	$l = L - 2C$		
Длина стопа ⁴⁾ , м	$l_{ст} = (0,30 \dots 0,55)l$	$l_{ст} = (0,30 \dots 0,55)l$	—
Средний диаметр катушки, м	$D_{ср} = \frac{(D_1 - 2\Delta) + (d + 2b)}{2}$		
Диаметр провода ⁵⁾ , м	$d_{пр} = 1,78 \cdot 10^{-3} \times \sqrt{\frac{\rho D_{ср} B (\delta + \delta_{из})}{U}}$	$d_{пр} = 1,78 \cdot 10^{-3} \times \sqrt{\frac{\rho D_{ср} B (\delta \sin \frac{\alpha}{2} + \delta_{из})}{U}}$	$d_{пр} = 1,78 \cdot 10^{-3} \times \sqrt{\frac{\rho D_{ср} B 2\delta}{U}}$
Сечение провода ⁶⁾ , м ² ; диаметр провода в изоляции ⁶⁾ , м	$q; d_{из}$		
Высота катушки, м	$h_k = \frac{(D_1 - 2\Delta) - (d + 2b)}{2}$		
Длина катушки, м	$l_k = L - 2(b_1 + C)$		
Число витков катушки	$W = 0,865 \frac{l_k k_k}{d_{из}^2}$		
Сопротивление катушки, Ом	$R_0 = \frac{\pi \rho_n D_{ср} W}{q} = 7 \cdot 10^{-8} \frac{D_{ср} W}{d_{пр}^2}$		
Длина обмоточного провода, м	$L_{пр} = \pi D_{ср} W$		

¹⁾ Рекомендуется при значениях $6,5 \dots 11 < K\Phi < 31,3 \dots 47$. ²⁾ Рекомендуется при значениях $0,15 \dots 1,5 < K\Phi < 6,5 \dots 11$. ³⁾ Рекомендуется при значениях $K\Phi > 31,3 \dots 47$. ⁴⁾ Размер округляется по ГОСТ 6636—69. ⁵⁾ Выбирается ближайший стандартный диаметр по таблице проводов. ⁶⁾ Определяется по таблице проводов для выбранной по нагревостойкости марки провода [3].

Параметр	Конструктивный вид ЭМ		
	втяжной с плоским стопом ¹⁾	втяжной с коническим стопом ²⁾	с дисковым якорем ³⁾
Тяговое усилие, Н	$P \cong \frac{L^2 D^3 n_{уд}}{76 \cdot 10^6 (\delta + \delta_n)^2 \rho}$	$P \cong \frac{L^2 D^3 n_{уд}}{76 \cdot 10^6 (\delta \sin \frac{\alpha}{2} + \delta_n)^2 \rho}$	$P \cong \frac{L^2 D^3 n_{уд}}{152 \cdot 10^6 \delta^2 \rho}$
Конструктивный фактор, кН ^{0.5} /м	$K\Phi = 10^{-3} \sqrt{P/\delta}$		
Внутренний диаметр магнитопровода ⁴ , м	$D_1 = 0,87D$		
Диаметр якоря или сердечника ⁴ , м	$d = 0,5D$		
Толщина фланца или дискового якоря ⁴ , м	$C = 0,12D$		
Толщина фланца на периферии, м	$C_1 = 0,06D$		
Сечение якоря или сердечника, м ²	$S = \pi d^2/4$		
Длина окна под катушку, м	$l = L - 2C$		
Длина стопа ⁴ , м	$l_{ст} = (0,30 \dots 0,55)l$	$l_{ст} = (0,30 \dots 0,55)l$	—
Средний диаметр катушки, м	$D_{ср} = \frac{(D_1 - 2\Delta) + (d + 2b)}{2}$		
Высота намотки, м	$h_K = \frac{(D_1 - 2\Delta) - (d + 2b)}{2}$		
Длина намотки, м	$l_K = L - 2(b_1 + C)$		
Допустимое сопротивление катушки, Ом	$R_{доп} = \frac{U^2}{\pi D(L + 0,5D)n_{уд}}$		
Диаметр провода ⁵ , м	$d_{пр} = 1,285 \sqrt[4]{\frac{\rho D_{ср} l_K h_K}{R_{доп}}}$		
Сечение провода ⁶ , м ² ; диаметр провода в изоляции ⁶ , м	$q; d_{из}$		
Число витков катушки	$W = 0,865 \frac{l_K h_K}{d_{из}^2}$		

Параметр	Конструктивный вид ЭМ	
	втяжной с плоским стопом ¹⁾	втяжной с коническим стопом ²⁾
Сопротивление катушки, Ом	$R_0 = \frac{\pi \rho_0 D_{cp} W}{q}$	$R_0 = \frac{\pi \rho_0 D_{cp} W}{q} = 7 \cdot 10^{-8} \frac{D_{cp} W}{d_{cp}^2}$
Длина обмоточного провода, м	$L_{пр} = \pi D_{cp} W$	
Максимальная магнитная индукция, Тл	$B = \frac{\mu_0 F}{\delta + \delta_n}$	$B = \frac{\mu_0 F}{\delta \sin \alpha/2 + \delta_n}$
Тяговое усилие, Н	$P = \frac{\mu_0 \phi^2 F^2 S}{2(\delta + \delta_n)^2}$	$P = \frac{\mu_0 \phi^2 F^2 S}{2(\delta \sin \alpha/2 + \delta_n)^2}$
		$B = \frac{\mu_0 F}{2\delta}$
		$P = \frac{\mu_0 \phi^2 F^2 S}{4\delta^2}$

Примечание. См. применения к табл. 5.6.

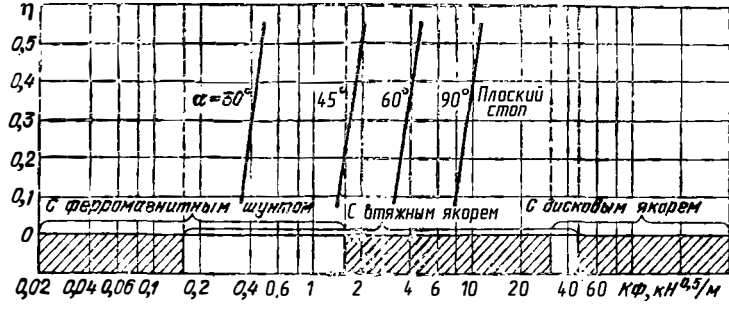


Рис. 5.19. Рациональные области применения ЭМ и форм стопов с втяжным якорем

предусматривает расчеты броневых ЭМ, квазиоптимальных по тяговому усилию при максимизации критериев $A/G, A/V, A/N, A/F$.

2. Выбор ЭМ производится по КФ (рис. 5.19), известному в начале проектирования.

3. Рациональная форма стопа ЭМ с втяжным якорем зависит от КФ и усеченности конуса η (см. рис. 5.19), которая определяется как отношение малого диаметра конуса к большому, равному диаметру якоря. Применение стопов с $\alpha \geq 120^\circ$ нерационально, так как тяговая характеристика при этом аналогична характеристике плоского стопа. Конические стопы с $\alpha \leq 30^\circ$ целесообразны для сравнительно больших ходов якоря и для получения пологой тяговой характеристики, когда нельзя применить ЭМ с ферромагнитным шунтом.

4. Рабочий зазор $\delta = \delta_n + \delta_{н.п}$, как правило, задан. Для уменьшения габаритов ЭМ выгодно задаваться малым ходом якоря и необходимым тяговым усилием из условия обеспечения заданной условой работы.

Немагнитная прокладка из латуни, нержавеющей стали и других материалов помещается между якорем и стопом для предотвращения «залипания» якоря в притянутом положении из-за остаточной намагниченности магнитопровода. С достаточной для практики точностью $\delta_{н.п} = (0,05 \dots 0,1) \delta_n$, причем большему ходу соответствует меньшее значение коэффициента (и наоборот). Утолщение немагнитной прокладки приводит к увеличению рабочего зазора и к уменьшению тягового усилия при заданном ходе якоря.

5. Паразитный зазор δ_n втяжных ЭМ увеличивает сопротивление магнитной цепи и тем самым снижает

тяговое усилие. Однако с его уменьшением из-за эксцентриситета якоря возрастает радиально направленная сила одностороннего притяжения якоря [3], трение которого снижает тяговое усилие ЭМ. Минимально влияющие эти факторы при $\delta_n = (4 \dots 5) e$, где эксцентриситет якоря e по отношению к охватываемому фланцу равен $0,03 \dots 0,10$ мм. Уменьшения влияния его длины в осевом направлении — так называемого развитого вортничка.

6. При необходимости одновременного обеспечения минимальных габаритов, объема, массы и потерь НС компромиссное решение соответствует $B_\delta = 0,7 \dots 1,1$ Тл, на которые и следует ориентироваться при определении диаметра якоря или сердечника. В других случаях индукция определяется также соотношением между заданным усилием и рабочим зазором: при малом зазоре и большом усилии индукция принимается выше рекомендованной, при большом зазоре и малом усилии — ниже рекомендованной.

7. Выбранное значение B_δ существенно влияет на соотношение габаритных размеров ЭМ L/D : большему значению B_δ соответствует меньший наружный диаметр и большая длина ЭМ (и наоборот). Наиболее удачное конструктивное исполнение ЭМ обеспечивается при отношениях $L/D \approx 0,7 \dots 1,8$ для ЭМ с втяжным якорем и $0,4 \dots 0,8$ — с дисковым.

8. Поправочный коэффициент ϕ равен отношению суммы намагничивающих сил, приходящихся на рабочий и паразитный зазоры, к общей НС катушки: $\phi = (F_\delta + F_{\delta_n})/F$. Он зависит от магнитной индукции

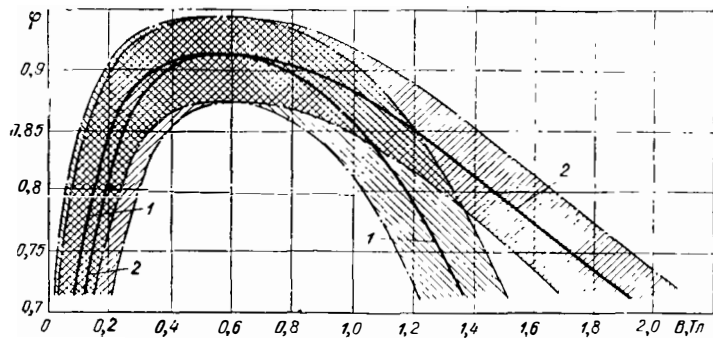


Рис. 5.20. Области разброса и усредненные зависимости поправочного коэффициента от магнитной индукции: 1 — в рабочем зазоре; 2 — при максимальной индукции

(рис. 5.20), которую для стали марки Э следует выбирать в пределах 0,35 ... 0,95 Тл. При индукции менее 0,3 Тл снижение ρ вызывается увеличением удельного магнитного сопротивления стали, которое становится соизмеримым с потерями НС в рабочем зазоре. Поэтому потери НС в стали необходимо учитывать и при больших и сравнительно малых значениях индукции.

9. Основные соотношения размеров магнитопровода, при выборе которых совершаемая ЭМ работа близка к оптимальной, равны: $d/D=0,5$; $D_1/D=0,87$; $C/D=0,12$, что позволяет по одному из размеров определить все остальные.

10. Тяговое усилие ЭМ $P \propto D^3$, L^2 , что позволяет рационально варьиро-

вать габаритные размеры при проектировании ЭМ.

11. Для низковольтных ЭМ толщину цилиндрической части каркаса обычно берут $b = (0,05 \dots 0,25) \cdot 10^{-2}$ м; толщину щеки каркаса $b_1 = (0 \dots 0,2) \cdot 10^{-2}$ м и зазор между катушкой и корпусом $\Delta = (0,025 \dots 0,2) \times 10^{-2}$ м.

12. При выборе марки, сечения и диаметра провода следует иметь в виду, что при использовании обмоточных проводов с большим удельным сопротивлением тяговое усилие ЭМ при прочих неизменных параметрах снижается пропорционально $P \sim 1/\rho^2$ и пропорционально $P \sim d_{пр}^4$. При данном $U_{пт}$ тяговое усилие ЭМ может быть повышено только за счет увеличения $d_{пр}$. Увеличение числа витков

обмотки при $d_{пр} = \text{const}$ может несколько снизить усилие из-за увеличения среднего диаметра катушки.

13. В расчетах используется удельное сопротивление провода ρ для данного превышения температуры θ : $\rho = \rho_0(1 + \alpha_0\theta)$, где ρ_0 — удельное сопротивление провода при 20°С (для медного провода $\rho_0 = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом \times м); α_0 — температурный коэффициент металла провода (для медного провода $\alpha_0 = 0,004$ 1/°С).

14. Удельная мощность рассеяния $\rho_{уд}$ и превышение температуры θ ЭМ при продолжительном режиме работы взаимосвязаны (рис. 5.21). По

заданному θ и условиям теплопередачи ЭМ можно найти $\rho_{уд}$, значение которой используется при определении L (обеспечивающей заданный тепловой режим), P (в данных размерах и тепловом режиме) или $R_{доп}$ (обеспечивающее заданный тепловой режим в данных размерах). Приведенные графики позволяют решать обратную задачу: по известным значениям мощности ЭМ и его площади охлаждения определять удельную мощность рассеяния и, таким образом, превышение температуры ЭМ при продолжительном режиме работы.

15. При повторно-кратковременном

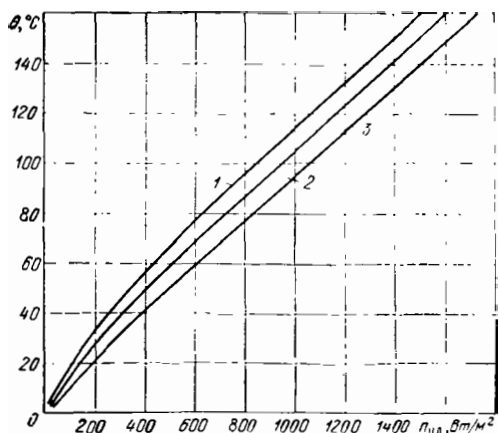


Рис. 5.21. Взаимосвязь превышения температуры при длительном включении и удельной мощности рассеяния для различных условий теплопередачи: 1 — плохих; 2 — средних; 3 — хороших

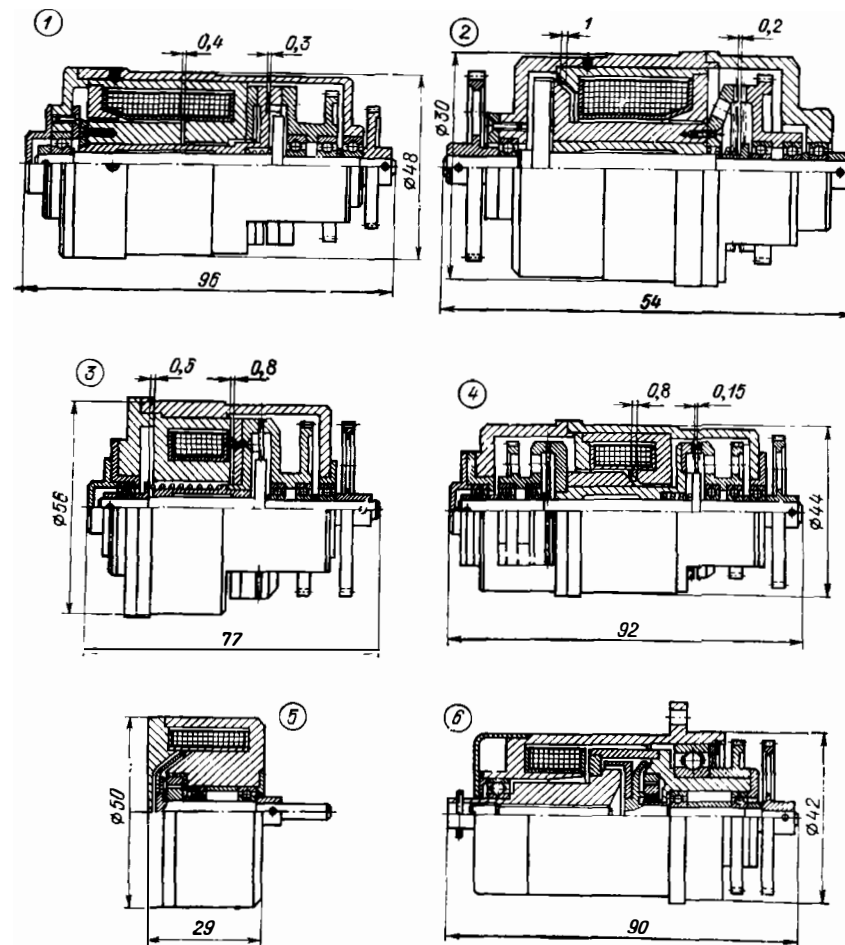


Рис. 5.22. Конструктивные схемы ЭММ:

1 — фрикционная на сцепление и расцепление (с тормозом); 2 — зубчатая на сцепление; 3 — зубчатая на расцепление; 4 — зубчатая на переключение; 5 — порошковая тормозная; 6 — порошковая на сцепление

включении ЭМ удельная мощность рассеяния

$$n_{уд.пв} \cong n_{уд} \sqrt{100/ПВ}$$

5.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ

Общие сведения

Электромагнитные муфты используются для дистанционного сцепления, расцепления, переключения, реверсирования кинематических цепей при передаче вращения и момента от ведущего элемента к ведомому, в качестве тормоза и ограничителя передаваемого момента. Индукционные ЭММ с переменным скольжением позволяют регулировать частоту вращения ведомого вала, сглаживать толчки и высокочастотные крутильные колебания. Электромагнитные муфты применяются в разнообразных пусковых, переключающих, предохранительных, тормозных и других устройствах, в ЭМП, следящих системах, САР и САУ.

Основным классификационным признаком ЭММ является характер связи ведущего и ведомого элементов: механический (фрикционные и зубчатые ЭММ); электромеханический (порошковые); магнитный (индукционные и гистерезисные) и др. По передаче движения ЭММ могут работать на сцепление, расцепление, переключение, торможение, выполнять предохранительные, демпферные и специальные функции, иметь жесткую (ЗЭММ, ФЭММ) или мягкую (ПЭММ, ИЭММ) связь ведущего и ведомого элементов.

Режим работы может быть релейный (без проскальзывания ведущего

и ведомого элементов) и скольжения. Сами элементы бывают одно- и многодисковые с одним или несколькими зазорами в виде дисков, конусов и цилиндров.

По роду возбуждения ЭММ могут быть электромагнитными униполярными (оси ЭММ и обмотки совпадают), многополюсными (оси ЭММ и обмоток параллельны, перпендикулярны или тангенциальны) или с постоянными магнитами. Токосоподводы выполняются с контактными кольцами или без них.

Конструктивные схемы наиболее распространенных типов ЭММ показаны на рис. 5.22, а в табл. 5.8 даны их основные технические данные.

Фрикционные электромагнитные муфты

Применяются в пусковых, тормозных и предохранительных устройствах, где происходит или допускается относительное проскальзывание полумуфт. Момент в ФЭММ передается за счет сил трения, возникающих в соприкасающихся полумуфтах при сжатии их внешними силами с помощью пружины или ЭМ.

Однодисковые ФЭММ (рис. 5.23, а, б) используются для передачи или торможения сравнительно небольших моментов и работают, как правило, без смазки фрикционных поверхностей. Многодисковые ФЭММ (рис. 5.23, в—е) имеют $(n-1)$ пар фрикционных поверхностей (n — число дисков), позволяют передавать или тормозить значительные моменты, применяются в приводах средней и большой мощности. В муфтах (рис. 5.23, д, е) несенные диски отделены от магнитопровода и могут изготавливаться из любых материалов. В муф-

Таблица 5.8

Основные технические данные электромагнитных муфт

Номер по рис. 5.22	M, Н·см	F, А	N, Вт	θ° , С	G, кг	$t_{окр. ср.}^\circ$ С
1	20	460	4,3	40	0,8	-40...+60
2	25	303	2,9	45	0,3	-50...+60
3	40	293	4,2	42	0,8	-40...+60
4	50	308	4,1	50	0,7	-40...+60
5	30	236	3,0	42	0,4	-60...+80
6	40	297	3,65	50	0,5	-60...+80

Примечание. Напряжение питания 27 В постоянного тока.

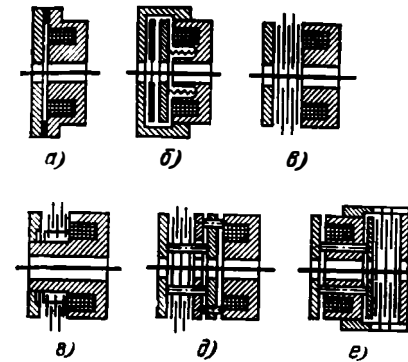


Рис. 5.23. Конструктивные схемы дисковых ФЭММ: а, б — однодисковые (с одной и двумя парами поверхностей трения); многодисковые с магнитопроводящими широкими (в) и узкими (г) дисками; многодисковые с несенными дисками с тянущим (д) и с толкающим (е) якорями

тах (рис. 5.23, а, г) магнитопроводящие диски являются частью магнитопровода. Наружные диски выполняются в виде упругих элементов, на фрикционных поверхностях которых имеются спиральные маслораспределительные канавки, что обеспечивает быстрое и четкое расцепление дисков при отключении муфты, малый остаточный момент и высокие значения передаваемого момента при механических переходных процессах (разгоне, торможении, реверсе).

Конусные муфты [8] по сравнению с однодисковыми ЭММ отличаются меньшими габаритами при передаче одинаковых моментов, меньшей сжимающей полумуфты силой, большей надежностью сцепления при меньшем износе трущихся поверхностей, но требуют высокой точности изготовления.

Зубчатые электромагнитные муфты

Зубчатые электромагнитные муфты (см. рис. 5.22, 2—4) широко применяются в приборных приводах РЭА, передают значительно большие моменты, чем ФЭММ, при равных силах сжатия полумуфт, а при передаче одинаковых моментов имеют меньшие габариты и массу.

Зубчатые электромагнитные муфты обеспечивают соединение валов без проскальзывания и мертвого хода и используются, например, в точных

отсчетных цепях для жесткой связи. При включении они сразу передают номинальный вращающий момент, вследствие чего могут возникать значительные динамические нагрузки на зубья, валы, шлицы, шпонки.

Недостаток ЗЭММ заключается в том, что сцепление и расцепление полумуфт допустимо только при малых относительных частотах вращения (менее 100 мин⁻¹) во избежание деформации и износа зубьев. Рекомендации по конструированию и расчету ФЭММ и ЗЭММ даны в [8].

Порошковые электромагнитные муфты

Порошковые электромагнитные муфты (примеры конструкций показаны на рис. 5.22, 5 и 6) по сравнению с ФЭММ и ЗЭММ обладают более высоким быстродействием (до единиц миллисекунд), большей частотой переключения, меньшими значениями намагничивающих сил и потребляемой мощности, характеризуются простотой управления, плавностью и бесшумностью сцепления полумуфт и отсутствием износа их поверхностей, не меняющимся от трения скольжения передаваемым моментом (при неизменном токе управления), т. е. жесткой механической характеристикой (рис. 5.24).

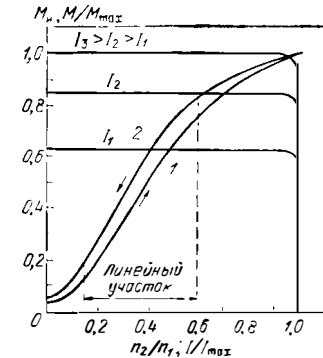


Рис. 5.24. Механическая и статическая характеристики ПЭММ: 1 — восходящая и 2 — нисходящая ветви статической характеристики; M; M_{max} — моменты, передаваемые муфтой; I; I_{max} — токи управления

Их используют при автоматическом управлении для плавного регулирования передаваемого момента или частоты вращения, например в лентопр-

тяжном механизме (на валу подающей кассеты) для создания постоянного натяжения магнитной ленты; при осуществлении безударного регулируемого по времени пуска, плавного сцепления или расцепления, например в ЭД; при ограничении передаваемого момента, в качестве электромагнитного усилителя мощности (при двухтактном включении муфт (рис. 5.25) коэффициент усиления мощности может достигать 3500); для реверсирования ведомого вала (при включении муфт по схеме рис. 5.25)

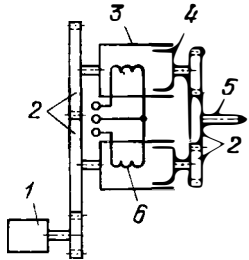


Рис. 5.25. Схема двухтактного включения ПЭММ: 1 — ЭД; 2 — зубчатые колеса; 3 — ведущая часть муфты; 4 — ведомая часть муфты; 5 — выходной вал (нагрузка); 6 — катушка

при неизменном направлении вращения приводного ЭД; в качестве электромагнитного тормоза.

Порошковые электромагнитные муфты позволяют регулировать передаваемый момент от 0,1 до M_{max} при частотах вращения полумуфт до 3000 мин⁻¹. При окружных скоростях более 16 м/с из-за действия центробежных сил образовавшиеся связи порошка разрушаются и муфта становится неуправляемой. ПЭММ надежно работают при температуре от -60 до +85°С, относительной влажности воздуха до 98% при температуре до +40°С. Срок службы ПЭММ (без замены порошка) 500...1000 ч.

На величину передаваемого ПЭММ момента отрицательно влияют уплотнение ферромагнитного наполнителя (потеря подвижности в рабочем зазоре муфты), происходящее как под действием центробежных сил в работающей муфте, так и за счет оседания наполнителя (слеживания) в неработающей муфте, и необратимое изменение его физико-химических свойств (старение).

При равных передаваемых моментах ПЭММ несколько уступают

ФЭММ и ЗЭММ по массе и габаритным размерам, но превосходят по тем же показателям ИЭММ.

Порошковые электромагнитные муфты серии МПБ (бесконтактные) применяются в регулируемых ЭМП и следящих системах в качестве исполнительного элемента и усилителя мощности, для реверсирования инерционных масс с высокой частотой, а также в пускотормозных и динамометрических устройствах. Конструкция муфт показана на рис. 5.26, их основные технические данные сведены в табл. 5.9, а размеры указаны на рис. 5.27. Питание муфт от ИП постоянного тока напряжением до 24 В.

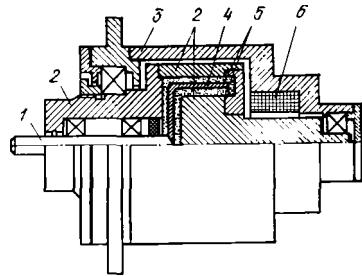


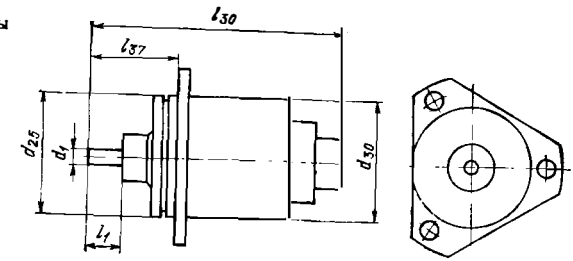
Рис. 5.26. Бесконтактная ПЭММ серии МПБ: 1 — ведомый вал; 2 — ведущий вал (подвижный магнитопровод); 3 — корпус (неподвижный магнитопровод); 4 — магнитопроводящий стакан; 5 — ферромагнитный наполнитель (порошок); 6 — катушка

регулирование передаваемого момента возможно в диапазоне от 0,1 до 1,0 M_{max} , частота вращения ведущего вала до 2000 мин⁻¹. Муфты работают в продолжительном режиме при температуре окружающей среды от -60 до +85°С, относительной влажности воздуха до 98% при температуре до +40°С, виброустойчивы в диапазоне частот от 5 до 2000 Гц при ускорении до 98,1 м/с². Имеют фланцевое крепление. Основные данные бесконтактных (БПМ) и контактных (КПМ) муфт приведены в табл. 5.10. Рекомендации по конструированию и расчет ПЭММ даны в [7, 8].

Индукционные электромагнитные муфты

Индукционные электромагнитные муфты (рис. 5.28,а) представляют собой индуктор с обмоткой возбужде-

Рис. 5.27. Основные размеры ПЭММ серии МПБ



Тип	d_1	d_{25}	d_{30}	l_1	l_{30}	l_{37}
МПБ-0,63-2	3,8	40	38	11	79,4	25,5
МПБ-1,6-2	3,8	40	45	11	85,4	25,5
МПБ-4-2	5,0	60	57,2	13	112	30,5
МПБ-10-2	5,0	70	70	13	131	31,5
МПБ-25-2	8,0	95	95	17	150,2	35
МПБ-40-2	8,0	100	110	17	154,2	35
МПБ-63-2	9,0	120	125	19	166,2	40

Таблица 5.9

Основные технические данные бесконтактных порошковых электромагнитных муфт серии МПБ

Тип	I_y , А	M_0 , Н·см	$t_{н(п)}$, с	G, кг	Срок службы, ч
МПБ-0,63-2	0,16	0,5	0,015	0,31	1000
МПБ-1,6-2	0,16	1,1	0,020	0,38	1000
МПБ-4-2	0,18	2,8	0,030	0,95	500
МПБ-10-2	0,22	10	0,045	1,65	1000
МПБ-25-2	0,32	20	0,055	3,3	1000
МПБ-40-2	0,40	30	0,065	4,2	500
МПБ-63-2	0,45	60	0,080	5,3	500

Примечания. 1. В условном обозначении типа первая группа цифр означает момент, передаваемый муфтой (при $U_1=24$ В), Н·м.

2. $t_{н(п)}$ — время нарастания частоты вращения выходного вала до номинальной.

ния постоянного тока и якорь, не связанные между собой механически. Используются для гибкой связи ведущей и ведомой частей; для регулирования частоты вращения ведомой части независимо от частоты вращения ведущей части; в качестве предохранительных муфт, ограничивающих передаваемый момент; в качестве тормоза; для реверсирования посредством одной муфты переменного тока с трехфазным индуктором.

По сравнению с другими муфтами ИЭММ обеспечивают возможность

бесступенчатого регулирования частоты вращения ведомой части при постоянной частоте вращения ведущей; повышенную надежность и долговечность; малый статический момент; предохранение от поломок при перегрузках; демпфирование ударов и колебаний. Их недостатки в меньших значениях удельных вращающих моментов и меньшем быстротствии из-за повышенных электромеханической и электромагнитной постоянных времени.

Бесконтактная ИЭММ с неподвижным индуктором показана на рис.

Таблица 5.10

Основные технические данные порошковых электромагнитных муфт серий БПМ и КПМ

Тип	N_y , Вт	$t_{н(м)}$, с	$J_{в} \cdot 10^{-4}$, кг·м ²	G , кг
БПМ-2	2,0	0,015	0,013	0,55
БПМ-5	3,5	0,020	0,030	0,80
БПМ-10	3,5	0,035	0,075	1,30
БПМ-20	5,0	0,040	0,200	2,00
КПМ-2	1,3	0,015	0,013	0,35
КПМ-5	2,4	0,020	0,030	0,60
КПМ-10	2,6	0,035	0,075	1,10
КПМ-20	4,2	0,040	0,130	1,50

Примечания. 1. В условном обозначении типа цифры означают момент, передаваемый муфтой, Н·см.

2. Ток управления муфтами 0,035 А.

3. $t_{н(м)}$ — время нарастания момента до номинального.

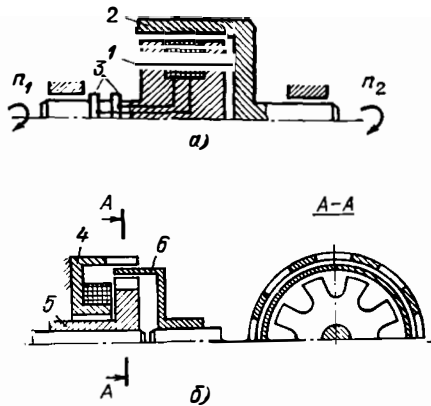


Рис. 5.28. Конструктивные схемы контактной (а) и бесконтактной (б) ИЭММ: 1 — индуктор с обмоткой возбуждения; 2 — якорь; 3 — контактные кольца; 4 — индуктор; 5 — ведущая часть; 6 — ведомая часть

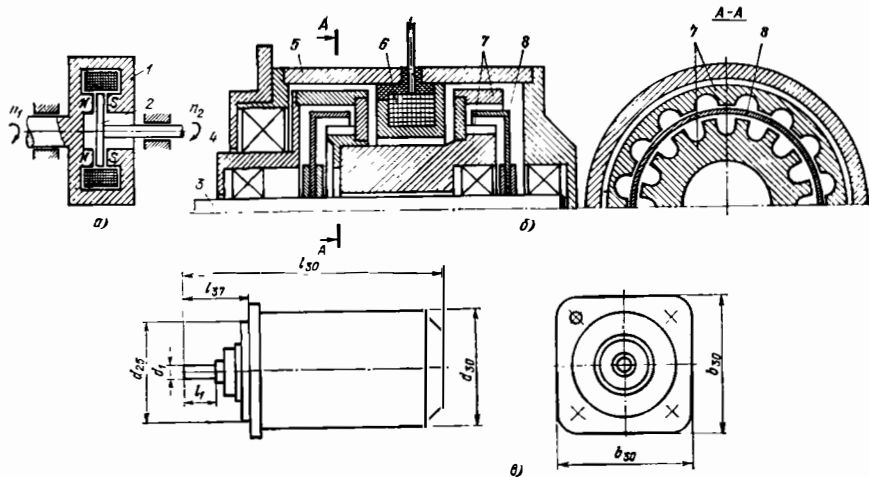


Рис. 5.29. Конструктивная схема ГЭММ (а), бесконтактная ГЭММ серии МГБ (б) и ее основные размеры (в): 1 — индуктор (ведущая часть); 2 — диск из гистерезисного материала (ведомая часть); 3 — ведомый вал; 4 — ведущий вал; 5 — корпус; 6 — катушка; 7 — индуктор; 8 — стакан

Тип	d_1	d_{23}	d_{30}	l_1	l_{30}	l_{37}	b_{30}
МГБ-1,6-3	4	40	45	12	97	21	51
МГБ-1,6-12	4	40	46	12	93	21	51
МГБ-2,5-3	4	50	52	12	98	21	59
МГБ-2,5-12	4	50	52	12	90	21	59
МГБ-4-3	5	60	63	12	112	29	65

5.28,б. Малоинерционный якорь (ведомая часть) выполнен из немагнитного материала с малым удельным сопротивлением в виде тонкостенного диска или стакана. Для усиления магнитной связи с якорем на магнитопроводе предусматривают полюсные вырезы, формирующие общий магнитный поток так, чтобы токи, возникающие в якорь, были максимальными. Расчет таких муфт изложен в [8].

Гистерезисные электромагнитные муфты

Гистерезисные электромагнитные муфты и тормоза (рис. 5.29,а) имеют несвязанные между собой механически индуктор и диск, находящийся в его магнитном поле. Диск изготавливается из ферромагнитного материала с большими удельными потерями на перемагничивание. Магнитное поле индуктора создается ЭМ или постоянным магнитом. Используются для синхронной связи ведущей и ведомой частей с регулировкой передаваемого момента; для создания регулируемого крутящего момента на неподвижной ведомой части (при полимо проскальзывании муфты); в качестве предохранительных муфт (ограничивающих максимальный передаваемый момент) и тормоза.

Гистерезисные электромагнитные муфты имеют стабильные электро-механические параметры в течение длительного срока службы и хранения; малый остаточный момент; высокие допустимые частоты вращения; про-

стое управление. Их коэффициент усиления по мощности ниже, а габариты и момент инерции ведомой полумуфты больше чем у ПЭММ.

На рис. 5.29,б показана конструкция бесконтактных ГЭММ серии МГБ, технические данные сведены в табл. 5.11, а размеры указаны на рис. 5.29,а.

Питание муфт серии МГБ от ИП постоянного тока напряжением до 24 В. Постоянная времени электрической цепи не более 0,02 с. Муфты работают в продолжительном режиме при температуре окружающего воздуха от -60 до $+85^\circ\text{C}$, влажностойчивы при относительной влажности воздуха до 98% при температуре до $+40^\circ\text{C}$, виброустойчивы в диапазоне частот 5...1000 Гц при ускорении до $98,1 \text{ м/с}^2$. Крепление фланцевое. Указания по проектированию и расчету ГЭММ приведены в [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брускин Д. Э. и др. Электрические машины и микромашины. — М.: Высшая школа, 1981.
- Волков Н. И., Миловзоров В. П. Электромашинные устройства автоматики. — М.: Высшая школа, 1978.
- Гаизбург Л. Б., Федотов А. И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов. Справочник. — Л.: Машиностроение, 1980.
- Гордон А. В., Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. — М.: Госэнергониздат, 1960.
- Казаков Л. А. Электромагнит-

Таблица 5.11

Основные технические данные бесконтактных гистерезисных электромагнитных муфт серии МГБ

Тип	I_y , А	N_y , Вт	$M_0 \cdot 10^{-1}$, Н·м	$t_{н(м)}$, с	G , кг	Срок служ-бы, ч
МГБ-1,6-3	0,74	15	30	0,05	0,55	1500
МГБ-1,6-12	0,54	12	60	—	0,55	1500
МГБ-2,5-3	0,85	15	40	0,05	0,7	1500
МГБ-2,5-12	0,66	15	70	—	0,7	1500
МГБ-4-3	0,75	20	50	0,08	1,2	3000

Примечание. В условном обозначении типа первая группа цифр означает момент, передаваемый муфтой, $\times 10^{-1}$ Н·м, вторая — частоту вращения ведущего вала, $\times 10^3$, мин⁻¹.

ные устройства радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1978.

6. Микроэлектродвигатели для систем автоматики (технический справочник)/Под ред. Э. А. Лодочкикова, Ф. М. Юферова.— М.: Энергия, 1969.

7. Могилевский В. Г. Электромагнитные порошковые муфты и тормоза. — М.-Л.: Энергия, 1964.

8. Поляков В. С., Бардаш И. Д., Ряховский О. А. Справочник по муфтам/Под ред. В. С. Полякова. — Л.: Машиностроение, 1979.

9. Электротехнический справочник: Том 2. Электротехнические устройства.— М.: Энергоиздат, 1981.

10. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств.— М.: Высшая школа, 1976.

6. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ МЕХАНИЗМОВ И АНТЕННЫХ УСТАНОВОК

Основные аббревиатуры

АС	— антенная система
АТ	— аэродинамическая труба
АУ	— антенная установка
ВП	— ветровой поток
ГВР	— гололедно-ветровой район
ГИО	— гололедно-изморозевые отложения
НК	— наружная конструкция
ОМИ	— ось максимального излучения
ОП	— отражающая поверхность
СК	— силовой каркас
ТЛК	— типичная проницаемая конструкция
ТЭ	— типичный элемент (конструкции)

6.1. ВЫБОР СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

При проведении аэродинамических расчетов рекомендуется использовать скоростную и связанную системы координат по ГОСТ 20058—80. Ветровой поток рассматривается как плоскопараллельное течение. Его расчетная скорость v_p определяется как геометрическая сумма скорости ветра v и скорости транспортирования антенной установки v_T (рис. 6.1). Скоростная система координат $Ox_a y_a z_a$ имеет скоростную ось Ox_a , ось подъемной силы Oy_a и боковую ось Oz_a . Начало скоростной системы координат O помещают в выбранной точке в соответствии с особенностями решаемой задачи (рекомендуется совмещать O с центром массы АУ — точкой C). Скоростная ось Ox_a горизонтальна и направлена в обратную сторону от v_p . Ось подъемной силы Oy_a направлена вверх по мест-

ной вертикали. Боковая ось Oz_a дополняет оси Ox_a и Oy_a до правой системы координат.

Связанная система координат $Oxyz$, начало которой совпадает с началом скоростной системы координат, имеет продольную ось Ox , нормальную ось Oy и поперечную ось Oz , связанные с АУ. Продольная ось Ox выбирается в соответствии с особенностями решаемой задачи. Нормальная ось Oy направлена к верхней, а поперечная ось Oz к правой части АУ. Для движущихся транспортных устройств ось Ox рекомендуется помещать в плоскости геометрической (или массовой) симметрии и направлять в сторону транспортирования. Для осевых антенн (зеркальных отражателей и фазированных антенных решеток) антенных систем ось Ox (или оси $O_i x_i$ для отдельных элементов АУ) рекомен-

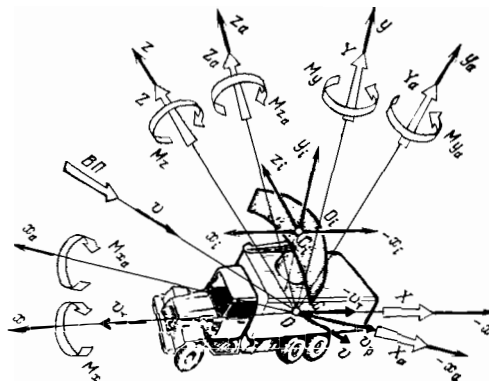


Рис. 6.1. Системы координат для аэродинамических расчетов

дуется совмещать с осью максимального излучения и направлять в сторону этого излучения (или направлять параллельно ОМИ для отдельных элементов АУ, например для вспомогательных антенн).

Для АС с механическим сканированием (вращением или поворотом) по азимуту ось Oy рекомендуется совмещать с осью вращения (поворота) АС (или направлять оси $O_i y_i$ для отдельных элементов АУ параллельно оси вращения). Для АС с механическим сканированием (качанием или наклоном) по углу места ось Oz (или оси $O_i z_i$ для отдельных элементов АУ) рекомендуется направлять параллельно оси качания (наклона) АС.

В общем случае оси скоростной $Ox_a y_a z_a$ и связанной $Oxyz$ систем координат образуют углы: наклона α , поворота β и крена γ . При изменении этих углов связанная система координат следует за АУ, поворачиваясь вокруг осей Oz_a , Oy_a и Ox_a соответственно. При нулевых значениях углов связанная система полностью совпадает со скоростной (рис. 6.2). Плоскости, образуемые

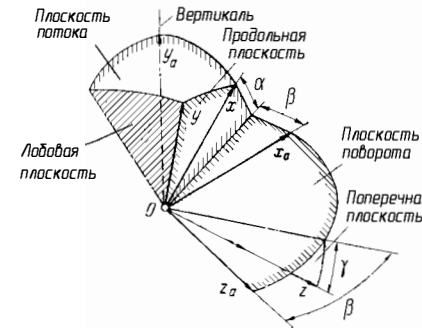


Рис. 6.2. Взаимосвязь скоростной и связанной систем координат

осями скоростной и связанной систем координат, следующие: $x_a Oy_a$ (плоскость потока), $x_a Oz_a$ (плоскость поворота), $y_a Oz_a$ (лобовая плоскость), xOy (продольная плоскость), xOz (главная плоскость), yOz (поперечная плоскость).

Положительные значения углов α , β и γ соответствуют повороту АУ по часовой стрелке вокруг осей Oz_a , Oy_a и Ox_a скоростной системы координат. При этом поворот по часо-

вой стрелке определяется для наблюдателя, смотрящего в положительном направлении оси, вокруг которой осуществляется поворот.

6.2. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ И КОЭФФИЦИЕНТЫ

При проведении расчетов ветровых нагрузок на стадиях эскизного и технического проектов аэродинамические коэффициенты, связывающие сопротивление конструкций ветру и их навстречную площадь, принимают по справочным материалам, полученным на основании исследования простых тел. На стадии рабочего проекта расчетные значения ветровых нагрузок уточняют путем испытаний (продувки) моделей конструкций в аэродинамических трубах [1].

Нагрузка от действия ВП на АУ в целом или на рассматриваемый элемент в общем случае приводится к аэродинамическим силам R и моменту M . Аэродинамическая сила

$$R = \rho_v c_R S = \sqrt{X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (6.1)$$

где ρ_v — нормативный напор ВП [3], Па; c_R — коэффициент аэродинамической силы; S (или S_i) — характерная площадь наружной конструкции (или i -го элемента НК), м²; X_a — сила лобового сопротивления (составляющая силы R по оси Ox_a скоростной системы координат $Ox_a y_a z_a$), Н; Y_a — аэродинамическая подъемная сила (составляющая силы R по оси Oy_a), Н; Z_a — аэродинамическая боковая сила (составляющая силы R по оси Oz_a), Н; X — аэродинамическая продольная сила (составляющая силы R по оси Ox связанной системы координат $Oxyz$), Н; Y — аэродинамическая нормальная сила (составляющая силы R по оси Oy), Н; Z — аэродинамическая поперечная сила (составляющая силы R по оси Oz), Н.

Положительные направления аэродинамических сил показаны на рис. 6.1. Коэффициент c_R аэродинамической силы

$$c_R = \sqrt{c_{x_a}^2 + c_{y_a}^2 + c_{z_a}^2} = \sqrt{c_x^2 + c_y^2 + c_z^2},$$

где c_{x_a} — коэффициент лобового сопротивления; c_{y_a} — коэффициент аэродинамической подъемной силы; c_{z_a} — коэффициент аэродинамической боковой силы; c_x — коэффициент аэродинамической продольной силы; c_y — коэффициент аэродинамической нормальной силы; c_z — коэффициент аэродинамической поперечной силы. Положительные значения коэффициентов аэродинамических сил соответствуют положительным направлениям этих сил.

Пересчет значений коэффициентов аэродинамических сил, полученных в скоростной системе координат при определенных значениях углов α и β , в связанную систему координат (при тех же значениях углов α и β) производится по формулам:

$$\begin{aligned} c_x &= c_{x_a} \cos \alpha \cos \beta - c_{y_a} \sin \alpha + \\ &+ c_{z_a} \cos \alpha \sin \beta; \\ c_y &= c_{x_a} \sin \alpha \cos \beta + c_{y_a} \cos \alpha + \\ &+ c_{z_a} \sin \alpha \sin \beta; \\ c_z &= -c_{x_a} \sin \beta + c_{z_a} \cos \beta. \end{aligned}$$

Аэродинамический момент

$$\begin{aligned} M &= \rho_v m S L = \sqrt{M_{x_a}^2 + M_{y_a}^2 + M_{z_a}^2} = \\ &= \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}, \quad (6.2) \end{aligned}$$

где m — коэффициент аэродинамического момента; L — характерный размер НК (или i -го элемента НК), м; M_{x_a} , M_x — аэродинамические моменты крена (составляющие аэродинамического момента M по оси Ox_a скоростной системы координат $Ox_a y_a z_a$ и по оси Ox связанной системы координат $Oxyz$ соответственно), Н·м; M_{y_a} , M_y — аэродинамические моменты поворота (составляющие аэродинамического момента M по оси Oy_a скоростной системы координат $Ox_a y_a z_a$ и по оси Oy связанной системы координат $Oxyz$ соответственно), Н·м; M_{z_a} , M_z — аэродинамические моменты наклона (составляющие аэродинамического момента M по оси Oz_a скоростной системы координат $Ox_a y_a z_a$ и по оси Oz связанной системы координат $Oxyz$ соответственно), Н·м. Положительные направления аэродинамических моментов показаны на рис. 6.1.

Коэффициент аэродинамического момента

$$\begin{aligned} m &= \sqrt{m_{x_a}^2 + m_{y_a}^2 + m_{z_a}^2} = \\ &= \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}, \end{aligned}$$

где m_{x_a} , m_x — коэффициенты аэродинамических моментов крена; m_{y_a} , m_y — коэффициенты аэродинамических моментов поворота; m_{z_a} , m_z — коэффициенты аэродинамических моментов наклона. Положительные значения коэффициентов аэродинамических моментов соответствуют положительным направлениям этих моментов.

Пересчет значений коэффициентов аэродинамических моментов, полученных в скоростной системе координат при определенных значениях углов α и β , в связанную систему координат (при тех же значениях углов α и β) производится по формулам:

$$\begin{aligned} m_x &= m_{x_a} \cos \alpha \cos \beta + m_{y_a} \sin \alpha - \\ &- m_{z_a} \cos \alpha \sin \beta; \\ m_y &= -m_{x_a} \sin \alpha \cos \beta + m_{y_a} \cos \alpha + \\ &+ m_{z_a} \sin \alpha \sin \beta; \\ m_z &= m_{x_a} \sin \beta + m_{z_a} \cos \beta. \end{aligned}$$

Коэффициенты аэродинамических сил и моментов определяются по известным из испытаний АУ или их моделей значениям соответствующих аэродинамических сил и моментов:

$$\begin{aligned} c_{x_a} &= X_a / (\rho_{сн} S), \\ m_{x_a} &= M_{x_a} / (\rho_{сн} S L); \\ c_{y_a} &= Y_a / (\rho_{сн} S), \\ m_{y_a} &= M_{y_a} / (\rho_{сн} S L); \\ c_{z_a} &= Z_a / (\rho_{сн} S), \\ m_{z_a} &= M_{z_a} / (\rho_{сн} S L), \end{aligned} \quad (6.3)$$

где $\rho_{сн}$ — скоростной напор потока при испытаниях, Па.

При расчете коэффициентов аэродинамических сил и моментов по формулам (6.3) в качестве характерной площади S следует использовать площадь, ограниченную прямоугольным контуром, построенным по габаритным размерам НК. В качестве характерного размера L при расчете

коэффициентов m_{x_a} и m_{z_a} рекомендуется использовать наибольший вертикальный габаритный размер (высоту h) НК, а коэффициента m_{y_a} — наибольший горизонтальный габаритный размер (ширину b) НК.

Аэродинамическая сдвигающая сила

$$Q = \sqrt{X_a^2 + Z_a^2} = \sqrt{X^2 + Z^2}. \quad (6.4)$$

Коэффициент аэродинамической сдвигающей силы

$$c_Q = \sqrt{c_{x_a}^2 + c_{z_a}^2} = \sqrt{c_x^2 + c_z^2}.$$

Аэродинамический опрокидывающий момент

$$M_0 = \sqrt{M_{x_a}^2 + M_{z_a}^2} = \sqrt{M_x^2 + M_z^2}.$$

Коэффициент аэродинамического опрокидывающего момента

$$m_0 = \sqrt{m_{x_a}^2 + m_{z_a}^2} = \sqrt{m_x^2 + m_z^2}.$$

При определении аэродинамических продольных X_i и поперечных Z_i сил, действующих на отдельные элементы НК, рекомендуется учитывать снижение нормативного напора ВП, действующего на затеняемые поверхности (проекции затеняющихся частей НК на поверхности затеняемых частей), умножением ρ_0 на коэффициент K_a [4, 5], учитывающий аэродинамическое взаимовлияние элементов (табл. 6.1). В табл. 6.1 приняты следующие обозначения: l_k — расстояние между затеняющими и затеняемыми частями; h_k — высота за-

тениющей части; S_i — площадь проекции i -й затеняющей части на поперечную плоскость yOz ; S — площадь, ограниченная габаритами затеняющей части. Отношение l_k/h_k принято называть числом калибров, а отношение $\sum_{i=1}^n S_i/S$ — коэффициентом

заполнения и обозначать через η . В случаях, когда расстояния l_k от затеняющей до затеняемой части НК, измеренные по направлению ВП, в пределах затеняемой поверхности неодинаковы, размер l_k следует принимать максимальным из измеренных.

Аэродинамические коэффициенты типичных наружных конструкций. Схема связей скоростной $Ox_a y_a z_a$ и связанной $Oxyz$ систем координат с i -м типичным элементом для общего случая его ориентации относительно направления ВП и произвольной формы контура поперечного сечения (профиля) показана на рис. 6.3. К

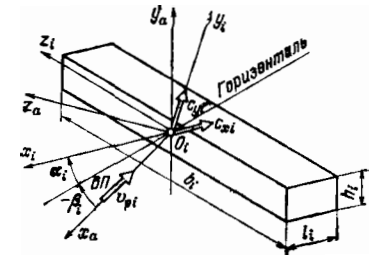


Рис. 6.3. Схема связей систем координат с типичным элементом

типичным относят элементы, имеющие постоянное по длине сечение (балки, фермы, рамы, решетчатые и сетчатые конструкции и т. п.). Влияние угла поворота β ; на коэффициенты аэродинамических сил для i -го ТЭ следует учитывать по формулам

$$c_{x_a} = c'_{x_a} |\cos \beta|; \quad c_{z_a} = c'_{x_a} K_c \sin 2\beta, \quad (6.5)$$

где c_{x_a} — коэффициент лобового сопротивления ТЭ при различных значениях угла β ; c'_{x_a} — коэффициент лобового сопротивления ТЭ при $\beta = 0^\circ$; c_{z_a} — коэффициент аэродинамической боковой силы ТЭ при различных значениях угла β ; K_c — поправочный коэффициент, учитывающий зависимость аэродинамической боковой силы от формы профиля ТЭ.

Таблица 6.1

Значения поправочного коэффициента K_a

l_k/h_k	Отношение $\sum_{i=1}^n S_i/S$ для задней части НК					От 0 до 1
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
До 0,5	0,93	0,75	0,56	0,38	0,19	0
1	0,99	0,81	0,65	0,48	0,32	0,15
2	1	0,87	0,73	0,59	0,44	0,3
4	1	0,9	0,78	0,65	0,52	0,4
6	1	0,93	0,83	0,72	0,61	0,5

Схемы ориентации относительно ВП профилированных прокатных и составных ТЭ с острыми кромками (угловыми точками) показаны на рис. 6.4 (на схеме физически гори-

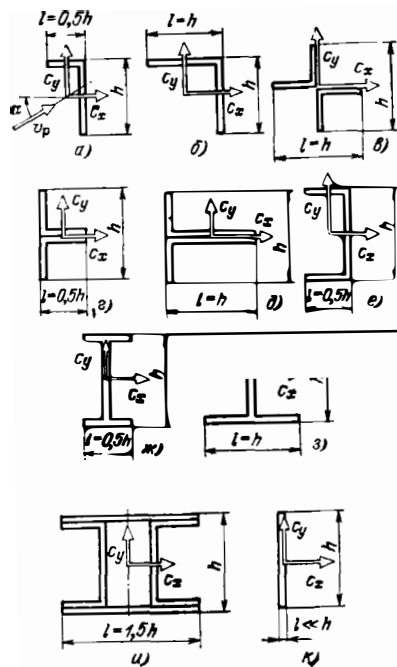


Рис. 6.4. Схемы ориентации ТЭ с острыми кромками

зонтальный вектор расчетной скорости потока v_p условно повернут на угол наклона α против часовой стрелки). Коэффициенты аэродинамических сил для ТЭ, показанных на рис. 6.4, в зависимости от α при $\beta=0$ для числа Рейнольдса $Re=0,69h; v_p \cdot 10^5 \geq 1,5 \cdot 10^5$ принимаются по табл. 6.2 [6]. Указанные значения c_x и c_y даны для ТЭ с соотношениями $(b/h) > 100$ и относятся к характерной площади $S=bh$ (площадь проекции ТЭ на поперечную плоскость yOz при $\alpha=\beta=0$). Следует иметь в виду, что при определении значений числа Re допускается принимать $v_p=v$.

Для ТЭ с соотношениями $(b/h) < 100$ значения c_x и c_y , принятые по табл. 6.2, следует умножить на поправочный коэффициент K_λ (табл. 6.3) [5].

Коэффициент лобового сопротивления $c'_{x\alpha}$ при $\beta=0$ и известных значениях коэффициентов c_x и c_y , принятых на основании табл. 6.2, следует определять по формуле $c'_{x\alpha} = c_x \cos \alpha + c_y \sin \alpha$.

Поправочный коэффициент K_c , учитывающий зависимость аэродинамической боковой силы от формы профиля ТЭ, принимают 0,65; 0,7; 0,62; 0,6 для ТЭ, показанных на рис. 6.4, а-в; г, д; е; ж-и соответственно.

Схемы ориентации относительно направления ВП гладких прокатных и составных ТЭ с закругленными кромками показаны на рис. 6.5. Коэффициенты аэродинамической продольной силы c'_x (при $\alpha=\beta=0$) для ТЭ, показанных на рис. 6.5, в зависимости от числа Re , отношений r/h (здесь r — радиус скругления кромок) и λ принимают по табл. 6.4.

При направлении ВП на центральное ребро трехгранного сечения по схеме рис. 6.5, в коэффициент c'_x , приведенный для этого сечения в табл. 6.4, следует умножить на поправочный коэффициент, равный 0,65, а для многогранников с числом гра-

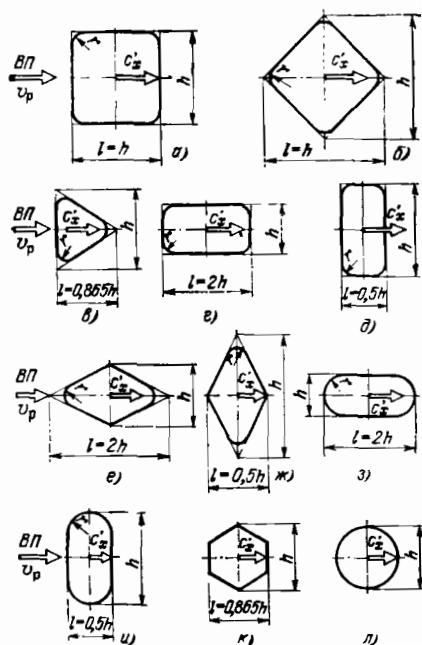


Рис. 6.5. Схемы ориентации ТЭ с закругленными кромками

Значения коэффициентов c_x и c_y для ТЭ с острыми кромками

Схема на рис. 6.4	Коэффициент	Угол наклона ТЭ, град				
		0	45	90	135	180
а	c_x	1,90	1,80	2,00	-1,80	-2,00
	c_y	0,95	0,80	1,70	-0,10	0,10
б	c_x	1,80	1,80	2,10	-1,90	-2,00
	c_y	2,10	1,80	1,80	-1,00	0,30
в	c_x	1,75	0,85	0,10	-0,85	-1,75
	c_y	0,10	0,85	1,75	-0,85	-0,10
г	c_x	1,60	1,50	-0,95	-0,50	-1,50
	c_y	0	-0,10	0,70	1,05	0
д	c_x	2,00	1,20	-1,60	-1,10	-1,70
	c_y	0	0,90	2,15	2,40	2,10
е	c_x	2,05	1,85	0	-1,60	-1,20
	c_y	0	0,60	0,60	0,40	0
ж	c_x	2,05	1,95	0	-1,95	-2,05
	c_y	0	0,60	0,90	0,60	0
з	c_x	1,60	1,50	0	-1,50	-1,60
	c_y	0	0,60	0,90	0,60	0
и	c_x	1,40	1,20	0	-1,20	-1,40
	c_y	0	1,60	2,20	1,60	0
к	c_x	2,10	1,40	0	-1,40	-2,10
	c_y	0	-1,20	0	1,20	0

Таблица 6.3

Значения поправочного коэффициента K_λ перехода от ТЭ бесконечной длины к ТЭ с соотношением λ для НК

$\lambda=b/h$	1	5	10	20	35	50	100
K_λ	0,56	0,62	0,68	0,75	0,85	0,9	1

ней более восьми (рис. 6.5,к) — на коэффициент, равный 0,85.

Коэффициенты аэродинамической продольной силы c'_x (при $\beta=0$) для шероховатых круговых цилиндров в зависимости от числа Re и отношения δ/h (здесь δ — высота неровно-

стей) при $\lambda > 100$ следует принимать по табл. 6.5.

Коэффициенты аэродинамической продольной силы c'_x (при $\alpha=\beta=0$) для эллиптических цилиндров с соотношениями длины большой и малой осей от 2 до 4 при числах Re до $2 \cdot 10^5$ следует принимать в зависимости от направления обдува сечения ВП по табл. 6.6.

При расчете аэродинамических сил, действующих на ТЭ, подвергающиеся совместному воздействию ветра и гололеда, высоту профиля ТЭ определяют по формуле

$$h_r = h + 2\delta_d \cdot 10^{-3}, \quad (6.6)$$

где h_r — высота профиля ТЭ с учетом толщины стенки ГИО, м; h — высота профиля ТЭ, м; δ_d — дейст-

Таблица 6.4

Значения коэффициента c'_x для ТЭ с закругленными краями

Схема на рис. 6.5	r/h	$Re/10^5$	$\lambda=b/h$					
			1	2	5	10	20	30 и более
а	0,370	—	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7
	0,333	До 3	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	1,0
		4 и более	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
	0,167	—	0,7	0,7	0,8	1,0	1,0	1,2
До 0,021	—	1,3	1,3	1,5	1,7	1,7	2,2	
б	0,235	До 3	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
		4 и более	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	0,118	—	0,7	0,7	1,0	1,2	1,2	1,5
До 0,060	—	0,9	0,9	1,1	1,2	1,3	1,6	
в	0,250	До 1	1,1	1,1	1,2	1,4	1,4	1,8
		Свыше 1 до 5,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
	—	Свыше 5,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
	0,083	—	1,1	1,1	1,3	1,5	1,5	1,9
	До 0,010	—	1,2	1,2	1,4	1,6	1,7	2,1
г	0,165	—	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
	0,042	—	0,8	0,8	1,0	1,1	1,1	1,4
	До 0,010	—	1,0	1,0	1,2	1,4	1,4	1,7
д	0,250	—	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,6
	0,083	—	0,9	1,0	1,1	1,2	1,5	1,9
	0,021	—	1,3	1,3	1,5	1,7	1,7	2,2
	До 0,010	—	1,4	1,4	1,6	1,8	1,8	2,3
е	0,333	До 3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	1,1
		4 и более	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
	0,167	—	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	1,1
До 0,042	—	—	—	—	0,8	0,9	1,2	
ж	0,167	—	1,0	1,0	1,1	1,2	1,4	1,7
	0,083	—	—	—	—	—	—	
	0,021	—	1,2	1,2	1,2	1,3	1,5	2,0
з	0,500	До 2	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2
		5 и более	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3

Окончание табл. 6.4

Схема на рис. 6.5	r/h	$Re/10^4$	$\lambda=b/h$					
			1	2	5	10	20	30 и более
и	0,250	До 4	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2	1,6
		5 и более	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
к	0	—	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4
		—	—	—	—	—	—	—
л	—	До 1,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,2
		2,00	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	1,0
		2,75	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8
		3,45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6
		4,15	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
		Свыше 4,5 до 10	—	—	—	—	—	
		13,70	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		21,00	—	—	—	—	—	0,4
		26,50	—	—	—	—	—	0,6
		34,50	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6
Свыше 40	—	—	—	—	—	0,7		

вительная толщина ГИО, мм, определяемая в соответствии с [3].

Коэффициент аэродинамической продольной силы c'_x (при $\beta=0$) для ТЭ, покрытых ГИО, при $\lambda=(b/h) > 100$ принимается равным 2. При $\lambda < 100$ это значение коэффициента c'_x следует умножить на коэффициент K_λ (табл. 6.3).

Аэродинамические коэффициенты типичных наружных конструкций АС. Схемы связи скоростной *Охауаза* и связанной *Охуз* систем координат с типичными проникаемыми для ВП конструкциями для общего случая их ориентации относительно направления ВП (при $\alpha_i=0$) показаны на рис. 6.6. К ТПК относятся плоские и пространственные фермы (в том числе ферменные силовые каркасы отражателей), а также перфорированные, решетчатые и сетчатые отражающие поверхности.

Для плоских ТПК (например, ферм) коэффициент $c'_{x\text{ТПК}}$ аэродинамической продольной силы при $\alpha=0$

$$c'_{x\text{ТПК}} = \frac{\sum_{i=1}^n c'_{xi} S_i}{S}, \quad (6.7)$$

где c'_{xi} — коэффициент аэродинамической продольной силы i -го элемента ТПК; S_i — площадь проекции i -го элемента на поперечную плоскость YOZ , m^2 ; S — характерная площадь ТПК (вычисленная по ее габаритным размерам), m^2 .

Для ряда плоских равноотстоящих (равных по габаритным размерам и по характерной площади) параллельно расположенных ферм при $\alpha=\beta=0$ (рис. 6.7) коэффициент аэродинамической продольной силы для первой фермы определяется по (6.7), а для второй и последующих ферм из круговых цилиндров (труб) при $Re < 4 \cdot 10^5$, а также из прокатных и составных профилей — по формуле $c'_{x\text{ТПК}} = c'_{x\text{ТПК}} K_\alpha$.

Значение числа Re для ферм (ТПК) следует определять, исходя из среднего значения поперечного размера

Таблица 6.5

Значения коэффициента c'_x для шероховатых круговых цилиндров

Re/10 ⁴	(δ/h) · 10 ⁴					
	1	2	Свыше 4 до 5	6	18	40
До 4				1,20	1,20	
6	1,20	1,20	1,20	1,15	1,15	1,20
8		1,15		1,10	1,00	0,60
10	1,20	1,10	1,10	1,00	0,70	0,70
20	1,15	0,95		0,50		0,90
30	1,00	0,60	0,40	0,65	0,80	0,95
40	0,80		0,50	0,70	0,90	
60	0,30	0,45	0,60	0,75		1,00
80	0,35		0,65	0,80	0,95	
100	0,40			—	—	—
200		—		—	—	—
300		—	0,70	—	—	—
400	0,50	—		—	—	—
Свыше 600		—	0,65	—	—	—

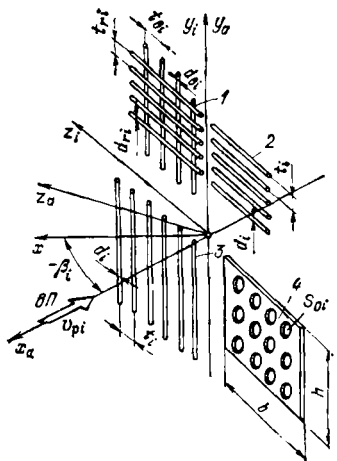


Рис. 6.6. Схемы связи скоростей и связанной систем координат для ТПК: 1 — сетчатая конструкция; 2, 3 — решетчатые; 4 — перфорированная

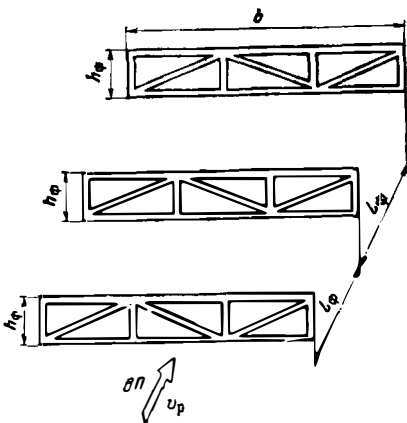


Рис. 6.7. Схема для определения коэффициента аэродинамической продольной силы

Таблица 6.6
Значения коэффициента c'_x для эллиптических цилиндров

Направление обдува	λ = b/h			
	До 5	10	20	Свыше 20
По большой оси сечения	0,4	0,5	0,5	0,6
По малой оси сечения	1,0	1,1	1,1	1,2

(высоты h_r) их элементов, определяемого по формуле (6.6). Для ферм (ТПК) из круглых труб при $Re \geq 4 \cdot 10^5$ коэффициент K_a рекомендуется принимать равным 0,95. При определении числа калибров для системы плоских ферм вместо размеров l_k и h_k следует использовать размеры l_ϕ и h_ϕ .

Для четырехгранных пространственных ферм (рис. 6.8) при $\alpha = \beta = 0$ коэффициент аэродинамической продольной силы

$$c'_{xp} = c'_{xТПК} (1 + K_a). \quad (6.8)$$

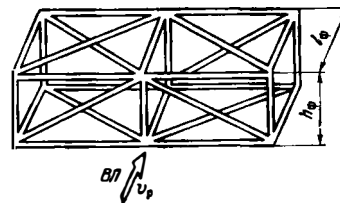


Рис. 6.8. Четырехгранная пространственная ферма

При направлении вектора ВП параллельно диагонали контура поперечного сечения четырехгранной пространственной фермы ($\alpha > 0$) значения коэффициентов c'_{xp} , полученные по формуле (6.8), следует умножить на поправочный коэффициент, равный 1,2.

Для трехгранных пространственных ферм (рис. 6.9) при $\alpha = \beta = 0$ и $h > 0,1$ значения коэффициентов c'_{xp} ,

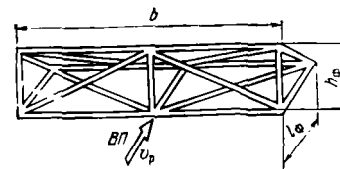


Рис. 6.9. Трехгранная пространственная ферма

полученные расчетом по (6.8), следует умножить на поправочный коэффициент, равный 0,9. При определении числа калибров для трехгранных ферм вместо l_k и h_k используют размеры l_ϕ и h_ϕ .

Для плоских решетчатых ОП зеркальных отражателей (рис. 6.6) или малых участков криволинейных решетчатых ОП при $\alpha = \beta = 0$ коэффициент аэродинамической продольной силы следует определять по (6.7). Для плоских решетчатых ОП, имеющих проводники в виде круговых цилиндров диаметром d , расположенные равномерно с шагом t , при $\alpha = \beta = 0$ коэффициент аэродинамической продольной силы $c'_{x0} = c'_x d/t$. Отношение d/t принято называть коэффициентом заполнения решетчатой ОП и обозначать через η .

Для плоских сетчатых ОП или малых участков криволинейных сетчатых ОП при $\alpha = \beta = 0$ коэффициент аэродинамической продольной силы c'_{x0} следует определять по формуле (6.7). Для плоских сетчатых ОП, имеющих вертикальные и горизонтальные проводники в виде круговых цилиндров диаметрами d_b и d_r , расположенные равномерно с шагами t_b и t_r соответственно (см. рис. 6.6), при $\alpha = \beta = 0$ коэффициент аэродинамической продольной силы

$$c'_{x0} = c'_x \left(\frac{d_b}{t_b} + \frac{d_r}{t_r} - \frac{d_b d_r}{t_b t_r} \right). \quad (6.9)$$

Значение c'_x определяется по табл. 6.5 в соответствии со значениями числа Re, рассчитанными на основании средних значений d_b и d_r .

Для плоских перфорированных ОП или малых участков криволинейных перфорированных ОП (см. рис. 6.6) при $\alpha = \beta = 0$ коэффициент аэродинамической продольной силы

$$c'_{x0} = c'_x \eta c'_\lambda,$$

где c'_x — коэффициент аэродинамической продольной силы элементов перфорированной поверхности; η_0 — коэффициент заполнения перфорированной ОП; K'_λ — коэффициент перехода от ОП с $\lambda \rightarrow \infty$ к ОП с λ , имеющими конечные значения. Коэффициент заполнения перфорированной ОП

$$\eta_0 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_{oi}}{S}$$

где $\sum_{i=1}^n S_{oi}$ — суммарная площадь n

отверстий на рассматриваемом участке ОП, m^2 ; S — характерная площадь рассматриваемого участка ОП, вычисленная по его габаритным размерам, m^2 .

Коэффициент аэродинамической продольной силы элементов перфорированной поверхности c'_x в зависимости от коэффициента заполнения ОП определяется по табл. 6.7.

Таблица 6.7

Значения коэффициента c'_x для перфорированных ОП

η_0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
c'_x	1,5	1,5	1,5	1,5	2

Для перфорированных ОП с $\eta_0 > 0,1$ коэффициент K'_λ принимается в соответствии с табл. 6.8.

Коэффициент аэродинамической продольной силы для зеркальных антенн или фазированных антенных решеток пронцаемой конструкции при $\alpha = \beta = 0$ определяется по формуле

$$c'_x = c'_{x0} + K'_a c'_{xk}, \quad (6.10)$$

где c'_{x0} и c'_{xk} — коэффициенты аэродинамических продольных сил ОП и силового каркаса, определяемые по формулам для геометрически сходных с ними ТПК; K'_a — коэффициент, учитывающий аэродинамическое взаимовлияние ОП и СК и определяемый по табл. 6.9.

Для зеркальных антенн и фазированных антенных решеток со сплош-

Таблица 6.8
Значения коэффициента K'_λ для перфорированных ОП

η_0	$\lambda = b/h$					
	до 2	5	7	10	20	50
0,10	0,96	0,97	0,97	0,98	0,99	0,99
0,25	0,93	0,95	0,95	0,96	0,98	0,99
0,50	0,88	0,91	0,92	0,94	0,98	0,99
0,75	0,85	0,89	0,90	0,92	0,95	0,97
0,90	0,83	0,87	0,88	0,90	0,94	0,96
0,95	0,73	0,76	0,77	0,80	0,87	0,95
0,97	0,66	0,67	0,68	0,71	0,80	0,90
1,00	0,59	0,60	0,61	0,65	0,75	0,90

Примечание. При $\lambda = 60$ и более $K'_\lambda = 1$.

Таблица 6.9

Значения коэффициента K'_a для зеркальных антенн и фазированных антенных решеток пронцаемой конструкции

η_0	До 0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7 и более
K'_a	1,0	0,82	0,65	0,50	0,35	0

ной параболической ОП ($\eta_0 = 1$) или со сплошным заполнением ОП (или СК) гололедно-изморозевыми отложениями коэффициент аэродинамический

Таблица 6.10

Значения коэффициента c'_x для зеркальных антенн и фазированных антенных решеток сплошной конструкции

K_f	0	1	2	3	4	5
c'_x	1,20	1,25	1,30	1,35	1,55	1,60

ской продольной силы c'_x при $\alpha = \beta = 0$ и $\lambda < 10$ принимается в зависимости от коэффициента $K_f = L/F$ (здесь L — характерный размер антенны; F — фокусное расстояние ОП) по табл. 6.10.

6.3. ОСНОВЫ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

При экспериментальном определении аэродинамических характеристик возникает вопрос, какими должны быть условия проведения опыта, чтобы результаты испытаний моделей АУ могли быть использованы при разработке натуральных АУ.

Скорость естественного ветра представляет собой векторную величину со случайными изменениями не только во времени, но и в пространстве. Поэтому проведение аэромеханических экспериментов в натуральных условиях связано с необходимостью учета комплекса случайных факторов, что снижает достоверность результатов. Кроме того, при проведении натуральных экспериментов затруднен активный поиск оптимальных конструктивных решений, поскольку значительно возрастают затраты. Лабораторные аэродинамические исследования на моделях с последующим пересчетом полученных данных на натурные изделия предпочтительны не только из-за их высокой экономической эффективности. Исследования, выполняемые в АТ, позволяют глубже проникать в сущность изучаемого явления и осуществлять оптимизацию конструкций по их аэромеханическим параметрам.

Опыты в лабораторных условиях практически всегда проводятся на небольших схематизированных моделях АУ. При этом зачастую нет точного геометрического подобия между моделью и натурной АУ или нет соответствия в величинах относительных скоростей потока. Полное подобие течений воздуха, обтекающих АУ и ее модель, наблюдается, если выполняются условия их геометрического подобия (отношение любых двух произвольно выбранных сходственных размеров постоянно), кинематического подобия (равенство отношений скоростей в сходственных точках потоков) и динамического подобия (в сходственных точках двух потоков соблюдается подобие много-

угольников векторов сил, действующих на соответствующие элементы АУ и ее модели). Если не все физические величины, характеризующие обтекание модели в натуре, находятся в определенном постоянном отношении, то подобие является неполным (частичным). Оно обычно и применяется на практике.

Силовое воздействие воздушного потока на тело зависит от различных факторов: вязкости, температуры и плотности воздуха, скорости и турбулентности воздушного потока и т. д. В связи с этим значение результирующей аэродинамической силы также определяется указанными факторами. Основные формулы для аэродинамических сил и моментов (6.1) и (6.2) справедливы и для натурального объекта, и для модели. В процессе лабораторных исследований определяются значения сил и моментов, действующих на модель при определенной скорости потока, а затем по этим данным и заранее известным характерным геометрическим параметрам модели для нее рассчитываются коэффициенты аэродинамических сил и моментов.

Значения этих коэффициентов для одного и того же тела могут быть различны в зависимости от того, какая площадь или длина вводятся в качестве характерной площади S и характерной длины L в (6.3). Сравнивать между собой значения одноименных коэффициентов разных по форме и размерам тел можно лишь в том случае, если эти значения получены по идентичным для всех тел площадям и длинам (например, для тел с адекватной ориентацией по отношению к ВП принято использовать площадь миделевого сечения). Поэтому в данных об аэродинамических коэффициентах должно оговариваться, какие размеры и площади принимаются за характерные [2]. Если обтекание тела зависит главным образом от вязкости среды, основным критерием подобия является число Re . При частичном динамическом подобии по вязкости должны быть равными числа Re полиоразмерного тела и его модели. Кинематическая вязкость воздуха слабо зависит от температуры, поэтому достаточно равенства для натурального изделия и его модели соответствующих произведенных скорости потока и характерного размера. Но в большинстве случаев

чаев размеры АТ позволяют испытывать только маломасштабные модели АУ. Увеличивать же скорость потока в АТ можно лишь до некоторого предела, поскольку уже при скорости около 70 м/с начинает сказываться сжимаемость воздуха.

Указанные затруднения преодолевают тем, что при испытаниях моделей АУ обеспечивают значения числа Re, превышающие некоторое критическое значение, так как в этом случае все аэродинамические параметры тела становятся независимыми от числа Re. Так, для плохообтекаемых тел критическое значение Re при обтекании равномерным мало-возмущенным потоком примерно равно $2 \cdot 10^5$. К плохообтекаемым телам относятся и типичные элементы АУ, что обусловлено следующими особенностями формы их обводов: большой относительной толщиной сечений; наличием плоских и вогнутых поверхностей, расположенных поперек потока; обилием острых кромок и т. п.

Для исследования плохообтекаемых тел одной из наиболее удобных является АТ типа А-6. Она имеет открытую рабочую часть, что облегчает монтаж модели и наблюдения за ней в процессе испытаний. Скорость потока в ней можно изменять от 0 до 50 м/с. Сечение рабочей части (эллипс с осями 2,33 и 4 м) позволяет испытывать модели с габаритными размерами до 1 м, что обеспечивает числа Re, превышающие критическое для плохообтекаемых тел значение. Отношение площади миделевого сечения модели к площади рабочей части АТ должно быть не более 0,05. Неравномерность скорости по сечению составляет до $\pm 0,5\%$, скосы потока в горизонтальной и вертикальных плоскостях — до $\pm 0,25^\circ$: а начальная турбулентность потока — не более 0,2%.

Для динамического подобия при экспериментальном изучении периодически повторяющихся явлений требуется соблюдение кинематического подобия. Соответствующий критерий подобия называется числом Струхала Sh:

$$Sh = \frac{fL}{v}, \quad (6.11)$$

где f — частота колебаний, Гц; L — характерный размер НК. Из (6.11) следует, что при испытаниях модели в АТ и значениях скорости потока v , равных значениям скоростей ВП

для натурной АУ, модель необходимо вращать (или качать) со скоростью в K_m раз большей, чем соответствующая скорость, имеющаяся на натурной АУ (здесь K_m — коэффициент геометрического подобия, равный величине, обратной масштабу моделирования).

Пример расчета. Определить максимальные ветровые нагрузки, действующие на АУ, схема которой представлена на рис. 6.1, в условиях VI гололедно-ветрового района при периоде повторения воздействия $T_n^{мф} = 20$ лет и периоде собственных колебаний АУ $T_c = 1$ с.

В качестве расчетного принимаем случай ориентации кузова базовой машины бортом перпендикулярно направлению ВП, а ось максимального излучения АС расположена параллельно направлению ВП.

Зеркальный отражатель имеет сетчатое ОП из проводников диаметром $d = 6$ мм, расположенных с шагом $t = 30$ мм, и эллиптический контур с осями $a_0 = 5$ и $b_0 = 3$ м. Силовой каркас отражателя выполнен в виде трехгранной фермы из труб диаметром $d_T = 30$ мм и общей длиной $L_T = 100$ м. Отношение l_k/h_k по длине СК одинаково и примерно равно 0,5. Высота расположения центра ветрового давления отражателя над установочной поверхностью (землей) $H = 5,1$ м.

Корпус привода имеет форму усеченного конуса с большим и малым диаметрами, равными 1 и 0,6 м соответственно, и высотой 0,75 м. Площадь, вычисленная по наружным обводам корпуса, составляет 0,6 м². Высота расположения центра ветрового давления корпуса над установочной поверхностью равна 3,1 м.

Кузов базовой машины имеет высоту 2,3 м, отношение радиуса сопряжения крыши с бортом к высоте примерно равно 0,17, а отношение ширины кузова к его высоте — 2,4. Площадь общей обдуваемой ВП поверхности базовой машины примерно составляет 14 м², а высота расположения центра ветрового давления над установочной поверхностью — 1,5 м.

1. При $T_n^{мф} = 20$ лет определяем максимальную скорость ветра: $v_{max} = 45$ м/с [3].

2. По кривым $K_{ph} = f(h)$ и $K_{p_{днн}} = f(T_c)$ [3] при $H < 10$ м, $T_c = 1$ с

и $v = 45$ м/с получаем $K_{ph} = 1$, $K_{p_{днн}} \approx 2$, $K_{p_{пр}} = 0,35$.

3. Нормативный ветровой напор, действующий на наветренную поверхность АУ [3],

$$\begin{aligned} p_v &= 0,612 v^2 K_{ph}^p (1 + K_{p_{пр}}^p K_{p_{днн}}^p) = \\ &= 0,612 \cdot 45^2 \cdot 1 (1 + 0,35 \cdot 2) = \\ &= 2113 \text{ Па} = 2,113 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

4. Площадь, вычисленная по наружным обводам отражателя,

$$S = \frac{\pi}{4} a_0 b_0 = \frac{3,14}{4} 5 \cdot 3 \approx 12 \text{ м}^2.$$

5. По формуле (6.9) коэффициент аэродинамической продольной силы ОП отражателя при $d_T = d_n = d$ и $t_T = t_n = t$ (см. рис. 6.6)

$$c_{x0} = c'_x \eta_0 = c'_x \left(2 \frac{d}{t} - \frac{d^2}{t^2} \right).$$

6. Значение числа Re для проводников ОП

$$\begin{aligned} Re_i &= 0,69 h_i v_{pi} \cdot 10^5 = \\ &= 0,69 \cdot 0,006 \cdot 45 \cdot 10^5 = 0,1865 \cdot 10^5. \end{aligned}$$

7. Для ТЭ по рис. 6.5,а при $Re = 0,1865 \cdot 10^5 < 1,5 \cdot 10^5$ и $\lambda > 30$ из табл. 6.4 определяем $c'_{x\alpha} = 1,2$.

$$\begin{aligned} \text{Тогда } c'_{x0} &= 1,2 \left(2 \frac{6}{30} - \frac{6^2}{30^2} \right) = \\ &= 1,2 \cdot 0,36 = 0,43. \end{aligned}$$

8. Суммарная наветренная площадь труб СК

$$\sum_{i=1}^n S_i \approx d_T L_T = 0,03 \cdot 100 = 3 \text{ м}^2.$$

9. Коэффициент заполнения СК

$$\eta_k = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} = \frac{3}{12} = 0,25.$$

Сводные данные к расчету ветровых нагрузок

Наименование ТЭ	S, м ²	c'x	H, м	X, кН	Mx, кН·м
Отражатель	12,0	0,56	5,1	14,20	72,50
Корпус привода	0,6	0,65	3,1	0,82	2,54
Базовая машина	14,0	0,75	1,5	22,10	33,20
АУ в целом	26,6	—	—	37,12	108,24

10. Коэффициент аэродинамической продольной силы ТПК (СК)

$$c'_{x \text{ ТПК}} = c'_x \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} = c'_x \eta_k.$$

11. Рассчитываем значение числа Re для труб СК

$$Re = 0,69 \cdot 0,03 \cdot 45 \cdot 10^5 = 0,93 \cdot 10^5.$$

12. Для ТЭ по рис. 6.5,а, при $Re = 0,93 \cdot 10^5 < 1,5 \cdot 10^5$ и $\lambda > 30$ из табл. 6.4 определяем $c'_{x\alpha} = 1,2$.

Тогда $c'_{x \text{ ТПК}} = 1,2 \cdot 0,25 = 0,3$.

13. При $l_k/h_k = 0,5$ и $\eta_k = 0,25$ по табл. 6.1 получаем $K_a = 0,65$ и тогда коэффициент аэродинамической продольной силы СК отражателя

$$\begin{aligned} c'_{xk} &= 0,9 c'_{x \text{ ТПК}} K_a = \\ &= 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,65 = 0,175. \end{aligned}$$

14. По табл. 6.9 при $\eta_0 = 0,36$ коэффициент $K'_a = 0,73$ и тогда коэффициент аэродинамической продольной силы отражателя определяется по (6.10):

$$\begin{aligned} c'_x &= c'_{x0} + c'_{xk} = \\ &= 0,43 + 0,73 \cdot 0,175 \approx 0,56. \end{aligned}$$

15. Определяем значение числа Re для корпуса:

$$Re = 0,69 \frac{0,6 + 1,0}{2} \cdot 45 \cdot 10^5 = 2,48 \cdot 10^5.$$

Таблица 6.11

16. Для ТЭ по рис. 6.1 при $Re = 2,48 \cdot 10^6$ и $\lambda \approx 1$ из табл. 6.4 определяем для корпуса $c'_x = 0,65$.

17. Вычисляем значение числа Re для кузова:

$$Re = 0,69 \cdot 2,3 \cdot 45 \cdot 10^6 = 7,15 \cdot 10^6.$$

18. Для ТЭ по рис. 6.5,а при $Re = 7,15 \cdot 10^6$, $\lambda = 2,4$ и $r/h = 0,17$ из табл. 6.4 определяем для кузова $c'_x = 0,75$, который принимаем для базовой машины в целом.

19. Полученные значения S , c'_x и H помещаем в табл. 6.11. Аэродинамическую продольную силу определяем по формуле $X = \rho \cdot c'_x S$, а аэродинамический момент наклона — $M_x = \rho \cdot X H$. Полученные значения заносим в табл. 6.11.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горлин С. М., Слезингер И. И. Аэромеханические измерения: Методы и приборы. — М.: Наука, 1964.

2. Горлин С. М. Экспериментальная аэромеханика. — М.: Высшая школа, 1970.

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

4. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. — М.: Стройиздат, 1972.

5. Савицкий Г. А. Расчет антенных сооружений. — М.: Связь, 1978.

6. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. — М.: Стройиздат, 1978.

В. ХАРАКТЕРНЫЕ УЗЛЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

7. УЗЛЫ СВЧ ТРАКТОВ И АНТЕНН

Основные аббревиатуры

ВВП	— высокочастотный полосковой волновод
ДМ	— делитель мощности
ДМВ	— дециметровые волны
ДН	— диаграмма направленности
КБВ	— коэффициент бегущей волны
КВП	— коаксиально-волноводный переход
КНД	— коэффициент направленного действия
КПВ	— копланарный полосковый волновод
КПД	— коэффициент полезного действия
КПП	— коаксиально-полосковый переход
КСВН	— коэффициент стоячей волны по напряжению
КУ	— коэффициент усиления
ЛП	— линия передачи
МВ	— метровые волны
МПВ	— микрополосковый волновод
МЭК	— Международная электротехническая комиссия
НО	— направленный ответчик
НПВ	— несимметричный полосковый волновод
ПВ	— полосковый волновод
РК	— радиочастотный коаксиальный кабель
РПМ	— радиопоглощающий материал
РРЛ	— радиорелейная линия
СКПВ	— связанные копланарные полосковые волноводы
СМВ	— сантиметровые волны
СММВ	— субмиллиметровые волны
СМПВ	— связанные микрополосковые волноводы
СНПВ	— связанные несимметричные полосковые волноводы

СПВ	— симметричный полосковый волновод
ССПВ	— связанные симметричные полосковые волноводы
СР	— соединитель радиочастотный
ЩПВ	— связанные щелевые полосковые волноводы
ТКЛР	— температурный коэффициент линейного расширения
ТКС	— температурный коэффициент сопротивления
ТК ϵ	— температурный коэффициент диэлектрической проницаемости
ФВ	— фазовращатель
ЩПВ	— щелевой полосковый волновод
ЭПВ	— экранированный полосковый волновод
ЭМГ	— электромагнитный (-ое)

7.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОСОБЕННОСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА [1, 4]

ЭМГ поле характеризуется: **E** — вектором напряженности электрического поля; **D** — вектором электрического смещения или электрической индукции; **H** — вектором напряженности магнитного поля; **B** — вектором магнитной индукции. С ЭМГ полем связаны заряды Q и токи I , создаваемые полем или создающие это поле. Длина волны ЭМГ колебаний λ , м, и частота ν , Гц, в вакууме связаны соотношением $\lambda = c/\nu$ ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света.)

К диапазону СВЧ относят участок спектра ЭМГ колебаний от 300 МГц до 3000 ГГц, подразделяемый на поддиапазоны: дециметровых ($\lambda = 100 \dots 10$ см; $\nu = 300 \dots 3000$ МГц); сантиметровых ($\lambda = 10 \dots 1$ см; $\nu =$

$= 3 \dots 30$ ГГц); миллиметровых ($\lambda = 10 \dots 1$ мм; $\nu = 30 \dots 300$ ГГц) и децимиллиметровых ($\lambda = 1 \dots 0,1$ мм; $\nu = 300 \dots 3000$ ГГц) волн.

Единый подход к методам конструирования и технологии изготовления типовых устройств СВЧ определяется:

поверхностным эффектом, при котором плотность тока на глубине проникновения δ_e уменьшается в $e = 2,72$ раза (это используется при конструировании узлов из несущего диэлектрика с тонким (5...100 мкм) металлическим покрытием [7]);

явлениями отражения и преломления электромагнитных волн на границе раздела различных материалов (воздух — проводник, воздух — диэлектрик, диэлектрик — диэлектрик и т. д.), что используется при конструировании диэлектрических и металлических экранов, согласующих устройств, поглощающих нагрузок и покрытий, дифракционных антенн и т. д.;

необходимостью учета фазового запаздывания ЭМГ процесса, т. к. физические размеры элементов СВЧ соизмеримы или превышают рабочую длину волны.

7.2. МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ СВЧ [3, 5, 22, 23]

Эти материалы характеризуются следующими основными ЭМГ параметрами:

удельной электрической проводимостью σ_e , См/м (проводники имеют $\sigma_e \gg 1$, диэлектрики — $\sigma_e \ll 1$, полупроводники — $0,01 < \sigma_e < 100$); относительной диэлектрической

проницаемостью $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м — для вакуума);

относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = \mu/\mu_0$ ($\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Г/м — для вакуума);

тангенсом диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_e$ (потери в материале, обусловленные электрическим полем);

тангенсом магнитных потерь $\text{tg } \delta_\mu$ (потери, обусловленные магнитным полем). В большинстве случаев устройства СВЧ являются конструктивными сочетанием проводников, диэлектриков и магнитодиэлектриков.

Металлы. Выбор типа материала, требования к точности, способу обработки и шероховатости токонесущих элементов конструкций СВЧ устройств определяются в основном явлением поверхностного эффекта. Сопротивление СВЧ току поверхностного слоя проводника оценивается через поверхностное сопротивление, Ом, на произвольный квадрат токонесущей поверхности: $R_{\square} \approx (\delta_e \sigma_e)^{-1}$

(где σ_e — глубина проникновения тока, мкм; σ_e — удельная проводимость, См/м). Токонесущие элементы СВЧ выполняются из металлов с высокой удельной проводимостью (табл. 7.1). Шероховатость токонесущей поверхности по сравнению с идеально гладкой поверхностью приводит к росту активных потерь. Выбор класса чистоты обработки токонесущей поверхности N_m (ГОСТ 2789—73) СВЧ конструкций при условии, что шероховатость увеличивает активные потери не более чем на 10%, производится по [6]: $N_m \geq \ln^2(35/\delta_e)$. Пример расчетной зависимости требуемого класса чистоты

обработки N_m латунной поверхности в функции рабочей длины волны λ_0 приведен на рис. 7.1.

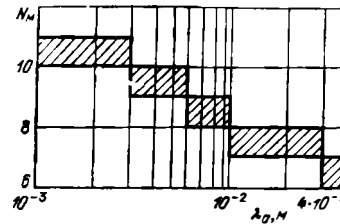


Рис. 7.1. Зависимость требуемого класса чистоты обработки N_m латунной поверхности от длины волны λ_0 при увеличении потерь за счет шероховатости на 10%

Проводимость зависит не только от физических свойств материала, но и от вида обработки токонесущей поверхности [5], при выборе которой следует учитывать, что после чистовой механической обработки образуется поверхностный слой толщиной до десятков мкм с размерными элементами до 0,001...0,01 мкм зерна металла. Такой слой обладает меньшим электрическим сопротивлением, чем шлифованный или полированный слой металла толщиной не более 0,1 мкм, но с частицами полировальной пасты и абразива. Поэтому (особенно в диапазонах миллиметровых и децимиллиметровых волн) полирование токонесущей поверхности не всегда приводит к уменьшению потерь, необходимо удалять поверхностный слой путем химического или электрохимического полирования. Задачей конструктора — разработчика устройств СВЧ является установление требуемого класса шероховатости рабочих поверхностей конструкций, а технолога — выбор соответствующих режимов и способов обработки.

Для уменьшения потерь на СВЧ основной металл покрывается слоем металла с высокой проводимостью (серебро, медь, золото) толщиной $t \geq \delta_e$ [7]. Для $\lambda \approx 10$ см t серебряного покрытия 25...30 мкм; для $\lambda \approx 3$ см — 10...15 мкм; для $\lambda \approx 1$ см — 7...10 мкм. Применение сплавов на основе серебра (например, серебро — палладий 1...1,5%) повышает износостойкость покрытия в 4—5 раз [2]. Покрытие из меди применяется в биметаллических волно-

водах для РРЛ [20]; никель, хром, палладий, кадмий и родий используются в качестве покрытий, устойчивых к воздействию окружающей среды. Чистота поверхности при покрытии меняется: блестящее серебрение увеличивает чистоту с 7—8 класса до 10; матовое серебрение — с 5—6 класса до 6—7; кадмирование снижает класс чистоты с 7—8 до 6—7; фосфатирование — с 5—6 до 4—5; оксидирование — с 6—7 до 6 [2].

Диэлектрические материалы. Используются в качестве заполнителей различных линий передачи, герметизирующих и согласующих вставок, антенных обтекателей, покрытий, поглотителей мощности и т. д. Диэлектрические материалы на СВЧ должны обладать малыми потерями ($\text{tg } \delta_e \leq 5 \cdot 10^{-4}$), высоким напряжением пробоя, малым ТКЛР, слабой зависимостью основных параметров (ϵ_r , $\text{tg } \delta_e$) от частоты, температуры и времени (свойства твердых диэлектриков СВЧ см. в табл. 7.15, 7.16). Характеристики лаков и эмалей, используемых для покрытия токонесущих поверхностей устройств СВЧ, даны в табл. 7.2. Для миниатюризации различных устройств СВЧ (волноводы, полосковые линии и т. д.) их заполняют пластмассами с наполнением титановыми соединениями, имеющими высокое значение ϵ_r (см. табл. 7.15). Тракты СВЧ для повышения электрической прочности заполняются газообразными диэлектриками (см. табл. 7.30).

Шероховатость поверхности твердых диэлектриков по сравнению с идеальной гладкой поверхностью приводит к уменьшению коэффициента прохождения и увеличению коэффициента отражения (например, поверхности стенок антенных обтекателей). Требуемый класс чистоты обработки поверхности диэлектрика N_d (ГОСТ 2789—63) для случая нормального падения волны определяется по формулам [8]:

$$N_d |\Delta R_{\text{доп}}| \geq \ln^2 [0,25 \cdot 10^{-3} \times \times e_r^{0,5} \lambda_0^{-1} |\Delta R_{\text{доп}}|^{-2}];$$

$$N_d |\Delta T_{\text{доп}}| \geq \ln^2 [0,25 \cdot 10^{-3} \times \times e_r^{0,5} \lambda_0^{-1} |\Delta T_{\text{доп}}|^{-2}];$$

Таблица 7.1

Характеристики металлов на СВЧ

Металл	Удельная проводимость на постоянном токе $\sigma_e \times 10^{-7}$, См/м	Глубина проникновения тока $\sigma_e \times \lambda_0^{-0,5}$, мкм	Поверхностное сопротивление $R_{\square} \times \lambda_0^{-0,5}$, Ом
Серебро (100%)	6,1	0,37	0,044
Медь (100%)	5,5	0,39	0,047
Алюминий (100%)	3,2	0,51	0,061
Латунь (70% Cu)	1,6	0,73	0,086
Прнпой (мягкий)	0,7	1,10	0,130
Бронза фосфатная	0,9	0,98	0,177

Примечание. λ_0 — длина волны в воздухе, см.

Таблица 7.2

Характеристики некоторых лаков и эмалей для покрытия токонесущих поверхностей СВЧ устройств ($\nu = 10^9$ Гц)

Материал	ϵ_r^*	$\text{tg } \delta_e^*$	ρ_e^{***} , Ом·см
Лак 976-1	3,9/4,3	0,005/0,012	$10^{14}/10^{13}$
Лак СБ-1С	3,4/2,6	0,02/0,02	$15 \cdot 10^{14}/10^{12}$
Эмаль ЭП-74	3,2/4,5	0,026/0,028	$4 \cdot 10^{16}/4,9 \cdot 10^{14}$

*) В нормальных условиях при $\theta = 293$ К после 100 ч пребывания в условиях тропической влажности.

**) Значения для сухого/влажного материалов.

($|\Delta R_{\text{доп}}|$ и $|\Delta T_{\text{доп}}|$ — соответственно допустимые значения изменения модуля коэффициентов отражения и прохождения за счет шероховатости поверхности; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала; λ_0 — рабочая длина волны в воздухе, м). Примеры расчетных зависимостей требуемого класса чистоты обработки N_d поверхности диэлектрика в функции рабочей длины волны λ_0 даны на рис. 7.2.

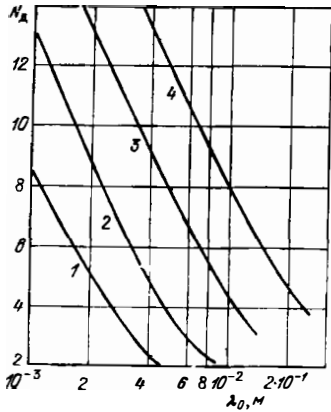


Рис. 7.2. Зависимости требуемого класса чистоты обработки N_d поверхности диэлектрика от длины волны λ_0 : 1, 3 — $\epsilon_d = 2$; 2, 4 — $\epsilon_d = 9$; 1, 2 — $|\Delta R_{\text{доп}}|^2 = |\Delta T_{\text{доп}}|^2 \leq 0,002$; 3, 4 — $|\Delta R_{\text{доп}}|^2 = |\Delta T_{\text{доп}}|^2 \leq 0,005$

сеяния в металлических проводниках и диэлектрических элементах, и делятся на открытые (рис. 7.3 а—д) и закрытые (рис. 7.3, е—к). В открытых ЛП поле направляемой ЭМГ волны не экранировано снаружи; основными недостатками являются потери на излучение и зависимость поля от внешних воздействий (атмосферные осадки, влияние окружающих предметов). Закрытые ЛП экранированы снаружи металлическими проводниками; обладают малыми потерями, высокой пробивной мощностью и высокой помехозащищенностью. Выбор типа ЛП определяется рабочим диапазоном частот и назначением устройства.

Электрические характеристики ЛП. Типы волн:

поперечная ЭМГ волна (Т-волна) — вектора E и H лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения;

электрическая волна (Е-волна) — вектор E имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор H лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения;

магнитная волна (Н-волна) — вектор H имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор E лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения;

гибридная волна (НЕ-, ЕН волна) — волна с отличными от нуля поперечными и продольными составляющими векторов E и H (НЕ — с преобладанием в поперечном сечении поля H ; ЕН — с преобладанием в поперечном сечении поля E);

критическая частота (длина волны) $\nu_{кр}$ ($\lambda_{кр}$) — наименьшее значение ν , при котором в ЛП возможно распространение волны данного типа;

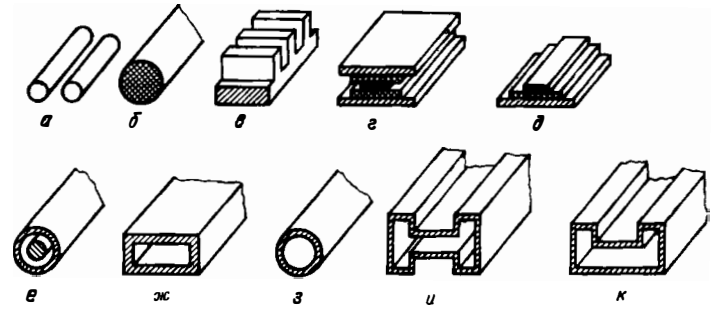


Рис. 7.3. Основные типы линий передачи:

а — двухпроводная; б — диэлектрический волновод; в — линия поверхностной волны типа «гребенки»; г, д — симметричная и несимметричная полосообразные линии; волноводы: е — коаксиальный; ж — прямоугольный; з — круглый; и — Н-образного сечения; к — П-образного сечения

основная волна — волна с наименьшей $\nu_{кр}$ в данной ЛП;

основной диапазон частот ν ЛП — диапазон ν , в котором распространяется только основная волна;

волна высшего типа — волна с $\nu_{кр}$ выше $\nu_{кр}$ основной волны;

волновое сопротивление (проводимость) Z_0 (Y_0) — отношение напряжения (тока) падающей волны к току (напряжению) этой волны в линии;

коэффициент стоячей (бегущей) волны КСВН (КБВ) — отношение наибольшего (наименьшего) значения амплитуды напряженности электрического поля стоячей волны в линии передачи к наименьшему (наибольшему) значению;

коэффициент отражения по напряжению (по току) ρ_V (ρ_I) — отношение в заданном сечении линии комплексной амплитуды напряжения (тока) отраженной волны к комплексной амплитуде напряжения (тока) падающей волны;

коэффициент передачи тракта — отношение комплексной амплитуды нормированного напряжения (или тока) падающей волны на входе к комплексной амплитуде нормированного напряжения (или тока) падающей волны на выходе при условии отсутствия отраженной волны на входе;

ослабление тракта — $10 \lg P_1/P_2$ (P_1 и P_2 — мощности падающих волн соответственно на входе и выходе линии передачи) при условии отсутствия на входе отраженной волны.

Открытые линии передачи [8, 26]. Простейшим типом является двух-

проводная линия из двух одинаковых параллельных проводников, волновое сопротивление Z_0 , Ом, и коэффициент затухания α , дБ/м, которой

$$Z_0 = 276 \epsilon_r^{-0,5} \lg [Dd^{-1} + (1 + D^2 d^{-2})^{0,5}]$$

$$\alpha \approx 19,8 \cdot 10^{-6} \nu^{0,5} \epsilon_r^{0,5} \sigma^{-0,5} d^{-1} \times \lg (2 D d^{-1})$$

(d и D — соответственно диаметр проводников и расстояние между их осями; ϵ_r — относительная диэлектрическая постоянная материала заполнения линии; ν — частота, Гц; σ — проводимость материала проводников, См/м). Для воздушной двухпроводной линии ($\epsilon_r = 1$) определяется по графику рис. 7.4; при конструктивно удобном соотношении D/d величина Z_0 лежит в пределах от 200 до 600 Ом; например, для медных проводников при $d = 1$ мм и $D = 70$ мм значение $Z_0 = 600$ Ом и на частоте $\nu = 10$ МГц расчетное значение коэффициента затухания $\alpha = 0,005$ дБ/м. Воздушные двухпроводные ЛП выполняют из неизолированных медных или биметаллических проводов, подвешенных на опорах с помощью специальных керамических изоляторов; применяются на гектометровых и метровых волнах для подключения антенн к приемным и передающим устройствам; на более коротких волнах имеют сильное излучение, создающее помехи и увеличивающее затухание.

7.3. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ [5, 8, 13]

Классификация. ЛП предназначены для канализации ЭМГ энергии с наименьшими потерями, из-за рас-

Диэлектрические волноводы [21]. Могут выполняться в виде сплошного или полого стержня из диэлектрика с малыми потерями. В сплошном диэлектрическом стержне возможно распространение основной волны HE_{11} , критическая частота которой равна нулю. Для работы только на волне HE_{11} диаметр d и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r материала стержня выбираются из условия отсутствия распространения первого высшего типа волны с критической длиной волны $\lambda_{кр} 1,3 d \times (\epsilon_r - 1)^{-0,5}$. При размерах поперечного сечения, равного длине волны λ или более, основная доля энергии распространяющейся волны сосредоточена внутри диэлектрика, что позволяет изгибать такой волновод с радиусом $(10...20)\lambda$ без заметных потерь на излучение. Данные волноводы применяются в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Коаксиальные линии передач [5, 8]. Условия распространения только основной Т-волны (рис. 7.5):

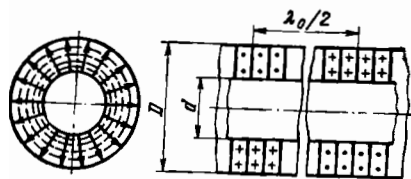


Рис. 7.5. Распределения электромагнитного поля Т-волны в коаксиальном волноводе (— линии электрического поля; --- линии магнитного поля)

$\lambda_{кр} < \lambda < \infty$; $v_{кр} > v$. Для воздушной коаксиальной линии критические длины волн первых высших типов равны: $\lambda_{кр} \approx 1,57 (d+D)$ — для волны H_{11} , $\lambda_{кр} \approx (D-d)$ — для волны E_{01} . Волновое сопротивление $Z_0 = 138 \lg(D/d)$ определяется по графику рис. 7.4. При полном заполнении линии диэлектриком с параметрами ϵ_r и $\text{tg } \delta$ длина волны λ и волновое сопротивление Z равны соответственно: $\lambda = \lambda_0 \epsilon_r^{-0,5}$ и $Z = Z_0 \epsilon_r^{-0,5}$. При неполном заполнении диэлектриком вместо ϵ_r и $\text{tg } \delta$ необходимо

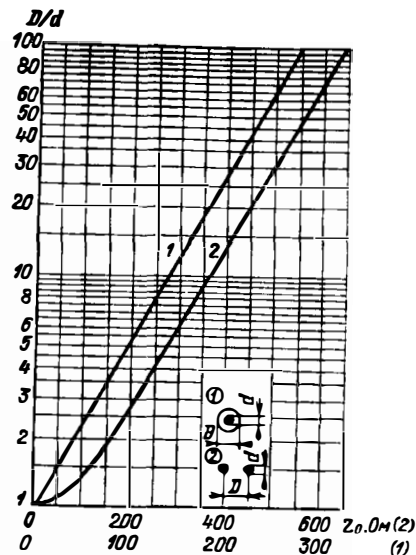


Рис. 7.4. Зависимости волнового сопротивления Z_0 от D/d : 1 — для коаксиального волновода; 2 — для двухпроводной линии

использовать значения $\epsilon_{экв}$ и $\text{tg } \delta_{экв}$, равные: для диэлектрических шайб (рис. 7.6,а)

$$\epsilon_{экв} = (\epsilon_r + k) (1 + k)^{-1};$$

$$\text{tg } \delta_{экв} = \epsilon_r (1 + k)^{-1} \text{tg } \delta;$$

$$k = l/b;$$

для секторной диэлектрической опоры (рис. 7.6,б)

$$\epsilon_{экв} = 1 + 0,159 (\epsilon_r - 1) \phi;$$

$$\text{tg } \delta_{экв} = \epsilon_r \phi [6,28 + (\epsilon_r - 1) \phi]^{-1} \text{tg } \delta.$$

Основным конструктивным параметром коаксиальных ЛП является отношение D/d . Для воздушной коаксиальной линии с проводниками из

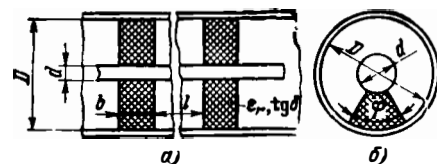


Рис. 7.6. Коаксиальный волновод с шайбовым (а) и секторными (б) диэлектрическими опорами

меди оптимальные значения D/d в режиме бегущей волны равны:

$D/d = 3,6$ ($Z_0 = 77$ Ом) — минимальный коэффициент затухания;

$D/d = 2,72$ ($Z_0 = 60$ Ом) — наибольшее пробивное напряжение;

$D/d = 1,65$ ($Z_0 = 30$ Ом) — максимальная передаваемая мощность;

$D/d = 9,2$ ($Z_0 = 133$ Ом) — максимальное резонансное сопротивление четвертьволнового отрезка.

Для воздушных коаксиальных ЛП рекомендуемые значения D/d для различных $v_{кр}$ при $Z_0 = 50$ Ом составляют: 10/4,34 ($v_{кр} = 13,4$ ГГц); 16/6,95 ($v_{кр} = 8,3$ ГГц); 30/13 ($v_{кр} = 4,45$ ГГц); 70/30 ($v_{кр} = 1,9$ ГГц); 110/48 ($v_{кр} = 1,2$ ГГц).

Радиочастотные кабели [9, 11]. По ГОСТ 11326.0—78 разделяются на радиочастотные коаксиальные РК; радиочастотные со спиральными проводниками РС; радиочастотные симметричные, двухжильные или из двух коаксиальных пар РД. Номинальные волновые сопротивления, Ом, кабелей:

РК — 50; 75; 100; 150; 200;

РС — 50; 75; 100; 150; 200; 400; 800; 1600; 3200;

РД — 75; 100; 150; 200; 300.

По типу внутреннего заполнения различают кабели со сплошной, воздушной и полувоздушной изоляцией; по величине номинального диаметра D по изоляции — субминиатюрные ($D \leq 1$ мм), миниатюрные ($1,5 \geq D \geq 3,0$ мм), среднегабаритные ($3,7 \leq D \leq 11,5$ мм) и крупногабаритные ($D > 11,5$ мм); по величине допустимой температуры нагрева T — обычной нагревостойкости ($T < 398$ К), повышенной ($398 < T < 523$ К) и высокой ($T > 523$ К).

Условное обозначение РК, например РК-50-7-12, расшифровывается так: РК — радиочастотный коаксиальный; 50 — номинальное волновое сопротивление, Ом; 7 — округленное значение номинального диаметра по изоляции, мм; 1 — тип изоляции и категория нагревостойкости; 2 — порядковый номер разработки конструкции. Цифровые обозначения типов изоляции; 1 и 2 — сплошная обычная и повышенной нагревостойкости; 3 и 4 — полувоздушная обычная и повышенной нагревостойкости; 5 и 6 — воздушная и повы-

шенной нагревостойкости; 7 — изоляция высокой нагревостойкости. Параметры отечественных радиочастотных коаксиальных кабелей даны в табл. 7.3—7.5 и на рис. 7.7, 7.8.

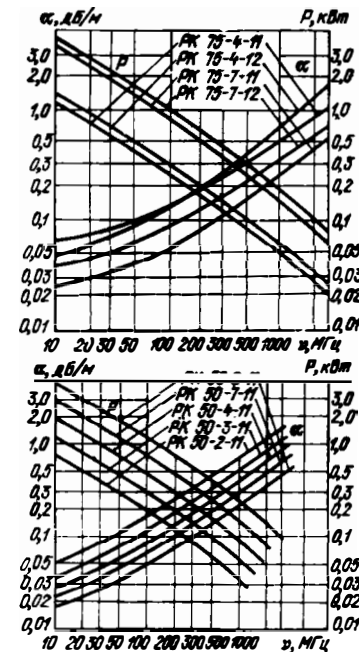


Рис. 7.7. Частотные зависимости затухания α и пропускаемой мощности P при $\theta = 313$ К в режиме бегущей волны для РК кабелей со сплошной изоляцией из стабилизированного полиэтилена с волновым сопротивлением 75 и 50 Ом

Расчет предельной длительно допускаемой передаваемой мощности при температуре окружающего воздуха, отличающейся от указанной на рис. 7.7 и 7.8, и значении $KCBH > 1$ ведется по формулам

$$P_\phi = (\theta_{доп} - \theta) (\theta_{доп} - \theta_0)^{-1} P_{\theta_0};$$

$$P_K = K_0 K^{-1} P_{K_0}$$

($\theta_0 = 313$ К; θ — наибольшая температура окружающего воздуха; $\theta_{доп}$ — наибольшая длительно допускаемая температура наименее теплоустойчивого элемента кабеля; K — значение $KCBH$, для которого производится перерасчет; $K_0 = 1$ — обычное значение $KCBH$ при испытаниях).

Параметры радиочастотных коаксиальных кабелей со сплошной изоляцией из полиэтилена низкой плотности (пределы рабочих температур от 213 до 358 К)

Марка кабеля	Номер ГОСТ 11326	Волновое сопротивление, Ом	Диаметр, мм			Затухание, дБ/м, при в. ГГц, не более		Затухание экранирования, дБ, не менее	Емкость, пФ/м, не более	Напряжение начала короны, кВ	Масса, кг/км
			внутреннего проводника	по изоляции	по оболочке	0,2	3				
РК 50-2-11	1—79	50±3	0,67	2,2±0,1	4,0±0,3	0,31	1,85	35	100	1,5	21,4
РК 50-3-11	2—79	50±2,5	0,9	2,95±0,15	5,3±0,3	0,28	1,4	60	100	2	50
РК 50-4-11	3—79	50±2	1,37	4,6±0,2	9,6±0,6	—	1,15	60	100	3	123
РК 50-7-11	4—79	50±2	2,28	7,25±0,25	10,3±0,6	0,15	0,90	35	100	4	134
РК 50-7-12	5—79	50±2	2,28	7,25±0,25	11,2±0,7	—	0,90	60	100	4	178
РК 50-9-11	6—79	50±2	2,7	9,0±0,3	12,2±0,8	0,12	0,8	35	100	5	196
РК 50-11-11	7—79	50±2	3,39	11,0±0,6	14,0±0,8	0,11	0,75	35	100	5,5	261
РК 75-4-11	8—79	75±3	0,72	4,6±0,2	7,3±0,4	0,18	1,00	35	67	2,5	63
РК 75-4-12	9—79	75±3	0,78	4,6±0,2	7,3±0,4	0,2	1,1	35	67	2	63
РК 75-7-11	10—79	75±3	1,13	7,25±0,25	9,5±0,6	0,13	0,85	35	67	4	104
РК 75-7-12	11—79	75±3	1,2	7,25±0,25	10,3±0,6	0,14	0,85	35	67	3	116
РК 75-9-13	12—79	75±3	1,35	9,0±0,3	12,2±0,8	0,12	0,75	35	67	4,5	172
РК 75-13-11	13—79	75±3	1,95	13,0±0,4	16,6±0,8	0,1	0,65	35	67	6	303
РК 100-7-11	14—79	100±5	0,6	7,25±0,25	9,7±0,6	0,14	0,9	35	51	3	102
РК 75-3-31	28—79	75±5	0,69	2,95±0,15	5,5±0,3	0,3	1,5	35	55	—	34
РК 75-4-37	29—79	75±3	1,03	4,6±0,3	6,5±0,4	2,1*	1,0	35	53	—	54
РК 75-7-31	30—79	75±3	1,75	7,25±0,3	10,5±0,6	1,2*	0,6	35	52	—	116
РК 75-13-32	31—79	75±3	3,05	13,05±0,5	17,8±0,9	0,075**	0,3	60	53	—	474
РК 100-4-31	33—79	100±5	0,64	4,6±0,25	7,3±0,4	0,2	1,2	60	40	—	84
РК 100-7-34	34—79	100±5	0,91	7,25±0,3	10,3±0,6	1,9*	0,8	35	41	—	109
РК 50-1-11	60—79	50±5	0,32	1,0±0,1	1,9±0,2	—	3,9	30	100	0,6	5,7
РК 50-1-12	61—79	50±5	0,32	1,0±0,1	1,9±0,2	—	4,1	30	100	0,6	5,8
РК 50-1,5-11	62—79	50±3,5	0,47	1,5±0,1	2,4±0,25	—	2,8	30	67	0,9	9,4
РК 50-1,5-12	63—79	50±3,5	0,47	1,5±0,1	2,4±0,25	—	2,8	30	100	0,9	9,5
РК 50-2-12	64—79	50±3	0,72	2,2±0,1	3,2±0,3	—	2,1	30	67	1,1	16,4
РК 50-2-16	65—79	50±3	0,72	2,2±0,1	3,2±0,3	—	2,2	30	100	1,1	16,6
РК 75-1-11	66—79	75±7	0,17	1,0±0,1	1,9±0,2	—	3,7	30	67	0,5	5,3
РК 75-1-12	67—79	75±7	0,17	1,0±1,0	1,9±0,2	—	3,9	30	67	0,5	5,4
РК 75-1,5-11	68—79	75±5	0,24	1,5±0,1	2,4±0,25	—	3,1	30	67	0,7	8,4
РК 75-1,5-12	69—79	75±5	0,24	1,5±0,1	2,4±0,25	—	3,3	30	67	0,7	8,6
РК 75-2-12	70—79	75±5	0,36	2,2±0,1	3,2±0,3	—	2,0	30	67	0,9	14,5
РК 75-2-13	71—79	75±5	0,36	2,2±0,1	3,2±0,3	—	2,1	30	67	0,9	14,7

Примечание. Коэффициент укорочения длины волны в кабелях равен 1,52; внешняя оболочка выполнена из светостабилизированного полиэтилена низкой плотности.

* Затухание на частоте 10 ГГц; ** затухание на частоте 0,6 ГГц.

Параметры радиочастотных коаксиальных кабелей со сплошной изоляцией из полиэтилена низкой плотности (пределы рабочих температур от 233 до 343 К)

Марка кабеля	Номер ГОСТ 11326	Волновое сопротивление, Ом	Диаметр, мм			Затухание, дБ/м, при ν , ГГц, не более		Затухание экранирования, дБ, не менее	Емкость, пФ/м, не более	Напряжение начала короны, кВ	Масса, кг/км
			внутреннего проводника	во изоляции	по оболочке	0,2	3				
PK 50-2-13	15—79	50±3	0,67	2,2±0,1	4,0±0,3	0,31	1,85	35	100	1,5	24,6
PK 50-3-13	16—79	50±2,5	0,9	2,95±0,15	5,0±0,3	0,28	1,4	35	100	2	39
PK 50-4-13	17—79	50±2	1,37	4,6±0,2	9,6±0,6	—	1,35	60	100	3	141
PK 50-7-15	18—79	50±2	2,28	7,25±0,25	10,3±0,6	0,15	0,9	35	100	4	147
PK 50-7-16	19—79	50±2	2,28	7,25±0,25	11,2±0,7	—	0,9	60	100	4	195
PK 50-9-12	20—79	50±2	2,7	9,0±0,3	12,2±0,8	0,12	0,80	35	100	5	203
PK 50-11-13	21—79	50±2	3,39	11,0±0,3	14,0±0,8	0,11	0,75	35	100	5,5	279
PK 75-4-15	22—79	75±3	0,72	4,6±0,2	7,3±0,4	0,18	1,00	35	67	2,5	72
PK 75-4-16	23—79	75±3	0,78	4,6±0,2	7,3±0,4	0,2	1,10	35	67	2	72
PK 75-7-15	24—79	75±3	1,13	7,2±0,25	9,5±0,6	0,13	0,85	35	67	4	113
PK 75-7-16	25—79	75±3	1,2	7,25±0,25	10,3±0,6	0,14	0,85	35	67	3	129
PK 75-9-12	26—79	75±3	1,35	9,0±0,3	12,2±0,8	0,12	0,75	35	67	5	189
PK 100-7-13	27—79	100±5	0,6	7,25±0,25	9,7±0,6	0,14	0,9	35	51	3	112

Примечание. Коэффициент укорочения длины волны в кабелях равен 1,52; внешняя оболочка выполнена из полихлорвинилового пластика.

Таблица 7.5

Параметры радиочастотных коаксиальных кабелей со сплошной изоляцией из пленки фторопласта-4 (пределы рабочих температур от 213 до 473 К)

Марка кабеля	Номер ГОСТ 11326	Волновое сопротивление, Ом	Диаметр, мм			Затухание, дБ/м, при ν , ГГц, не более		Затухание экранирования, дБ, не менее	Емкость, пФ/м, не более	Напряжение начала короны, кВ	Масса, кг/км
			внутреннего проводника	по изоляции	по оболочке	0,2	3				
PK 50-2-21	35—79	50±3	0,73	2,2±0,1	3,5±0,3	0,3	1,5	35	95	1,5	30
PK 50-3-21	36—79	50±2,5	1,01	2,95±0,1	4,4±0,2	0,24	1,30	35	95	2,1	48
PK 50-4-21	37—79	50±2	1,54	4,6±0,2	6,6±0,6	—	0,80	60	94	3,2	122
PK 50-7-22	38—79	50±2	2,49	7,25±0,25	9,0±0,5	—	0,80	35	94	5	198
PK 50-11-21	39—79	50±2	3,57	11,0±0,3	13,0±0,8	0,10	0,85	35	94	6,0	407
PK 75-2-21	40—79	75±5	0,41	2,2±0,1	3,5±0,2	0,27	1,5	35	63	1,3	28
PK 75-3-21	41—79	75±3	0,56	2,95±0,1	4,4±0,2	0,24	1,3	35	63	1,8	45
PK 75-4-21	42—79	75±3	0,85	4,6±0,2	6,0±0,4	0,16	0,9	35	63	2,5	85
PK 75-4-22	43—79	75±3	0,9	4,6±0,2	6,0±0,4	0,16	0,90	35	63	2,5	84
PK 75-7-21	44—79	75±3	1,3	7,25±0,25	8,9±0,6	0,12	0,75	35	63	5	183
PK 75-7-22	45—79	75±3	1,38	7,25±0,25	8,9±0,5	0,12	0,75	35	63	4	183
PK 100-7-21	46—79	100±5	0,74	7,25±0,25	9,0±0,5	0,12	0,8	35	47	3,1	177
PK 50-1-21	72—79	50±5	0,34	1,0±0,1	1,9±0,2	—	3,2	30	95	0,6	8,7
PK 50-1,5-21	73—79	50±3,5	0,51	1,5±0,1	2,4±0,25	—	2,7	30	96	0,9	14,4
PK 50-2-22	74—79	50±3	0,78	2,2±0,1	3,2±0,3	—	2,0	30	96	1,1	26,1
PK 75-1-21	75—79	75±7	0,19	1,0±0,1	1,9±0,2	—	3,5	30	63	0,5	8,3
PK 75-1,5-21	76—79	75±5	0,28	1,5±0,1	2,4±0,25	—	2,5	30	64	0,7	13,5
PK 75-2-22	77—79	75±5	0,45	2,2±0,1	3,2±0,3	—	1,9	30	64	0,9	23,5

Примечание. Коэффициент укорочения длины волны в кабелях равен 1,41; внешняя оболочка выполнена из фторопластовой ленты.

Полюе металлические волноводы [5, 11]. Различают следующие стандартные полюе металлические волноводы (рис. 7.9): прямоугольные с

отношением сторон $a/b \approx 2$; плоские прямоугольные с $a/b > 2,5$; гребневые П- и Н-образного сечений; круглые и эллипсисые. По точности изготовления волноводные трубы разделяются на общего применения (предельные отклонения внутреннего поперечного сечения от номинального $\leq 1/500$) и повышенной точности (предельные отклонения $\leq 1/1000$). Общие технические требования: максимальное смещение осей наружных и внутренних поверхностей $\leq 0,1 S$ (общего применения) и $\leq 0,05 S$ (повышенной точности), скрученность прямоугольных и гребневых волноводных труб на длине $L=1$ м при $a \geq 100$ мм и на $L=10a$ при $a \leq 100$ мм не более 0,009 рад (общего применения) и 0,0045 рад (повышенной точности); максимальный прогиб труб $< 10\Delta a$ (или $10\Delta d$) на длине $L=10a$ (или $10d$) и $< 40\Delta a$ (или $< 40\Delta d$) на длине $L=50a$ (или $50d$) (Δa и Δd — предельные отклонения ширины и диаметра внутреннего контура поперечного сечения); радиус закругления наружного контура прямоугольных и гребневых волноводных труб $R_{min} = 0,5 S$, $R_{max} = R_{min} + 0,5 S$.

Прямоугольные волноводы. В них могут распространяться волны типов E_{mn} и H_{mn} (m и n — число полуволн соответственно по широкой и узкой стенкам). Формулы для расчета $\lambda_{кр}$ некоторых типов волн даны в табл. 7.6. Основной тип волны H_{10} (рис. 7.10): условие распространения $a < \lambda_0 < 2a$; $\lambda_0 > 2b$; длина волны в волноводе, $\lambda = \lambda_0(1 - 0,25\lambda_0^2 a^{-2})^{0,5}$; постоянная распространения, рад/м, $\gamma = [4\pi^2 \lambda_0^{-2} - \pi^2 a^{-2}]^{0,5}$; коэффициент затухания для

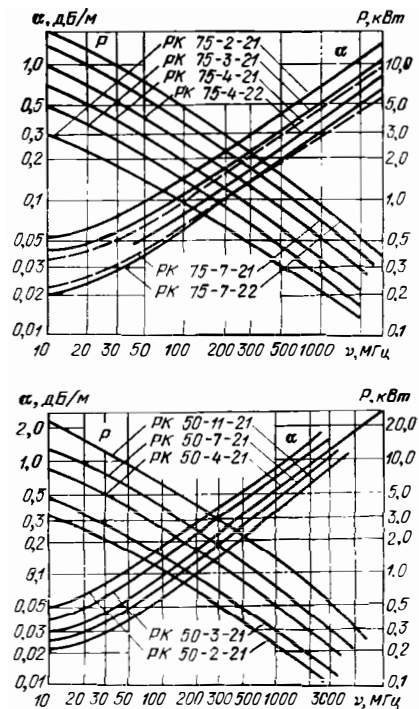


Рис. 7.8. Частотные зависимости затухания α и пропускаемой мощности P при $\theta = 313$ К в режиме бегущей волны для РК кабелей со сплошной изоляцией из фторопласта-1 с волновым сопротивлением 75 и 50 Ом

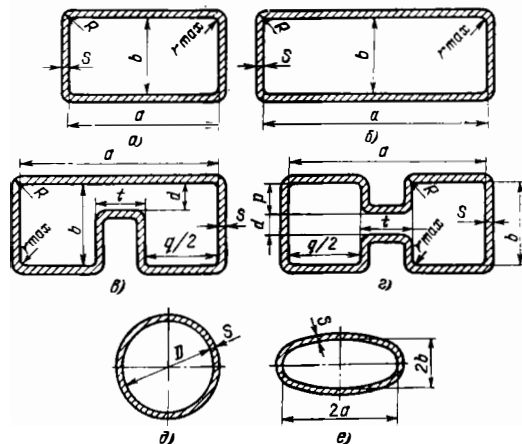


Рис. 7.9. Типы полюе металлических волноводов: а — прямоугольные $a/b \approx 2$; б — плоские прямоугольные $a/b > 2,5$; в — гребневые П-образного сечения; г — гребневые Н-образного сечения; д — круглые; е — эллипсисые

Критические длины волн в прямоугольном волноводе

H_{mn} волны	$\lambda_{кр}$	E_{mn} волны	$\lambda_{кр}$
H_{10}	$2a$	E_{11}	$2a(1 + a^2b^{-2})^{-0,5}$
H_{20}	a	E_{21}	$a(1 + 0,25a^2b^{-2})^{-0,5}$
H_{30}	$2a/3$	E_{31}	$\frac{2a}{3}[1 + a^2(3b)^{-2}]^{-0,5}$
H_{11}	$2a(1 + a^2b^{-2})^{-0,5}$	E_{12}	$2a(1 + 4a^2b^{-2})^{-0,5}$
H_{21}	$a(1 + 0,25a^2b^{-2})^{-0,5}$	E_{22}	$a(1 + a^2b^{-2})^{-0,5}$
H_{31}	$\frac{2a}{3}[1 + a^2(3b)^{-2}]^{-0,5}$	E_{32}	$\frac{2a}{3}[1 + 4a^2(3b)^{-2}]^{-0,5}$

волноводов из меди, дБ/м: $\alpha_{Cu} = [0,206a^{2,5}\lambda_0^{-1,5} + 1,04a^{-0,5}\lambda_0^{0,5}] \times [a^{-1,5}(4a^2\lambda_0^{-2} - 1)^{0,5}]^{-1}$ (для волноводов из другого металла $\alpha = K\alpha_{Cu}$, где $K=0,98$ для Ag; $K=1,30$ для Al (100%); $K=1,55$ для Cu (90%); $K=1,68$ для Mg (100%); $K=2$ для Cu (70%) Zп (30%).

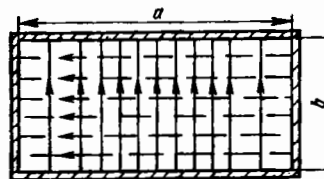


Рис. 7.10. Структура поля основной волны H_{10} в прямоугольном волноводе (— линии электрического поля; - - - линии магнитного поля)

Технические данные волноводов из меди в соответствии со стандартами МЭК (обозначение R), США (WR) и Великобритании (WG) даны в табл. 7.7.

Прямоугольные волноводы с диэлектрическими пластинами применяются для уменьшения поперечных размеров, изменения в широких пределах постоянной распространения и критических длин волн, увеличения предельной пропускаемой

мощности и подавления нежелательных типов волн [10]. Используются для создания миниатюрных широкополосных устройств СВЧ. Волноводы с диэлектрическими пластинами характеризуются следующими основными электрическими параметрами: коэффициентом замедления $m = \lambda_0/\lambda_a$ (λ_0 и λ_a — соответственно длины волны в свободном пространстве и в волноводе); коэффициентом затухания α за счет потерь в диэлектрике; предельной передаваемой мощностью $P_{прд}$.

Расчет значений m , α и $P_{прд}$ для основного типа волны в прямоугольном волноводе с центральной диэлектрической пластиной (рис. 7.11) ведется по данным табл. 7.8—7.10; значений $\lambda_{кр}$ — по графикам рис. 7.12 (основной тип волны). Данные для других случаев расположения диэлектрических пластин в прямоугольном волноводе приведены в [10].

Гребневые П- и Н-образные волноводы (рис. 7.9, в, г) по сравнению с прямоугольными обладают большей широкополосностью, пониженными волновым сопротивлением и фазовой скоростью, меньшими габаритами, но имеют большее затухание. Электрическое и магнитное поля концентрируются в основном в зазоре между выступами. Основной тип волны — H_{10} . Критические дли-

Параметры стандартных прямоугольных волноводов

Обозначение типа волновода			Номинальные размеры, мм		Критическая частота $\nu_{кр}$ волны H_{10} , ГГц	Рабочий диапазон частот $1,25\nu_{кр} \dots 1,9\nu_{кр}$ для волны H_{10} , ГГц		Номинальная частота $1,5\nu_{кр}$, ГГц	Теоретическое затухание для меди на $1,5 \nu_{кр}$, дБ/м	Пробивная мощность, МВт	Номинальная толщина стенки S, мм	Погонная масса трубы, кг/м
МЭК R	США WR	Великобритания WG	a	b								
3	2300	—	584,2	292,1	0,257	0,32	0,49	0,386	0,00078	189	4,8	83,8
4	2100	—	533,4	266,7	0,281	0,35	0,53	0,442	0,00090	158	4,8	76,6
5	1800	1	456,2	228,6	0,328	0,41	0,62	0,49	0,00113	116	3,2	45,3
6	1500	2	381,0	190,5	0,393	0,49	0,75	0,59	0,00149	81	3,2	36,8
8	1150	3	292,1	146,05	0,513	0,64	0,98	0,77	0,00222	47	3,2	28,0
9	975	4	247,65	123,82	0,605	0,76	1,15	0,91	0,00284	34	3,2	23,2
12	770	5	195,58	97,79	0,766	0,96	1,46	1,15	0,00405	21,2	3,2	17,7
14	650	6	165,1	82,55	0,908	1,14	1,73	1,36	0,00522	15,1	2,03	9,72
18	510	7	129,54	64,77	1,157	1,45	2,20	1,74	0,00522	9,3	2,03	7,66
22	430	8	109,22	54,61	1,372	1,72	2,61	2,06	0,00970	6,6	1,03	6,43
26	340	9A	86,36	43,18	1,174	2,17	3,30	2,61	0,0138	4,1	2,03	5,07
32	284	10	72,14	34,04	2,078	2,60	3,95	3,12	0,0189	2,73	2,03	4,16
35	—	—	66,37	29,50	2,258	2,82	4,29	3,39	0,0223	2,17	2,00	3,71
40	229	11A	58,17	29,08	2,577	3,22	4,90	3,87	0,0249	1,88	1,63	2,72
41	—	—	57,00	25,33	2,630	3,29	5,00	3,95	0,0280	1,60	2,00	3,17
48	187	12	47,55	22,15	3,152	3,94	5,99	4,73	0,0355	1,17	1,63	2,18
58	159	13	40,39	20,193	3,71	4,64	7,05	5,57	0,0431	0,90	1,63	1,91
70	137	14	34,85	15,799	4,30	5,38	8,17	6,46	0,0576	0,61	1,63	1,61
84	112	15	28,5	12,64	5,26	6,57	9,99	7,89	0,0794	0,40	1,63	1,32
100	90	16	22,86	10,16	6,557	8,20	12,5	9,84	0,110	0,258	1,27	0,82
120	75	17	19,03	9,525	7,869	9,84	15,0	11,8	0,133	0,201	1,27	0,72
140	62	18	15,799	7,899	9,488	11,9	18,0	14,2	0,176	0,138	1,02	0,467
180	51	19	12,954	6,477	11,571	14,5	22,0	17,4	0,238	0,093	1,02	0,396
220	42	20	10,668	4,318	14,05	17,6	26,7	21,1	0,370	0,051	1,02	0,314
260	34	21	8,636	4,318	17,357	21,7	33,0	26,0	0,435	0,041	1,02	0,276
320	28	22	7,112	3,556	21,076	26,4	40,0	31,6	0,583	0,0281	1,02	0,234
400	22	23	5,690	2,845	26,344	32,9	50,1	39,5	0,815	0,0180	1,02	0,194
500	19	24	4,775	2,388	31,392	39,2	59,6	47,1	1,060	0,0127	1,02	0,168
620	15	25	3,759	1,880	39,877	49,8	75,8	59,8	1,52	0,0085	1,02	0,139
740	12	26	3,099	1,549	48,369	60,5	91,9	72,6	2,03	0,0053	1,02	0,120
900	10	27	2,540	1,270	59,014	73,8	112	88,5	2,74	0,0036	1,02	0,105
1200	—	28	2,032	1,016	73,768	92,2	140	100,5	3,82	0,0023	1,02	0,090
1400	7	—	1,651	0,826	90,792	114	173	136,2	5,21	0,0015	0,76	0,048
1800	5	—	1,295	0,648	115,750	145	220	173,6	7,50	0,0009	0,76	0,041
2200	4	—	1,092	0,546	137,268	172	261	205,9	9,70	0,0007	0,76	0,0365
2600	3	—	0,864	0,432	173,491	217	330	260,0	13,76	0,0004	0,76	0,0317

Таблица 7.8

Коэффициент замедления t для волновода с центральной диэлектрической пластиной

a/λ_0	$2t/a=0,025$			$2t/a=0,100$			$2t/a=0,200$			$2t/a=0,400$	
	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$
0,5	0,225	0,394	0,945	0,453	0,812	2,179	0,636	1,149	3,015	0,850	1,505
0,6	0,597	0,681	1,128	0,717	1,00	2,409	0,847	1,301	3,202	1,018	1,621
0,7	0,736	0,806	1,245	0,838	1,103	2,600	0,955	1,398	3,341	1,108	1,694
0,8	0,813	0,879	1,337	0,909	1,175	2,762	1,020	1,468	3,448	1,165	1,745
1,0	0,896	0,961	1,494	0,989	1,275	3,016	1,099	1,571	3,596	1,233	1,812

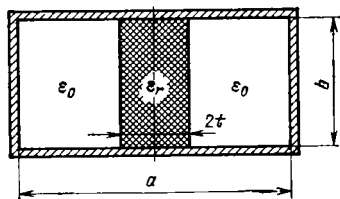


Рис. 7.11. Прямоугольный волновод с центральной диэлектрической пластиной

Таблица 7.9

Нормированный коэффициент затухания $\alpha \times 4,343 a (tg \delta)^{-1}$ (дБ) за счет потерь в центральной диэлектрической пластине

a/λ_0	$2t/a=0,025$			$2t/a=0,100$			$2t/a=0,200$			$2t/a=0,400$	
	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$
0,5	0,714	0,584	1,867	1,743	1,877	5,026	2,086	2,690	6,325	2,738	3,341
0,6	0,326	0,611	2,167	1,151	2,000	6,523	1,948	3,100	7,740	2,798	3,864
0,7	0,313	0,624	2,689	1,19	2,306	8,081	2,101	3,660	9,118	3,062	4,460
0,8	0,828	0,681	3,393	1,304	2,732	9,627	2,349	4,306	10,46	3,403	5,090
0,9	0,353	0,761	4,271	1,458	3,248	11,14	2,652	5,004	11,78	3,787	5,735
1,0	0,384	0,860	5,305	1,643	3,843	12,62	3,001	5,726	13,08	4,200	6,385

Примечание. $tg \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь в пластине.

Таблица 7.10

Нормированная предельная передаваемая мощность $P_{прд} (abE^2)^{-1}$ для волноводов с центральной диэлектрической пластиной

a/λ_0	$2t/a=0,025$			$2t/a=0,100$			$2t/a=0,200$			$2t/a=0,400$	
	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$	$\epsilon_r=16$	$\epsilon_r=2$	$\epsilon_r=4$
0,5	0,146	0,245	0,453	0,291	0,469	0,810	0,446	0,749	1,838	1,012	1,744
0,6	0,384	0,411	0,472	0,450	0,534	0,801	0,583	0,820	2,076	1,165	1,999
0,7	0,468	0,471	0,447	0,511	0,555	0,810	0,644	0,856	2,355	1,275	2,245
0,8	0,510	0,494	0,408	0,537	0,548	0,835	0,675	0,882	2,672	1,368	2,505
0,9	0,533	0,498	0,368	0,546	0,531	0,873	0,690	0,910	3,022	2,454	2,787
1,0	0,545	0,491	0,333	0,543	0,512	0,921	0,698	0,941	3,402	1,497	3,093

Примечание. a, b, λ_0 см; E , кВ/см.

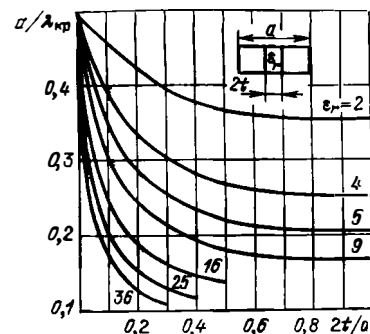


Рис. 7.12. Нормированный критический размер $a/\lambda_{кр}$ для основного типа волны

ны волн, м, рассчитываются по формулам:
волна H_{10}

$$\lambda_{кр} = 6,28 [9,8 a^{-2} - (\psi_1 \sin \psi) (0,25ad + 0,5 pq + 0,19 ap \sin \psi)^{-1} - 39,5 a^{-2} p^2 b^{-2} + 12,6 p^2 b^{-2} a^{-1} (\sin \psi) (0,5 q + 0,16 a^{-1} \sin \psi)^{-1}]^{-0,5},$$

волна H_{20}

$$\lambda_{кр} = 6,28 [39,5 a^{-2} - (2 \psi_1 \sin 2\psi) \times (0,25ad + 0,5 pq + 0,08ap \sin 2\psi)^{-1}]^{-0,5}$$

$$\psi = 3,14 q/a; \quad \psi_1 = 3,14 p/a).$$

Технические данные П- и Н-образных волноводов на различные рабочие полосы частот приведены в табл. 7.11, 7.12.

П- и Н-образные волноводы обеспечивают больший разнос критических частот волн H_{10} и H_{20} , чем обычные прямоугольные волноводы; обладают почти постоянным волновым сопротивлением в широком диапазоне частот; применяются в качестве элементов волноводных фильтров, широкополосных направленных ответвителей и коаксиально-волноводных переходов [5].

Круглые волноводы. Могут распространяться волны типов E_{mn} и H_{mn} (m — число стоячих волн поля по окружности волновода; n — число полуволн вдоль радиуса R). Формулы для расчета $\lambda_{кр}$ некоторых типов волн даны в табл. 7.13. Основной тип волны — H_{11} (рис. 7.13): условие распространения $0,294\lambda_0 < R < 0,384\lambda_0$; критическая длина волны $\lambda_{кр} = 3,413R$; длина волны в волноводе $\lambda_w = \lambda_0 (1 - \lambda_0^2 \lambda_{кр}^{-2})^{-0,5}$; постоянная распространения, рад/м, $\gamma = [39,5\lambda_0^{-2} - 3,4 R^{-2}]^{0,5}$.

Волна H_{11} в круглом волноводе сходна с волной основного типа H_{10} в прямоугольном волноводе. Однако при нарушении формы поперечного сечения круглого волновода (эллиптичность, эксцентриситет, изгиб осн и т. д.) положение плоскости поляризации волны H_{11} становится неустойчивым, что ограничивает использование этого типа волны для передачи энергии. Закон изменения коэффициентов затухания различных типов волн в круглом волноводе (за исключением волны H_{01}) в зависимости от частоты аналогичен закону изменения коэффициентов затухания волн в прямоугольном волноводе. С ростом длины окружности поперечного сечения круглого волновода затухание падает.

Наименьшим коэффициентом затухания обладает волна H_{01} , значение которого с увеличением частоты изменяется как $(\nu)^{-0,5}$. Это позволяет при заданных размерах поперечного сечения круглого волновода выбрать такую область частот, в которой коэффициент затухания волны H_{01} будет достаточно малым. Так, для круглого медного волновода с внутренним диаметром 60 мм в диапазоне частот 35...80 ГГц коэффициент затухания волны H_{01} меняется в пределах 1...0,4 дБ/км.

На размеры круглых волноводов устанавливаются следующие предельно допустимые отклонения [5]: $\Delta D_{max} \pm 0,001 D$; эллиптичность $C_{max} = 0,001$; эксцентриситет $e_{max} = 0,1t$; прогиб волновода g на длине L : $g_{max} = 0,01D$ при $L = 10D$ и $g_{max} = 0,04D$ при $L = 50D$.

Технические данные стандартных круглых волноводов приведены в табл. 7.14 [3].

Круглые волноводы используются

Диапазон частот, ГГц	a, мм	b, мм	d, мм	t, мм	S, мм	r, мм	Затухание, дБ/м	Номинальная мощность, кВт
Рабочая полоса частот 2,4:1								
0,18...0,42	714,48	321,54	134,06	110,74	—	26,82	0,00079	32870
0,27...0,64	467,89	210,54	87,81	75,52	—	17,55	0,00148	14100
0,42...1,0	297,05	133,68	55,75	46,05	3,175	11,15	0,00285	5682
0,64...1,53	195,12	87,81	36,63	30,25	3,175	7,32	0,00538	2451
0,84...2,00	148,51	66,83	27,86	23,01	2,03	5,56	0,00814	1421
1,50...3,60	83,21	37,44	15,62	12,90	2,03	3,12	0,0194	445,8
2,00...4,80	62,38	28,07	11,71	9,68	2,03	2,34	0,0298	250,6
3,50...8,20	35,66	16,05	6,71	5,54	1,63	1,35	0,0695	81,87
4,75...11,0	26,26	11,86	4,93	4,06	1,27	0,99	0,1093	44,43
7,50...18,0	16,64	7,49	3,12	2,58	1,27	0,635	0,2169	17,82
11,0...26,5	11,34	5,11	2,13	1,76	1,02	0,43	0,3838	8,285
18,0...40,0	6,93	3,12	1,30	1,07	1,02	0,254	0,8071	3,095
Рабочая полоса частот 3,6:1								
0,11...0,39	792,94	356,82	61,01	134,80	—	12,19	0,00525	14550
0,27...0,97	318,57	143,36	24,51	54,15	—	4,90	0,02133	2348
0,39...1,40	220,4	99,19	16,97	37,46	3,175	3,40	0,0367	1124
0,97...3,50	88,75	39,93	6,83	15,09	2,03	1,37	0,1437	182,2
1,40...5,0	61,52	27,69	4,72	10,46	2,03	0,94	0,2487	87,56
3,5...12,4	24,59	11,07	1,90	4,19	1,27	0,38	0,9842	13,99
5,00...18,0	17,22	7,75	1,32	2,92	1,27	0,25	1,683	6,857
12,4...40,0	6,93	3,12	0,53	1,17	1,02	0,10	6,59	1,115

Технические данные H-образных волноводов

Таблица 7.12

Диапазон частот, ГГц	a, мм	b, мм	d, мм	t, мм	S, мм	r, мм	Затухание, дБ/м	Номинальная мощность, кВт
Рабочая полоса частот 2,4:1								
0,18...0,42	753,54	350,39	148,92	188,39	—	29,79	0,00075	61960
0,27...0,64	493,47	229,46	97,51	123,37	—	19,51	0,00141	26570
0,42...1,0	313,26	145,72	61,90	78,31	3,17	12,37	0,00279	10710
0,64...1,53	205,74	95,68	40,67	51,43	3,17	8,13	0,00525	4620
0,84...2,0	156,64	72,85	30,96	39,17	3,17	6,20	0,00787	2676
1,50...3,60	87,76	40,72	17,35	21,95	2,03	3,48	0,0190	840,5
2,00...4,80	65,79	30,61	13,00	16,46	2,03	2,59	0,0292	472,5
3,50...8,20	37,59	17,48	7,42	9,40	1,63	1,47	0,0669	154,3
4,75...11,0	27,69	12,85	5,71	6,91	1,27	1,09	0,1063	83,72
7,5...18,0	17,55	8,15	3,45	4,39	1,27	0,69	0,2103	33,58
11,0...26,5	11,96	5,56	2,36	3,00	1,02	0,48	0,3740	15,63
18,0...40,0	7,32	3,40	1,45	1,83	1,02	0,28	0,7808	5,834
Рабочая полоса частот 3,6:1								
0,11...0,39	879,81	378,31	73,76	219,96	—	14,76	0,00459	28830
0,27...0,97	353,47	151,99	29,64	88,37	—	5,92	0,0180	4653
0,39...1,40	244,55	105,16	20,50	61,14	3,17	4,09	0,0318	2227
0,97...3,5	98,48	42,34	8,25	24,61	2,03	1,65	0,1240	361,2
1,40...5,0	68,25	29,34	5,71	17,07	2,03	1,14	0,2152	173,5
3,50...12,4	27,28	11,73	2,29	6,83	1,27	0,46	0,8497	27,74
5,0...18,0	19,1	8,20	1,60	4,78	1,27	0,33	1,4534	13,59
12,4...40,0	7,7	3,30	0,63	1,93	1,02	0,13	5,68	2,21

Таблица 7.13
Критические длины волн
в круглом волноводе

$H_{m,l}$ -волны	$\lambda_{кр}/R$	$E_{m,l}$ -волны	$\lambda_{кр}/R$
H_{11}	3,41	E_{01}	2,61
H_{21}	2,06	E_{11}	1,64
H_{01}	1,64	E_{21}	1,22
H_{12}	1,18	E_{02}	1,14
H_{02}	0,9	E_{12}	0,9
H_{22}	0,94	E_{22}	0,75

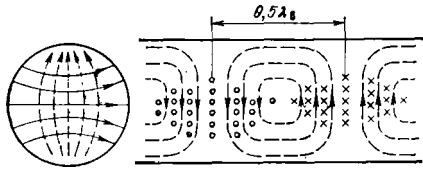


Рис. 7.13. Структура поля волны H_{11} в круглом волноводе (— линии электрического поля; --- линии магнитного поля)

в трактах РРЛ [20] и волноводных линиях дальней связи диапазона миллиметровых волн [12]. В наземных РРЛ применяются медные и биметаллические круглые волноводы с внутренним диаметром 70 мм — медные волноводы: толщина стенки 4 мм, эллиптичность внутреннего поперечного сечения 0,1...0,2 мм; биметаллические: несущая стальная труба толщиной 4 мм с внутренним медным слоем толщиной 0,25...0,3 мм, эллиптичность внутреннего поперечного сечения 0,02...0,03 мм. В волноводных линиях дальней связи используются круглые волноводы с волной H_{01} , затухание которой с ростом частоты и внутреннего диаметра волновода падает [12].

В диапазоне частот 35...80 ГГц применяются круглые волноводы с волной H_{01} в виде несущей стальной трубы диаметром 60 мм, внутренняя поверхность которой покрыта медным токонесущим слоем толщиной 10 мкм. Для уменьшения преобразования энергии волны H_{01} в энергию волны

E_{11} на токонесущий слой нанесена пленка из диэлектрика толщиной 90...100 мкм. Суммарное затухание в таких линиях не превышает 2...4 дБ/км.

Эллипсные волноводы. В них могут распространяться четные и нечетные $E_{m,l}$ - и $H_{m,l}$ -волны; основной тип волны sH_{11} (рис. 7.14), зна-

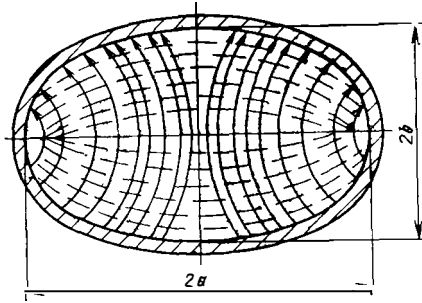


Рис. 7.14. Структура поля основной волны в эллипсном волноводе (— линии электрического поля; --- линии магнитного поля)

чения осей a и b выбираются из условия отсутствия распространения волн sH_{11} и sE_{01} ; критические длины волн sH_{11} и sE_{01} определяются по графикам рис. 7.15. Применяются в качестве трактов наземных

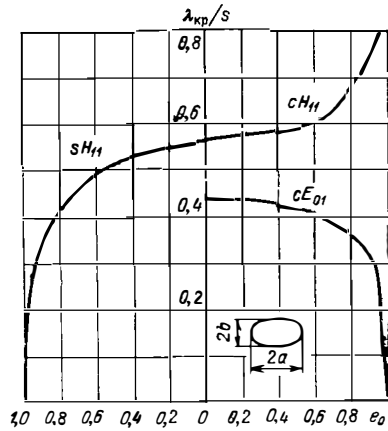


Рис. 7.15. Зависимости критических длин волн sH_{11} , sH_{11} и sE_{01} в эллипсных волноводах от эксцентриситета $s=0,157(a+b)$; $e_0=(1-b^2/a^2)^{0,5}$

Таблица 7.14

Тип волновода 153 ТЕС	Критическая частота, ГГц, колебаний в год			Внутренний диаметр, мм		Номинальная толщина стенок, мм	Частота, ГГц	Затухание колебаний в год H_{11} , дБ/м	
	H_{01}	H_{11}	H_{01}	номинал	допуск			теоретический	максимальное значение
								рассчитанное	
C3,3	0,27	0,45	0,56	647,9	0,65	—	0,325	0,00067	0,0009
C4	0,32	0,53	0,66	553,5	0,55	—	0,380	0,00085	0,0011
C4,5	0,37	0,48	0,77	472,8	0,47	—	0,446	0,00108	0,0014
C5,3	0,43	0,57	0,90	403,9	0,40	—	0,582	0,00137	0,0018
C6,2	0,51	0,66	1,06	345,1	0,35	—	0,611	0,00174	0,0023
C7	0,60	0,78	1,24	249,79	0,30	—	0,715	0,00219	0,0029
C8	0,70	0,91	1,45	251,84	0,25	—	0,838	0,00278	0,0036
C10	0,82	1,07	1,70	215,14	0,22	—	0,980	0,00352	0,0046
C12	0,96	1,25	1,99	183,77	0,18	—	1,147	0,00447	0,0058
C14	1,20	1,46	2,33	157,00	0,16	—	1,343	0,00564	0,0073
C16	1,31	1,71	2,73	134,11	0,13	—	1,572	0,00715	0,0093
C18	1,53	2,00	3,19	114,58	0,11	—	1,843	0,00906	0,012
C22	1,99	2,34	3,74	97,87	0,10	—	2,154	0,0115	0,015
C25	2,10	2,74	4,37	88,62	0,08	—	2,521	0,0140	0,018
C30	2,46	3,21	5,12	71,42	0,07	—	2,952	0,0184	0,024
C35	2,88	3,76	5,99	61,04	0,06	—	3,455	0,0233	0,030
C40	3,38	4,41	7,03	51,99	0,05	—	4,066	0,0297	0,039
C48	3,95	5,16	8,23	44,45	0,044	—	4,744	0,0375	0,049
C56	4,61	6,02	9,60	38,10	0,038	—	5,534	0,0473	0,062
C65	5,40	7,05	11,2	32,54	0,033	—	6,480	0,0599	0,078
C76	6,32	8,26	13,2	27,88	0,028	—	7,588	0,0759	0,099
C89	7,37	9,63	15,3	23,825	0,024	—	8,850	0,0956	0,124
C104	8,68	11,3	18,1	20,244	0,02	—	10,42	0,1220	0,150
C120	10,0	13,1	20,9	17,475	0,017	—	12,07	0,1524	—
C140	11,6	15,2	24,2	15,088	0,015	—	13,98	0,1893	—
C175	13,8	18,1	28,8	12,700	0,013	—	16,61	0,2459	—

Технические данные круглых волноводов (рекомендации МЭК)

Тип волновода 153 ТЭС	Критическая частота, ГГц, колебаний вида				Внутренний диаметр, мм		Номинальная толщина стенок, мм	Частота, ГГц	Затухание колебаний вида $H_{1,1}$, дБ/м	
	$H_{1,1}$	$E_{0,1}$	$H_{2,1}$	$H_{0,1}$	номинал	допуск			теоретический рассчитанное	максимальное значение
C190	15,8	20,6	26,2	32,9	11,125	—	1,015	18,95	0,3003	—
C220	18,4	24,1	30,6	38,4	9,525	—	0,760	22,14	0,3787	—
C255	21,1	27,5	35,0	43,9	8,331	—	0,760	25,31	0,4620	—
C290	24,6	32,2	40,8	51,2	7,137	—	0,760	29,54	0,5834	—
C330	27,7	36,1	45,9	57,6	6,350	—	0,510	33,20	0,6938	—
C380	31,6	41,3	52,4	65,7	5,563	—	0,510	37,91	0,8486	—
C430	36,8	48,1	61,0	76,6	4,775	—	0,510	44,16	1,0650	—
C495	40,2	52,5	66,7	83,7	4,369	—	0,510	48,26	1,2190	—
C580	49,1	64,1	81,4	102	3,581	—	0,510	58,88	1,643	—
C660	55,3	72,3	91,8	115	3,175	—	0,380	66,41	1,967	—
C765	63,5	82,9	105,0	132	2,769	—	0,380	76,15	2,413	—
C890	73,6	96,1	122,0	153	2,388	—	0,380	88,30	3,011	—

РРЛ [20]; рекомендуемые размеры поперечного сечения: для диапазона частот 3,4...3,9 ГГц $2a=76$ мм, $2b=47$ мм; для диапазона 5,6...6,2 ГГц $2a=55$ мм, $2b=35$ мм; значения затухания на средних частотах диапазонов равны соответственно 0,029 и 0,036 дБ/м. Изготавливаются из меди или алюминия с защитным наружным полиэтиленовым покрытием; медные волноводы для гибкости гофрируются с шагом $(0,12...0,15)\lambda_{ср}$ и глубиной $\sim 0,05\lambda_{ср}$; допустимые радиусы изгиба волновода при монтаже составляют: в плоскости E примерно $20a$; в плоскости H примерно $40b$.

Полосковые волноводы [13, 14, 17, 18]. Основные типы ПВ показаны на рис. 7.16. Используются в диапазоне 0,1...30 ГГц; изготавливаются печатными методами; обладают малыми габаритами и весом. Основным типом волны является Т-волна. Рекомендуемые размеры (см. рис. 7.16): $h \leq 0,5\lambda_0$; $0,5$ мм $\leq (1,05...1,1)b < 0,5\lambda_0$; $a \geq b+2h$; $t = 0,025...0,05$ мм $> 3\delta$. Электрические параметры ПВ: длина волны λ , эквивалентная диэлектрическая проницаемость ϵ_3 , волновое сопротивление Z_0 , Ом, погонная емкость C , пФ·м⁻¹, потери α , дБ·м⁻¹, добротность Q , допустимая мощность $P_{доп}$, кВт.

Несимметричный ПВ (НПВ) (см. рис. 7.16,а). Расчет параметров: $\lambda = \lambda_0 \epsilon_3^{-0,5}$, где ϵ_3 с погрешностью до 2% [18]: $\epsilon_3 = 0,5(\epsilon + 1) + 0,5(\epsilon - 1) \times (1 + 10b^{-1}h)^{-0,5}$ при $b > h$; $\epsilon_3 =$

$$= 0,5(\epsilon + 1) + \epsilon^{-1}(\epsilon - 1)(0,0980\epsilon + 0,0524) [\lg(8b^{-1}h)]^{-1}$$

при $b < h$;
 $C = 3333 \epsilon_3^{0,5} Z_0^{-1}$;
 $Z_0 = 100\epsilon^{-0,5} [0,531 + 0,265bh^{-1} + 0,1944h^{-1} \lg(2,718 + 5,44ht^{-1})]^{-1}$ при $t \neq 0$;
 $Z_0 = 138,21g(8b^{-1}h + 0,25bh^{-1})$ при $t = 0$, $b < h$ с погрешностью до 0,25%;
 $Z_0 = 10^3 [2,65bh^{-1} + 6,41 - 1,98b^{-1}h + (1 - b^{-1}h)^2]^{-1}$ при $t = 0$, $h \leq b < 10h$ с погрешностью до 0,25%, при $t = 0$, $b > 10h$ — с погрешностью до 1% [18].

Для более грубых расчетов (с погрешностью до 3,5%) [14]

$$Z_0 = 314 \epsilon_3^{-0,5} (1 - h^{-1}t) \times (1 + bh^{-1})^{-1}$$

при $t \ll h$, $b \leq 2h$;
 $Z_0 = 314 \epsilon_3^{-0,5} [1 + bh^{-1} \times (1 - h^{-1}t)^{-1}]^{-1}$ при $t \ll h$, $b > 2h$.

Размеры ПВ рассчитываются по следующим соотношениям [14]: при $t \ll h$, $b < 2h$ с погрешностью до 2% $b^{-1}h = 0,125 \exp(0,01667Z_0) - 0,25 \times \exp(-0,01667Z_0)$, при $t \ll h$, $b > 1,8h$ с погрешностью до 0,1% $bh^{-1} = 0,00265Z_0 - 1,466lg(0,00833Z_0 - 1) - 0,637$.

Потери $\alpha = \alpha_m + \alpha_d + \alpha_n$, где потери в проводниках α_m , в диэлектрике α_d , на излучение α_n равны:

$$\alpha_m = 10^{-6} (\epsilon \nu)^{0,5} h^{-1} \{ 13,55 + 8,28 bh^{-1} + 12,14 lg [0,5(k^2 -$$

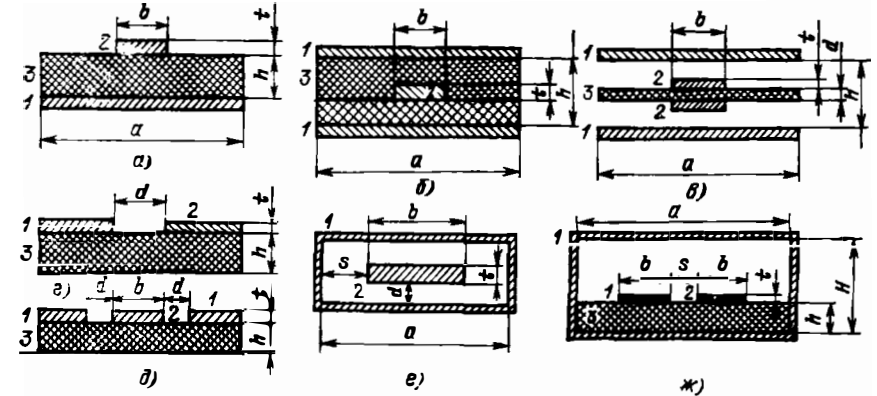


Рис. 7.16. Основные типы полосковых волноводов: а — НПВ (МПВ); б — СПВ; в — высокособотный СПВ; г — ЩПВ; д — КПВ; е — экранированный СПВ; ж — экранированные связанные МПВ (1 — заземленная пластина; 2 — токонесущая пластина; 3 — диэлектрик)

$$-1)] \{ [1 + 1,571 bh^{-1} + 2,303 \lg(1 + 1,571 bh^{-1})]^{-1},$$

где $k = [(1 + h^{-1}t)^2 - 1]^{0,5} + h^{-1}t + 1$ [14]; ρ — удельное сопротивление, Ом·м;

$$\alpha_d = 27,3e_0^{0,5}\lambda_0^{-1} \lg \delta_s; \quad \alpha_n = 3160 \times Z_0^{-1} h^2 \lambda^{-4}; \quad \text{при } h \ll \lambda_0 \quad \alpha_n \approx 0.$$

Добротность НПВ на единицу длины: $Q_0^{-1} = Q_m^{-1} + Q_d^{-1}$, где $Q_m = 3,14e_0^{0,5}\alpha_m^{-1}\lambda_0^{-1}$; $Q_d = (\lg \delta_s)^{-1}$.

Таблицы значений допустимой мощности для некоторых видов ПВ приведены в [17].

Связанные НПВ (СНПВ). В СНПВ могут распространяться четный и нечетный типы волн (рис. 7.17). Величина Z_0 с погрешностью

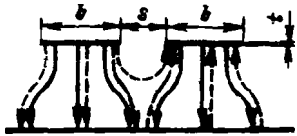


Рис. 7.17. Четный (—) и нечетный (---) типы колебаний в СНПВ

до 10% при $b \geq 0,3h$ определяется по формулам [18]:

$$Z_{0e} = 377e^{-0,5} \{ bh^{-1} + [0,333bh^{-1}e^{-0,5} + 1,355(\lg(4ht^{-1}))^{-1}] [1 + (1 + bs^{-1})^{-1}] \}^{-1}$$

для четных типов волн; $Z_{0o} = 377e^{-0,5} \{ bh^{-1} + 0,333e^{-0,5}bh^{-1} + 1,355[\lg(4ht^{-1})]^{-1} + 1,807e^{-0,5}(1 + b^{-1}s)^{-1} [\lg(1,273st^{-1}) \times \text{th}(4hs^{-1})] \}^{-1}$ для нечетных типов волн.

Расчет других параметров связанных НПВ приведен в [16].

Микрополосковый волновод (МПВ) представляет собой несимметричный ПВ (см. рис. 7.16,а) с тонкой ($h \leq 1 \dots 2$ мм) диэлектрической пластиной с $\epsilon \gg 1$ между проводниками.

При $t=0$, $b > h$ с погрешностью до 2% [15]: $Z_0 = 10^2 e^{-0,5} [2,653bh^{-1} + 1,944(1 + e^{-1}) \lg(2,135bh^{-1} + 4,02) + 0,4364e^{-2}(\epsilon - 1) + 2,341]^{-1}$; $bh^{-1} = 377e^{-0,5} Z_0^{-1} + (1 - \epsilon^{-1}) [0,733 \times \lg(592e^{-0,5} Z_0^{-1} - 1) - 0,1645e^{-1} + 0,0933] - 1,466 \lg(1184e^{-0,5} Z_0^{-1} - 1) - 0,637$.

При $t=0$, $b < h$ [15] $Z_0 = (\epsilon + 1)^{-0,5} [2,652b^2h^{-2} + 195,4 \lg(8b^{-1}h) - (\epsilon - 1)(\epsilon + 1)^{-1} (10,25e^{-1} + 19,16)]$ с погрешностью до 1%; $b^{-1}h =$

$= 0,125 \exp C - 0,25 \exp(-C)$ с погрешностью до 0,5%, где $C = 0,01179(\epsilon + 1)^{0,5} Z_0 + (\epsilon - 1)(\epsilon + 1)^{-1} (0,226 + 0,120e^{-1})$.

В более узком диапазоне размеров [18] $Z_0 = 138,2e_0^{-0,5} \lg(8b^{-1}h + 0,25bh^{-1})$ при $b \leq h$ с погрешностью до 0,25%; $Z_0 = 377e_0^{-0,5} [bh^{-1} + (1 - b^{-1}h)^6 - 0,441b^{-1}h + 2,42]^{-1}$ при $b \geq h$ с погрешностью до 0,25%; $Z_0 = 377e_0^{-0,5} b^{-1}h$ при $b \gg h$ с погрешностью до 1%.

Величина ϵ_0 определяется по формулам для НПВ.

В предельных случаях $Z_0 = 138,2e_0^{-0,5} \lg(8b^{-1}h)$ при $b \ll h$; $Z_0 = 377e_0^{-0,5} b^{-1}h$ при $b \gg h$.

Потери в МПВ:

$$\alpha_m = 8,686 \cdot 10^{-8} (\nu\rho)^{0,5} Z_0^{-1} h^{-1} \times \{ 1 - [0,25bh^{-1} + 0,1832h^{-1}t \times \lg(34,16bt^{-1})]^2 \} \{ 1 + h[b + 0,733t \lg(34,16bt^{-1})]^{-1} [1 + 0,318b^{-1}t + 0,733 \lg(12,57bt^{-1})] \}$$

при $b \leq 0,15h$;

$$\alpha_m = 8,686 \cdot 10^{-8} (\nu\rho)^{0,5} Z_0^{-1} h^{-1} \{ 1 - [0,25bh^{-1} + 0,1832h^{-1}t \times \lg(5,44ht^{-1})]^2 \} \{ 1 + h[b + 0,733t \times$$

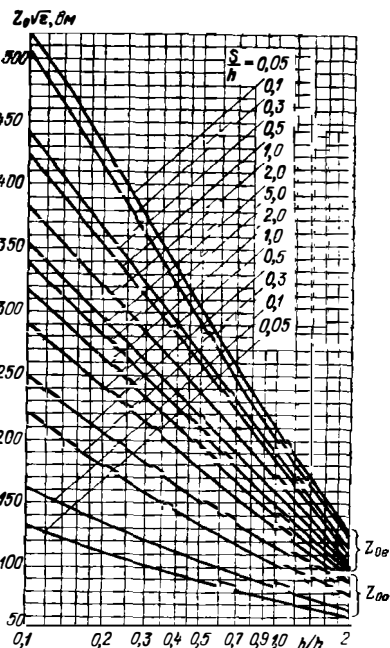


Рис. 7.18. Зависимости Z_0 СНПВ от геометрических размеров

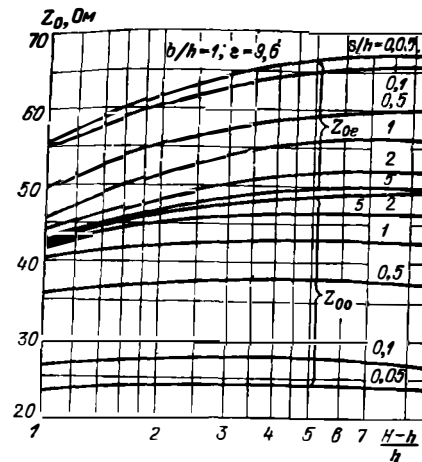


Рис. 7.19. Зависимости Z_0 экранированных СНПВ от геометрических размеров

$\times \lg(5,44 ht^{-1})]^{-1} [1 - 0,318 h^{-1}t + 0,733 \lg(2ht^{-1})] \}$ при $0,15h \leq b \leq 2h$;

$\alpha_d = 27,3e_0^{-0,5}\lambda_0^{-1} \lg \delta_s$; в МПВ с полупроводниковой подложкой $\alpha_d = 10^3 \rho^{-1} [0,612e^{0,5} + 1,062e^{0,428} \times (b^{-1}h)^{0,836}]^{-1}$.

Волновые сопротивления Z_0 связанных открытых МПВ (см. рис. 7.17) определяются по рис. 7.18, а экранированных (см. рис. 7.16,ж) — по рис. 7.19; ϵ_0 СНПВ — по рис. 7.20. Различные параметры МПВ определяются по номограммам [16]. Верхний частотный предел для основного типа колебаний в МПВ $\nu = 0,075h^{-1} (\epsilon - 1)^{-0,5}$ [ГГц].

Симметричный ПВ (СПВ) (см. рис. 7.16,б). Расчет параметров: $C = 22,5\epsilon(1 - h^{-1}t)^{-1} \times \text{Arch}[\exp(1,571bh^{-1})]$ при $b > 0,35h$, $t < 0,05h$; $Z_0 = 138,2e^{-0,5} \times \lg(0,637hr_0^{-1})$ при $b < 0,35(h - t)$, $t \leq 0,25h$, где r_0 определяется по рис. 7.21, $Z_0 = 94,2e^{-0,5} [b(h - t)^{-1} + 0,1131C_{кр}\epsilon^{-1}]^{-1}$ при $b \geq 0,35(h - t)$ с погрешностью до 1,2%, где $C_{кр} = 6,48\epsilon \{ (1 - h^{-1}t)^{-1} \lg(2ht^{-1} - 1) + \lg[(2ht^{-1} - 1)(ht^{-1} - 1)^{-2}] - \text{краевая емкость токонесущей пластины относительно заземления}$.

С погрешностью до 3% [13]: $Z_0 = 216e^{-0,5} (1 + 2bh^{-1})^{-1}$ при $t=0$, $b > 0,3h$; $Z_0 = 216e^{-0,5} [1 - 2t(h - t)^{-1}] \times [1 + 2b(h - t)^{-1}]^{-1}$ при $b < h - t$; $Z_0 = 216e^{-0,5} [1 - 2t(h - t)^{-1}] [1 + 2 \times (b - t)(h - t)^{-1}]^{-1}$ при $b > h - t$.

Потери $\alpha = \alpha_m + \alpha_d$, где для мед-

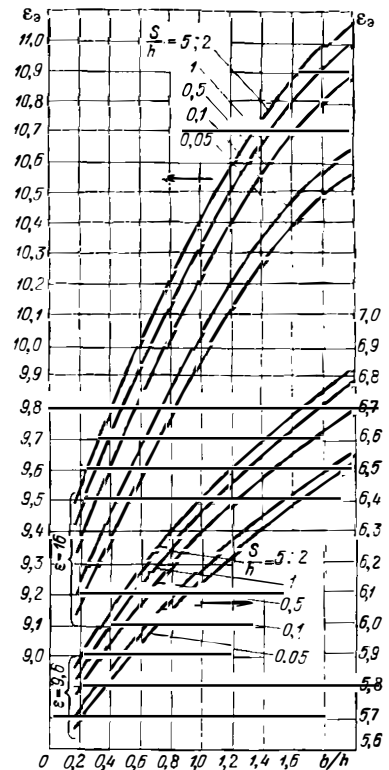


Рис. 7.20. Зависимости ϵ_0 СНПВ от их размеров

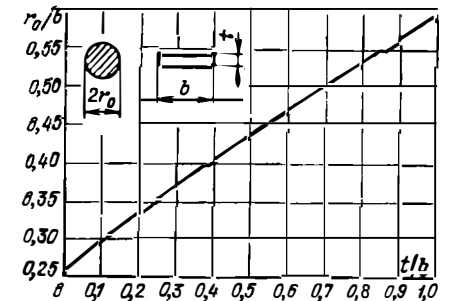


Рис. 7.21. Зависимость r_0 от размеров токонесущей пластины СПВ

ных проводников $\alpha_m = 6,38 \cdot 10^{-11} \times Z_0 \epsilon_0^{0,5} (h - t)^{-1} [1 + 2b(h - t)^{-1} + 0,733(h + t)(h - t)^{-1} \lg(2ht^{-1} - 1)]$ при $b \geq 0,35(h - t)$; $\alpha_m = 3,61 \times 10^{-7} \nu_0^{0,5} h^{-1} Z_0^{-1} \{ 1 + hr_0^{-1} [0,25 + 0,335b^{-1}t - 0,1275b^{-2}t^2 + 0,1832 \times \lg(12,57bt^{-1})] \}$ при $b \leq 0,35(h -$

— t), $t \geq 2,25h$, r_0 определяется по рис. 7.21;

$$\alpha_d = 27,3e^{0,5\lambda_0} t^{-1} \lg \delta_a.$$

Добротность на единицу длины $Q = Q_m(1 + Q_m \lg \delta_a)^{-1}$, где $Q_m = 3,14e^{0,5\lambda_0} \alpha_m^{-1}$.

Геометрические размеры СПВ определяются по рис. 7.22;

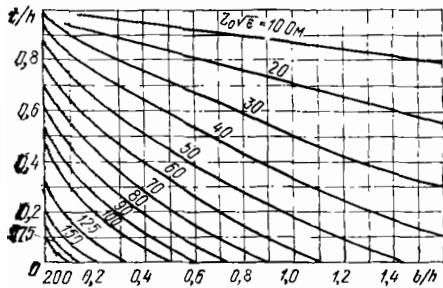


Рис. 7.22. Зависимости толщины токонесущей пластины СПВ от ее ширины при заданных Z_0

$$P_{доп} = 2,27 \cdot 10^7 e^{0,5} K_{св}^{-1} U (h-t)^2 \times$$

$$\times [0,1 + 2i (h-t)^{-1}] \times \\ \times [2 + b (h-t)^{-1}],$$

где P — мощность, кВт; $K_{свU}$ — коэффициент стоячей волны по напряжению. Таблицы значений допустимой мощности, полученные для некоторых частных случаев СПВ, приведены в [17]. Верхний предел частотного диапазона ν , ГГц, СПВ $\nu = 0,3e^{-0,5} (2b + 1,571d)^{-1}$.

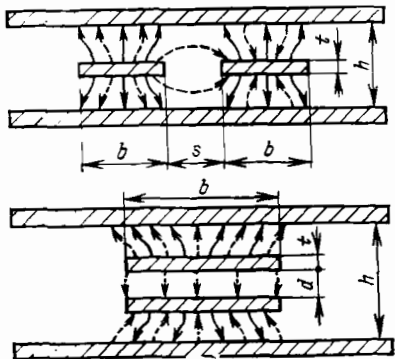


Рис. 7.23. Четный (—) и нечетный (---) типы колебаний в связанных СПВ

Связанные СПВ (ССПВ) (рис. 7.23). Расчет параметров. В ССПВ с электромагнитной связью (рис. 7.23, при $t=0$, Z_{0e} (для четного типа колебаний) и Z_{0o} (для нечетного типа колебаний) определяются по рис. 7.24.

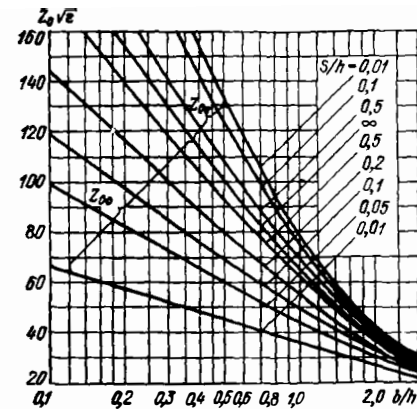


Рис. 7.24. Зависимости Z_0 ССПВ с боковой связью от их размеров

При $t=0$, $b \geq 0,35h$ с погрешностью до 1%

$$Z_{0e}(0) = 100 e^{-0,5} \{0,2341 + \\ + 1,061 bh^{-1} + 0,778 \lg \times$$

$$\times [1 + th(1,571 h^{-1} s)]\}^{-1};$$

$$Z_{0o}(0) = 100 e^{-0,5} \{0,2341 + \\ + 1,061 bh^{-1} + 0,778 \times$$

$$\times \lg [1 + \text{cth}(1,571 h^{-1} s)]\}^{-1}.$$

При $t \neq 0$ и произвольных st^{-1}
 $Z_{0e}(t) = \{Z_0^{-1}(t) - 0,256e^{-1} C_{кр} \times \\ \times [Z_0^{-1}(0) - Z_{0e}^{-1}(0)]\}^{-1};$
 при $t \neq 0$, $s \leq 5t$
 $Z_{0o}(t) = \{Z_0^{-1}(0) + [Z_0^{-1}(t) - \\ - Z_0^{-1}(0)] - 6 \cdot 10^{-4} e^{-1} [C_{кр} - 3,90e] + \\ + 5,305 \cdot 10^{-3} s^{-1} t\}^{-1};$ при $t \neq 0$, $s \geq 5t$
 $Z_{0o}(t) = \{Z_0^{-1}(t) + 0,256e^{-1} C_{кр} \\ \times [Z_{0o}^{-1}(0) - Z_0^{-1}(0)]\}^{-1}.$ Здесь
 $Z_0(0) = 94,2e^{-0,5} (bh^{-1} + 0,441)^{-1};$
 $Z_0(t) = 94,2e^{-0,5} [b(h-t)^{-1} + 0,1131] \times \\ \times C_{кр} e^{-1}^{-1};$ $C_{кр} = 6,48e \{(1-h^{-1}t)^{-1} \times \\ \times \lg(2ht^{-1}-1) + \lg[(2ht^{-1}-1)(ht^{-1}- \\ -1)^{-2}]\}$ — краевые емкости токонесущих пластин относительно заземленных. Таблицы Z_{0e} и Z_{0o} приведены в [5]; $C_{кр} = 3333e^{1/2} Z_0^{-1}$.

Емкость одной токонесущей пластины относительно заземленных при

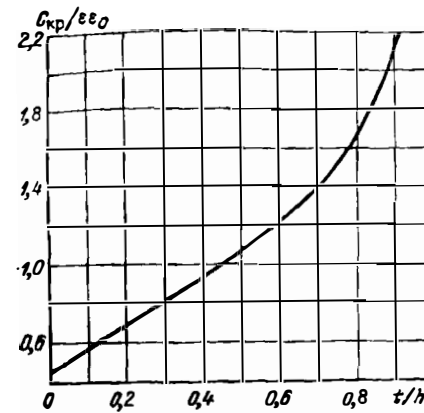


Рис. 7.25. Зависимость $C_{кр}$ средней пластины СПВ от ее толщины

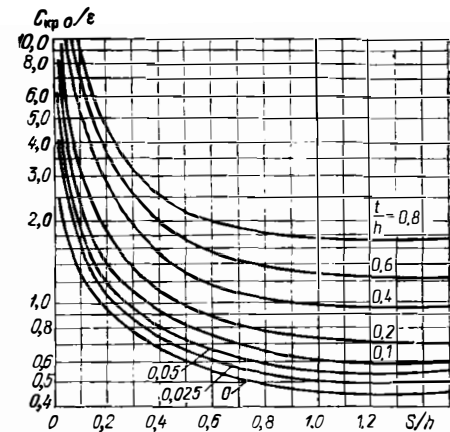


Рис. 7.27. Зависимости $C_{кр0}$ средней пластины ССПВ с боковой связью от ее геометрических размеров для нечетного типа колебаний

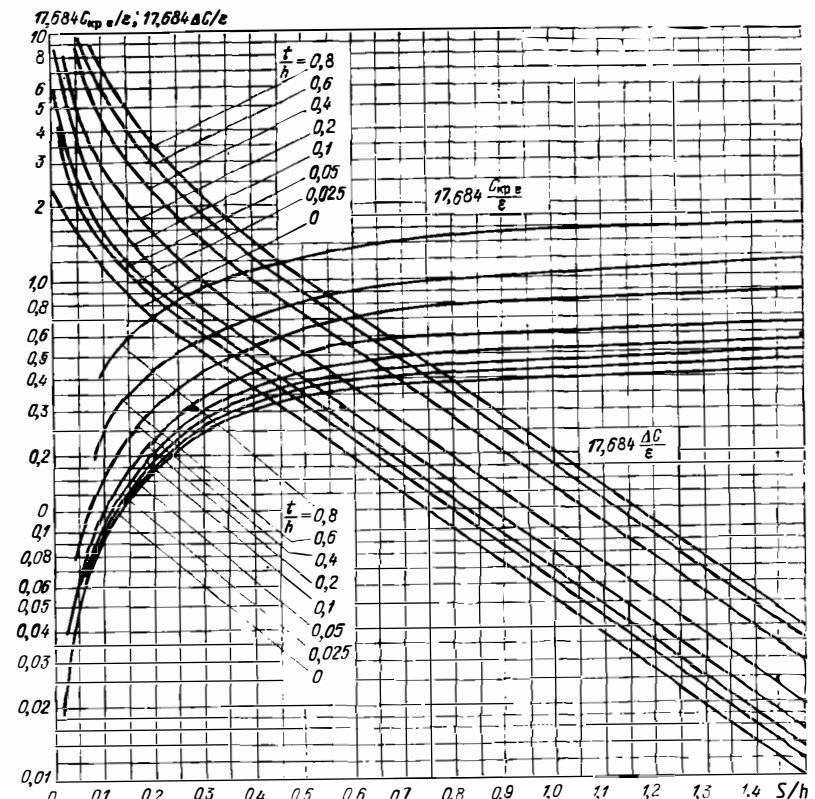


Рис. 7.26. Зависимости $C_{крe}$ средней пластины ССПВ с боковой связью для четного типа колебаний и взаимной емкости пластины ΔC от размеров СПВ

$b > 0,35(h-t)$ и любых t, s $C_{e,o} = 17,68 \varepsilon [2b(h-t)^{-1} + (C_{кр} + C_{кр,e,o}) \times \varepsilon^{-1}]$, где $C_{кр}$ определяется по рис. 7.25, $C_{кр,e}$ и $C_{кр,o}$ — по рис. 7.26 и 7.27. Взаимная емкость $\Delta C = C_{кр,o} - C_{кр,e}$ определяется на рис. 7.26. Геометрические размеры при $t = 0$ [14]:

$$k^{-1}s = 0,733 \lg \left\{ \text{cth} [148 e^{-0,5} \times \times (Z_{0o}^{-1} - Z_{0e}^{-1})] \right\},$$

$$bh^{-1} = 94,2 Z_{0e}^{-1} e^{-0,5} - 0,5 h^{-1} s + + 0,733 \lg [0,5 \text{ch} (1,571 h^{-1} s)],$$

Z_{0o} и Z_{0e} см. выше.

В ССПВ с емкостной связью (см. рис. 7.23,б) для четного и нечетного типов колебаний имеем при $t=0$, $b \geq 0,35d$, $b \geq 0,35(h-d)$

$$Z_{0e} = 188,5 e^{-0,5} (A + 0,4413)^{-1},$$

$$Z_{0o} = 188,5 e^{-0,5} dh^{-1} A^{-1},$$

$$\text{где } A = b(h-d)^{-1} + + 0,733 \{d(h-d)^{-1} \lg(d^{-1}h) - - \lg[h^{-1}(h-d)]\},$$

$$C_{e,o} = 3333 e^{0,5} Z_{0e,o}^{-1},$$

$$dh^{-1} = Z_{0o} Z_{0e}^{-1} - 2,35 \cdot 10^{-3} Z_{0o} e^{0,5};$$

$$bh^{-1} = 188,5 Z_{0o}^{-1} e^{-0,5} - - h(h-d)^{-1} \{0,4413 + + 0,733 [d(h-d)^{-1} \lg(d^{-1}h) - - \lg((h-d)h^{-1})]\}, \quad [17];$$

при $t \neq 0$

$$C_o = 17,68 \varepsilon \{b(h-d-2t)^{-1} + + bd^{-1} + 0,733 d^{-1} (h-2t) \times \times [\lg[(h-2t)(h-d-2t)^{-1}] + + d(h-d-2t)^{-1} \lg(d^{-1}(h-2t))] + + 0,733 [d^{-1}(d+t) \lg(1+d^{-1}t) - - d^{-1}t \lg(d^{-1}t)]\};$$

$$C_e = 17,68 \varepsilon \{b(h-d-2t)^{-1} + + 0,733 [(d+2t)(h-d-2t)^{-1} \times \times \lg(h(d+2t)^{-1}) - - \lg(1-dh^{-1}-2h^{-1}t)] + + 0,4413\} \text{ при } t \ll d,$$

$$C_e = 11,26 \varepsilon [1 - h^{-1} (d + 2t)^{-1}] \times \times \text{arch} [\exp (1,571 bh^{-1})] \text{ при } t \gg d.$$

Высокодобротный ПВ (ВПВ) (см. рис. 7.16,а). Параметры рассчитываются как для ССПВ с лицевой связью и четным типом волн (см. рис. 7.23), величина $e \gg 1$, Z_0 определяется по рис. 7.28. При расчетах с погреш-

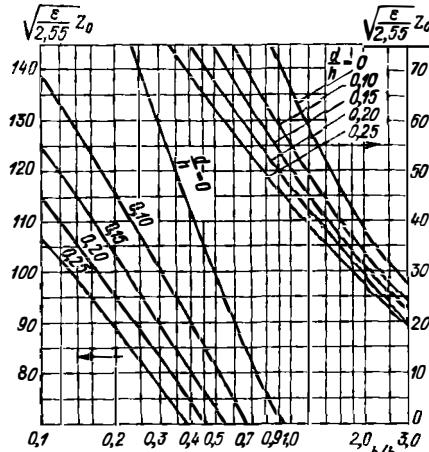


Рис. 7.28. Зависимости Z_0 ВПВ от его размеров

ностью до нескольких процентов ВПВ можно считать обычным СПВ, у которого толщина токонесущей пластины равна $d+2t$, а e не учитывается. На ВПВ можно реализовать волновые сопротивления значительно больше, чем на ПВ других типов с теми же размерами.

Экранированный СПВ (ЭСПВ) (см. рис. 7.16,е). Потери на излучение равны нулю. При $b \geq 0,7d$ и $t \geq 0,7s$.

$$Z_o = 188,5 e^{-0,5} \{bd^{-1} + s^{-1} t +$$

$$+ 1,273 [2,3 \lg(d^{-1}s +$$

$$+ ds^{-1}) + d^{-1}s \arctg(ds^{-1}) +$$

$$+ ds^{-1} \arctg(d^{-1}s) - 1,386]\}^{-1};$$

при $t=0$

$$Z_o = 100 e^{-0,5} \{1,061 bh^{-1} +$$

$$+ 1,555 \lg[1 + \text{cth}(3,14 h^{-1} s)]\}^{-1}.$$

Емкость $C = 3333 e^{0,5} Z_0^{-1}$. Индуктивность $L = (L_{в}^{-1} + L_r^{-1})^{-1}$, [Гн \times \times М $^{-1}$], где $L_{в} = 10^{-9} \mu [1,592 s^{-1} t +$

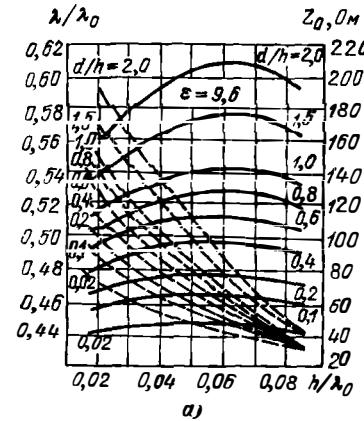


Рис. 7.29. Зависимости $\lambda\lambda^{-1}$ и Z_0 СПВ от его размеров

$+ 2,333 \lg(1 + d^{-2}s^2) + 2,026 ds^{-1} \times \times \text{arctg}(d^{-1}s) - 1,405]^{-1}$; $L_r = 10^{-6} \mu \times \times [1,592 bd^{-1} + 2,333 \lg(1 + d^2s^{-2}) + + 2,026 d^{-1}s \arctg(ds^{-1}) - 1,405]^{-1}$.

При $b \leq 0,25a$ ЭСПВ рассчитывается как открытый СПВ.

Щелевой ПВ (ЩПВ) представляет собой диэлектрическую пластину с $e \gg 1$, на одной стороне которой располагаются токонесущая и заземленная пластины (см. рис. 7.16,з). При $h > \lambda_0$ с погрешностью до 10% $\lambda = 1,414 \lambda_0 (1 + + e)^{-0,5}$. При $d \leq h$ и $d < 0,25 \lambda e^{-0,5}$ λ и Z_0 определяются по рис. 7.29 с погрешностью до 3% для $\lambda\lambda_0^{-1}$ и до 30% для Z_0 [14].

Коллиарный ПВ (КПВ) представляет собой трехпроводный ПВ, в котором на одной стороне диэлектрической пластины с $e \gg 1$ размещены одна или две токонесущие и две зазем-

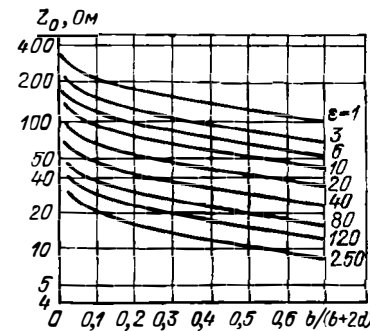
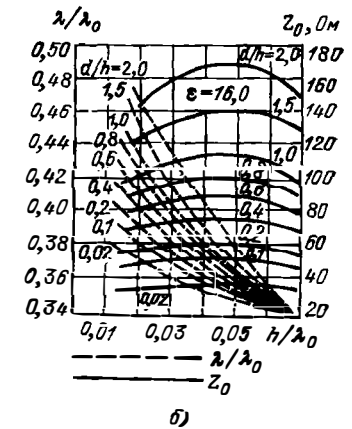


Рис. 7.30. Зависимости Z_0 КПВ от его размеров при $h \rightarrow \infty$



ленные пластины (см. рис. 7.16,д). При $e \gg 1$ и $h \geq 2d$ с погрешностью до 10% $e_0 = 0,5(1+e)$. При $h \rightarrow \infty$ Z_0 с погрешностью до 5% определяется по рис. 7.30 [15]. Значения Z_0 и e_0 КПВ с конечной h с погрешностью до 2% определяются по рис. 7.31 и 7.32 [18]. Потери в КПВ аналогичны потерям в МПВ и при $\text{tg} \delta_a < 10^{-3}$ определяются в основном α_m (рис. 7.33). На рис. 7.34 приведена зависимость потерь в токонесущей пластине от размеров КПВ [18]. При $b+2d > > 0,5 \lambda$ резко возрастают потери на излучение.

Материалы для ПВ СВЧ. Диэлектрики должны обладать малыми потерями ($\text{tg} \delta_a < 10^{-3}$), большой диэлектрической проницаемостью e , хорошей адгезией с проводниками, высокой механической прочностью и теплопроводностью; допускать процессы фольгирования и металлизации, а также последующие технологические процессы изготовления ИП. Для уменьшения потерь высота микронеровностей поверхности диэлектрика не должна превышать половины глубины проникновения поля в металл. Параметры рекомендуемых диэлектриков приведены в табл. 7.15 и 7.16. Металлические проводники для ПВ должны иметь низкое ρ и высокую коррозионную стойкость, допускать возможность присоединения внешних проводников (табл. 7.17). Для улучшения адгезии проводников ПВ к диэлектрику используется подслои толщиной 0,02 мкм из материалов с вы-

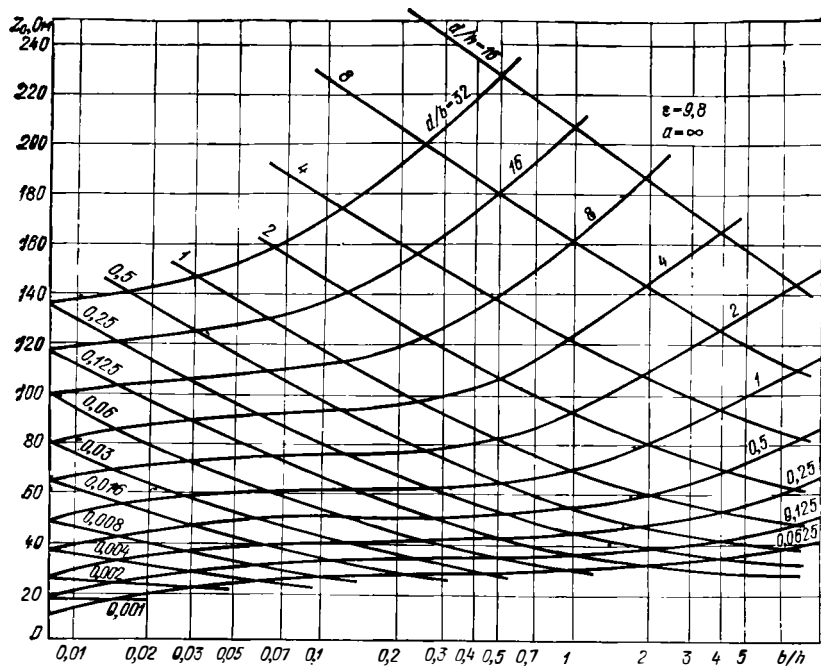


Рис. 7.31. Зависности Z_0 КПВ от его размеров при конечном h

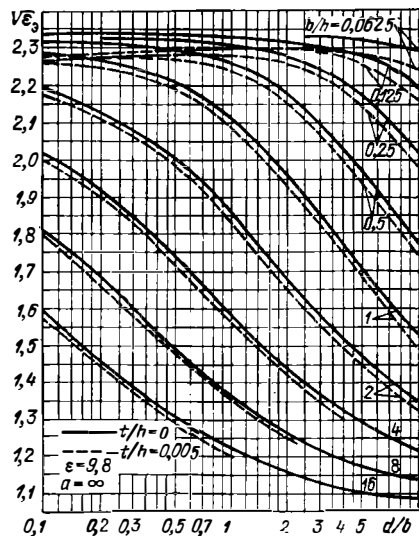


Рис. 7.32. Зависность ϵ_3 КПВ от его размеров

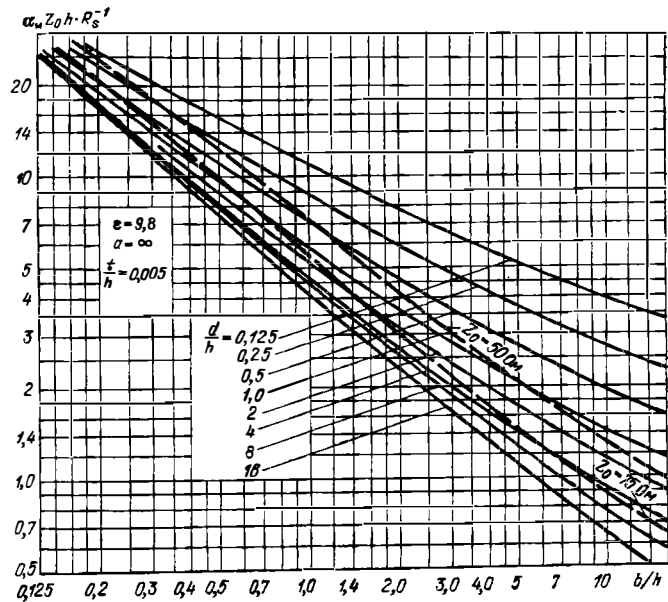


Рис. 7.33. Зависность α_m КПВ от его размеров

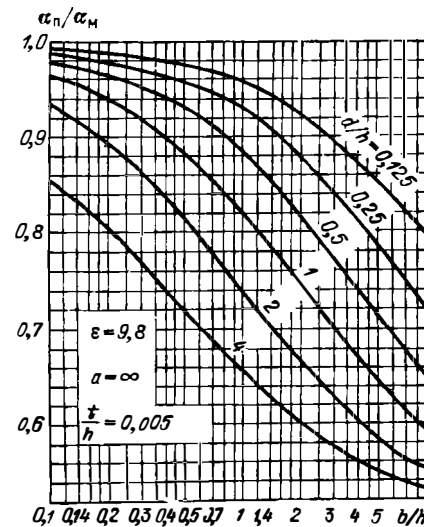


Рис. 7.34. Зависность отношения общих потерь α_n к потерям в токонесущей пластине α_m КПВ от его размеров

ют слоем благородного металла. В качестве токопроводящих клеев и покрытий используют контактолы, наносимые на контактируемые поверхности или в места соединения проводников.

Для СВЧ конденсаторов применяются пленочные диэлектрики.

7.4. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ [4, 5]

Однородная линия без потерь при несогласованных нагрузках. Передача мощности от генератора (P_r) в нагрузку (P_n) определяется коэффициентом передачи $\Pi = P_n/P_r$, зависящим от величины КВВ в сторону нагрузки (K_n) и в сторону генератора (K_r). Минимальное и максимальное значения коэффициента передачи рассчитываются по формулам:

$$\Pi_{\min} = 4 K_n K_r (1 + K_n K_r)^{-2};$$

$$\Pi_{\max} = 4 K_n K_r (K_n + K_r)^{-2}.$$

Если генератор и нагрузка одинаково рассогласованы по отношению к линии передачи ($K_n = K_r = K$), то $\Pi_{\max} = 1$; $\Pi_{\min} = 4K^2(1+K^2)^{-2}$; при

соким ρ и низким ТКС (табл. 7.18). Для защиты от воздействий внешней среды основной проводник покрыва-

Параметры органических диэлектриков для ПВ

Марка диэлектрика	ϵ при $\nu=10^{10}$ Гц	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ при $\nu=10^{10}$ Гц	Пробивное напряжение, МВ·м ⁻¹	$\rho \cdot 10^{-16}$, Ом·м, не менее	Рабочий интервал температур, °С	Теплостойкость по Мартенсу, °С	Плотность, г·см ⁻³	ТКЛР × 10 ³ × °град ⁻¹	Коэффициент теплопроводности, Вт·м ⁻¹ × °град ⁻¹
Незаполненные диэлектрики									
Пенопласт ПС-1	1,1 ... 1,2	11 ... 18	—	1	—	—	—	—	—
Фторопласт-4	2,0 ... 2,1	2,5	—	1000	—	400 **	2,1 ... 2,4	8... 25	—
ФФ-4	2,0±0,1	3	25	100	-50 ... +150	250	2,1 ... 2,3	8 ... 23	0,23
Полиэтилен низкой плотности	2,3	3	—	1000	—	108 **	0,96	21 ... 55	—
ПВП-М	2,35±0,05	5	45	10	-60 ... +80	130	0,95	2,45	0,22
ПФП	2,35±0,05	5	40	100	-60 ... +80	—	0,95	2,45	0,42
Полиэтилен П-50	2,4	5	—	1000	—	104 **	0,92	20 ... 22	—
Фторопласт-3	2,4	250	—	1000	—	300 **	2,1	8	—
АЛ-2,5	2,5	6	16	—	—	185	1,06	5,2	0,21
САМ-3	2,5±0,1	6	30	300	-60 ... +80	96	1,12	7,5	—
АФ-2,5	2,5±0,1	6	16	—	—	185	1,06	5,2	0,21
Полистирол	2,6	3... 4	—	1	—	90 **	1,05 ... 1,1	—	—
Полистирол УП	2,7 ... 2,8	200 ... 300	—	—	—	85 **	1,1	—	—
ФА	2,7 *	6 *	—	—	—	—	—	—	—
Наполненные диэлектрики									
АПЛ-Ф-2,65	2,65±0,15 *	30 *	—	—	—	—	1,07 ... 1,27	—	—
АПЛ-Ф-3,8	3,8±0,15 *	40 *	—	—	—	—	—	—	—
ПТ-3	2,74±0,14	11	26	10	-60 ... +80	80	1,05 ... 1,15	6 ... 12	0,14
ПТ-5	5,0±0,25	11	21	1	-60 ... +80	80	1,4 ... 1,6	5 ... 12	0,21
ПТ-7	7,0±0,35	15	19	1	-60 ... +80	85	1,7 ... 1,8	4 ... 10	0,26
ПТ-10	10,0±0,5	20	15	1	-60 ... +80	85	1,95 ... 2,1	3 ... 10	0,33
ПТ-16	16,0±0,8	30	10	1	-60 ... +80	90	2,4 ... 2,6	2 ... 8	0,46
ФЛАН-2,8	2,8±0,1	15	15	5	-60 ... +150	190	1,1 ... 1,3	5,5	0,2
ФЛАН-3,8	3,8±0,1	12	15	5	-60 ... +150	200	1,7 ... 1,9	3,8	0,3
ФЛАН-5,0	5,0±0,2	15	14	5	-60 ... +150	200	1,45 ... 1,65	5,0	0,25
ФЛАН-7,2	7,2±0,3	15	12	5	-60 ... +150	200	1,75 ... 1,95	4,0	0,3
ФЛАН-10	10,0±0,5	15	12	5	-60 ... +150	200	2,0 ... 2,2	3,5	0,4
ФЛАН-16	16,0±0,8	15	8	5	-60 ... +150	200	2,5 ... 2,7	2,5	0,5
ПКТ-3	3,0±0,15	50	19	—	—	150	1,3	6,5	0,23
ПКТ-5	5,0±0,25	48	17	0,1	—	155	1,7	5,5	0,35
ПКТ-10	10,0±0,5	45	12	0,01	—	162	2,2	4,2	0,5
СТ-3	3,0±0,15	9	24	10	-60 ... +95	95	1,1 ... 1,25	4 ... 12	0,14
СТ-5	5,0±0,25	9	21	1	-60 ... +95	95	1,45 ... 1,65	4 ... 12	0,21
СТ-7	7,0±0,35	15	19	1	-60 ... +95	100	1,7 ... 1,8	3 ... 10	0,26
СТ-10	10,0±0,5	20	15	1	-60 ... +95	100	1,85 ... 2,1	3 ... 10	0,33
СТ-16	16,0±0,8	30	10	1	-60 ... +95	110	2,4 ... 2,76	2 ... 8	0,46
Армированные диэлектрики									
ФМ-2	2,3	20	—	—	—	—	—	—	—
ФАФ-4СКЛ	2,5±0,2 *	8 *	—	100	-60 ... +25С	—	—	—	—
ФАФ-4	2,6±0,2	10	—	10	-60 ... +25С	—	2,6 ... 2,9	5	0,21
ВФС	4,4	150	—	0,0001	—	—	1,65...1,85	—	—
КАСТ-В	4,5 ... 5,5	200 ... 300	11,2	0,001	—	—	1,75...1,85	—	—
СФ-1-35	6,0 *	250 *	—	0,1	-60 ... +85	185	1,6 ... 1,85	—	0,28
СФ-2Н-50	6,0 *	250 *	—	0,1	-60 ... +85	185	1,6 ... 1,85	—	0,28
СФГ-230-2-50	6,0 *	250 *	—	—	—	—	—	—	—
АГ-4В	8	500	13	0,0001	—	—	1,7 ... 1,8	—	—
АГ-4С	8	500	13	0,0001	—	—	1,6 ... 1,8	—	—

* При $\nu=10^6$ Гц.

** Температура размягчения.

Параметры неорганических диэлектриков для ПВ

Марка диэлектрика	ϵ при $t=20^\circ\text{C}$, $\nu=10^{10}$ Гц	ТКЕ $\times 10^4 \times$ $\times \text{град}^{-1}$	$\text{tg } \delta \times 10^4$ при $t=20^\circ\text{C}$, $\nu=10^{10}$ Гц*	Пробивное напряжение, МВ·м ⁻¹	Тепло- стойкость, $^\circ\text{C}$	Плотность, г·см ⁻³	ТКЛР $\times 10^3 \times$ $\times \text{град}^{-1}$	Коэффициент теплопровод- ности, Вт·м ⁻¹ · \times $\times \text{град}^{-1}$	Класс чистоты обработки
Кварц плав- ленный С5-1	3,82±0,1	0,055	1	—	900	32...43	0,06...0,09	1	14
Стеатитовая керамика ЛБ (ВК-92) 62*	5,0...6,5	—	4...6	10...35	—	2,7	0,64	—	—
ТК-21*	6,4	—	17	42,6	—	2,31	0,70	—	—
ЦМ-4	6,5±0,5	0,6±0,2	6	25	—	—	0,18	—	—
Брокерит-9	6,6	0,795	4	—	—	2,83	0,75...0,93	160...210	8...9
Б-17, СЦ-4, С-55, СК-1*	6,7	—	3, 8	20...65	—	2,90...3,18	0,65...0,75	—	—
С48-3	6,8	—	15	40	—	—	0,48	—	14
С-61*	6,9	—	6	64	—	3,08	0,67	—	—
С41-1	7,5	—	20	40	—	—	0,41	—	14
КМ-1	7,0...7,5	1,2	16	30	—	3,2	0,34±0,02	15	—
Сигаллы:									
СТ38-1	7,25±0,15	0,862	4	40	1300	2,9±0,05	0,38	1,3	13...14
СТ50-1	8,0...9,0	1,898	35	47	—	2,65	0,52	1,4	13...14
СТ32-1 { 1 гр. 2 гр.	9,7...10,0 10,0...10,3	—	4...6	40	1200	3,17	0,32	1,0	13...14
КП-10	10	—	5	—	—	—	—	2,9	—
КП-15	15	—	5	—	—	—	—	2,9	—
СТ15-1	15±0,5	—	6	—	—	—	0,56	—	—
СТ25-1	25±1	—	12	—	—	—	0,6	—	—
ГБ-7	9,05	1,0	3	35	1120	3,85	0,55±0,05	—	—
Миналунд-7	9,05	1,01	3	50	1205	3,6	0,57	10,5	—
ВГ-IV	9,3	—	10	30	—	3,67	—	10,1	—
УФ-61	9,05±0,01	1,0±0,3	8	20	—	—	0,5...0,65	—	—
22ХС	9,3±0,3	0,815	15	50	1240	3,65	0,6±0,05	13,8	11
Сапфир	9,4...11,7	—	1	—	1900	3,98	0,5...0,6	25...40	14
Сапфирит	9,5±0,2	1,34	1	40	—	3,88	0,62±0,05	21	—
ГМ	9,5±0,2	1,75	1	50	—	3,88	0,62...0,66	16,7...21	12
П-68	9,5±1	1,0±0,3	1	20	—	—	0,5...0,65	—	—
Поликор	9,6±0,2	0,765	1	20...25	—	3,96	0,8±0,05	31,5	13...14
А-995	9,7	1,55	1	30	—	3,85	0,6±0,05	21	—
А-999	9,9	—	0,1	—	—	—	—	—	—
Кремний	11,7	—	150	—	—	2,33	0,42	90...150	14
МА-12	12±1	1,0±0,3	1	8	—	—	1,2	—	14
Арсенид галлия	13,3	—	16	—	—	5,4	0,57	41	—
ТМ-15	15±1	1,0±0,3	1	8	—	—	1,2	—	—
ТМ-20	20±1,5	-0,75±0,6	5	8	—	—	1,2	—	—
ТМ-25	25±1,5	0,75±0,6	5	8	—	—	1,2	—	—
БТА—	20±2	-0,4±0,1	3	—	—	—	1,06	—	—
ТЛ/25	25±1,5	0,47±0,3	6	8	—	—	1,2	—	—
ТЛ/33	30±1,5	0,33±0,3	5	8	—	—	1,2	—	—
ТЛ/0	40±2	0±0,2	6	7	—	—	1,2	—	—
ТЛ/47	45±2	-0,47±0,2	6	8	—	—	1,2	—	—
ТЛ/75	50±2	-1,5±0,4	6	8	—	—	1,2	—	—
ТЛ/330	60±2	-3,3±0,6	6	8	—	—	1,2	—	—
ТЛ/470	80±2	-4,7±0,9	8	8	—	—	1,2	—	—
ТЛ/750	100±10	-7,5±1,0	2	8	—	—	1,2	—	—
БА-35	35±1	-0,3...-0,4	2	8	—	4,35±0,3	0,83...0,91	15	—
МТ-60	58,7±1,8	-7	2	15	—	3,9	0,91±0,04	11	—
Т-90	87±2,6	-7...8	3	9	—	4,0	0,91±0,04	11	—
Т-150	150±15	-15±1,0	15	10...12	—	3,8...3,9	0,8...0,9	—	—
Т-250	250±30	-33±10	30	5	—	—	1,2	—	—
Рутил	89 (осн I) 173 (осн II)	-8	20	—	—	4,2...4,3	0,71...0,92	—	—

* При частоте $\nu=50$ Гц.

Таблица 7.17

Основные характеристики проводников для ПВ

Металл	$\rho \times 10^6, \text{ Ом} \cdot \text{м},$ при $t = 20^\circ \text{C}$ в постоянном токе	ТКС $\times 10^6 \times$ $\times \text{град}^{-1}$	$\delta \times 10^6, \text{ м},$		Поверхностное сопротивление пленки толщиной $0,6 \text{ мкм}$ $R_s \times 10^2, \text{ Ом}/\square$	Коэффициент температурной погрешности $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \times$ $\times \text{град}^{-1}$	ТКЛР $\times 10^4 \times$ $\times \text{град}^{-1}$	Температура плавления, $^\circ \text{C}$	Переход в сверхпроводимость, $^\circ \text{K}$	Плотность, $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$
			$\nu = 2 \cdot 10^8 \text{ Гц}$	$\nu = 10^9 \text{ Гц}$						
Серебро	1,62	4,1	1,44	0,64	2,7	453	18,6	960,8	—	10,49
Медь	1,68	4,3	1,48	0,66	2,8	393	17,0	1083	—	8,96
Золото	2,25	3,96	1,75	0,79	4,1	310	14,2	1063	—	19,32
Алюминий	2,65	3,9	1,85	0,83	4,6	218	24,58	660	1,196	2,70
Магний	4,5	4,0	2,32	1,04	7,2	155	27,0	651	—	1,74
Молибден	5,17	4,7	2,71	1,21	8,8	146	5,3	2620	0,83	10,2
Иридий	5,3	3,925	2,56	1,12	8,3	146	6,5	2410	0,14	22,4
Вольфрам	5,5	5,1	2,65	1,18	8,8	167	4,4	3410	0,01	19,3
Бериллий	5,88	—	2,15	0,96	5,42	184	13,0	1285	0,03	1,85
Никель	6,8	4,7	3,18	1,41	13,0	87,8	7,0	1453	—	8,96
Рутений	7,6	4,58	2,88	1,28	—	—	—	2500	0,47	12,2
Палладий	10,8	3,77	3,82	1,71	18,0	71,1	11,67	1552	—	12,02
Платина	10,9	3,9	3,55	1,58	16,4	69,8	8,9	1769	—	21,45
Олово	11,5	4,2	3,95	1,76	—	65,6	23,0	231,9	3,73	7,30
Тантал	12,5	3,0	4,5	2,02	—	54,4	6,6	3000	4,41	16,6
Ниобий	15,22	—	4,15	1,85	—	52,3	7,2	2500	9,2	8,57
Хром	18,9	5,88	4,1	1,82	—	66,9	6,2	1903	—	7,19
Ванадий	24,8	2,8	5,65	2,52	—	31	8,3	1900	—	6,11
Титан	55	5,5	7,8	3,48	—	21,9	8,09	1668	0,39	4,51

Таблица 7.18

Характеристики резистивных материалов для ПВ

Материал	$R_s \times 10^{-2},$ $\text{ Ом}/\square$	Толщина пленки $d, \text{ мм}$	ТКС $\times 10^4 \times$ $\times \text{град}^{-1}$	Допустимая мощность рассеяния, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$	
				на си-талле	на керамике
Пасты:					
4004	0,40...0,55	—	$\pm 2,0$	3	20
4005	0,8...1,1	—	$\pm 1,5$	3	20
4006	4,5...5,5	—	$\pm 1,5$	3	20
4007	9...11	—	$\pm 1,0$	3	20
4008	27...33	—	$\pm 0,5$	3	20
4009	54...66	—	$\pm 1,5$	3	20
4010	180...220	—	$\pm 2,0$	3	20
4011	450...550	—	$\pm 2,5$	3	20
Никель	0,1...3	—	2,5	1	8
Оксиды олова	0,1...10	—	$-7,0 \dots +9$	—	—
Карбид титана	0,15	55	—	—	—
Таитал (ТН-3)	0,25...1,0	—	$-2,0$	3	20
Нихром (X20Н80)	0,25...3	—	$\pm 1,0$	2	15
Карбид таитала	0,4	350	—	—	—
Сплав РС-5406К	0,5...2	—	0,5...1,0	2	15
Хром ЭРХ	0,5...5	—	0,6	1	8
Сплав МЛТ-3М	0,5...5	—	$\pm 2,0$	2	15
Нитрид таитала	0,5...5	—	1,0	—	—
Титан	1...20	—	$-11 \dots +30$	—	—
Вольфрам	1...100	—	1,0	—	—
Борид хрома	1,2	250	—	—	—
50% TiSi + 50% CrSi	2; 3	70; 30	—	—	—
Силицид хрома	2...5	—	$\pm 2,0$	—	—
Рений	2,5...100	—	0...-1,0	—	—
70% Cr + 30% SiO	3	100	—	—	—
Сплав РС-3710	5...10	—	$-1,5 \dots -2,5$	2	15
50% NiCr + 50% SiO	6	100	—	—	—
Нитрид хрома	8	104	—	—	—
Моноксид кремния—хром	10...100	—	0,50...2,50	—	—
Карбид хрома	12	200	—	—	—
50% CrSi + 50% TaSi ₂	14	20...30	—	—	—
Силицид таитала	18	75	—	—	—
95% TaSi + 5% SiO	20	100	—	—	—
50% CrSi + 49% TaSi ₂ + 1% SiO	50	20	—	—	—
Силицид титана	50	330	—	—	—

согласованном генераторе ($K_r = 1$)

$$P = 4K_H(1 + K_H)^{-2}$$

Однородная линия с потерями. В линии передачи длиной l и коэффициентом затухания α при согласованном генераторе значения КБВ в начале линии (K_r) и в нагрузке (K_H) связаны соотношением

$$K_r = [(1 + K_H) - (1 - K_H)e^{-2\alpha l}] \times \\ \times [(1 + K_H) + (1 - K_H)e^{-2\alpha l}]^{-1}$$

Коэффициент полезного действия η ЛП при согласованном генераторе и рассогласованной нагрузке (K_H) равен

$$\eta = 4K_H e^{-2\alpha l} (1 + 2K_H + K_H^2)^{-1}$$

Статистическая оценка КБВ в линии передачи с большим числом неоднородностей. Ожидаемое с вероятностью 0,9 значение КБВ ($K_{0,9}$) на

входе длинного тракта с числом неоднородностей N равно [4]

$$K_{0,9} = [1 - 1,52 N^{0,5} \rho_0] \times$$

$$\times [1 + 1,52 N^{0,5} \rho_0]^{-1}$$

(рис. 7.35; ρ_0 — среднеквадратичное значение всех модулей коэффициента отражения в тракте).

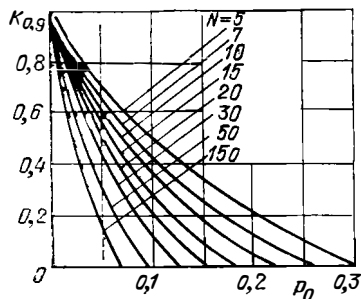


Рис. 7.35. Зависимости для оценки КБВ в линии передачи со многими неоднородностями

Методика расчета:

при заданных значениях $K_{0,9}$ и числе неоднородностей N по графикам рис. 7.35 находят величину ρ_0 ;

по известному ρ_0 определяют требования к качеству согласования отдельных элементов тракта;

при известных значениях модулей коэффициентов отражения от отдельных неоднородностей $|\rho_i|$ рассчитывают

$$\rho_0 = N^{-0,5} \left[\sum_{i=1}^N |\rho_i|^2 \right]^{0,5}$$

и по графикам рис. 7.35 находят $K_{0,9}$.

Шумовая температура линии передачи. Полная мощность шума ($P_{ш}$) на входе согласованного приемника, соединенного с нагрузкой с шумовой температурой $T_{ш}$ через линию передачи с КПД η , равна

$$P_{ш} = kT_{эКВ} \Delta\nu;$$

$$T_{эКВ} = T_{ш} \eta + T_{л} (1 - \eta)$$

($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, Вт/К·Гц — постоянная Больцмана; $\Delta\nu$ — ширина полосы пропускания приемника, Гц; $T_{л}$ — физическая температура линии передачи, К). Величина $T_{ш,л} = T_{л} (1 - \eta)$ характеризует влияние омических потерь в линии передачи на шумовую

температуру на согласованном входе приемника [4].

Шкала децибел. Отношение мощностей (напряжений, токов) измеряется в децибелах: $N = 10 \lg P_1/P_2 = 20 \lg I_1/I_2 = 20 \lg U_1/U_2$ (P_1, P_2 — уровни мощностей; I_1, I_2 — уровни токов; U_1, U_2 — уровни напряжений).

Непер — натуральный логарифм отношения двух величин; 1 непер = 4,343 дБ (отношение мощностей) и 1 непер = 8,686 дБ (отношение амплитуд).

7.5. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА КОАКСИАЛЬНЫХ ТРАКТОВ [4, 9, 11]

Тракты коаксиального типа применяются в диапазоне волн \sim от 5 см до 10 м и выполняются в виде жестких или гибких коаксиальных волноводов, состоящих из наружного и центрального проводников.

Опорные элементы. Предназначены для крепления центрального проводника коаксиальных волноводов и должны обеспечивать: минимальные вносимые отражения в рабочей полосе частот, минимальный коэффициент затухания, высокую электрическую прочность, требующую точности установки, механическую прочность, возможность разборки и сборки тракта. Для этой цели применяют: сплошное заполнение внутреннего объема диэлектриком с малыми потерями, диэлектрические шайбы и металлические изоляторы.

При сплошном заполнении диэлектриком с параметрами ϵ_r и $\text{tg } \delta$ волновое сопротивление Z (Ом), длина волны λ (м) и коэффициент затухания за счет потерь в диэлектрике α_d (дБ/м) рассчитываются по формулам:

$$Z = \epsilon_r^{-0,5} Z_0; \quad \lambda = \epsilon_r^{-0,5} \lambda_0;$$

$$\alpha_d = 27,3 \epsilon_r^{0,5} \lambda_0^{-1} \text{tg } \delta,$$

где Z_0 (Ом) и λ_0 (м) — волновое сопротивление и длина волны в воздушной линии.

Диэлектрические шайбы вызывают в тракте отражения за счет изменения волнового сопротивления и постоянной распространения. Простые дисковые шайбы (рис. 7.36,а) на низких частотах при $\epsilon_r^{-0,5} b \lambda_0^{-1} \ll 1$ слабо влияют на параметры тракта; для таких электрически тонких шайб коэффициент бегущей волны (КБВ)

равен $\text{КБВ} \approx 1 - 6,28 b \lambda_0^{-1} (\epsilon_r - 1)$. Уменьшение отражений достигается применением конструкции утопленной (неотражающей) дисковой диэлектрической шайбы (рис. 7.36,б), которая

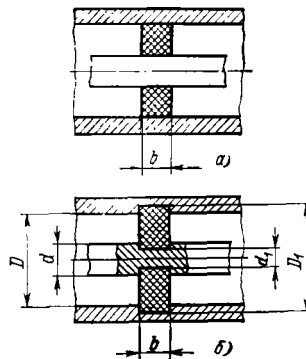


Рис. 7.36. Дисковая опорная диэлектрическая шайба (а) и неотражающая дисковая шайба (б) в коаксиальном волноводе

с целью облегчения процесса сборки тракта может разрезаться пополам по диаметру. Размеры таких шайб выбирают из условия равенства волновых сопротивлений воздушной линии и линии в сечении шайбы $Z_0 = 138 \lg(D/d) = 138 \epsilon_r^{-0,5} \lg(D_1/d_1)$ и определяются по графикам рис. 7.37.

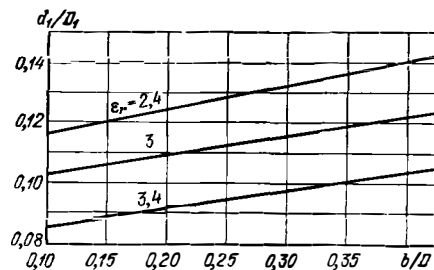


Рис. 7.37. Графики для определения размеров неотражающих шайб

По конструктивным соображениям наружный диаметр неотражающей шайбы берется равным внутреннему диаметру коаксиального волновода ($D_1 = D$); если при этом величина d_1 мала по механической прочности, то уменьшают действующее значение диэлектрической проницаемости шайбы путем удаления части диэлектрика.

Из-за облегчения условий пробоя по поверхности шайбы и наличия воздушного зазора между шайбой и центральным проводником электрическая прочность тракта снижается до величины $(0,03 \dots 0,05) P_{доп}$ ($P_{доп}$ — теоретическое значение допустимой мощности тракта без шайб). Для увеличения электрической прочности до $(0,25 \dots 0,3) P_{доп}$ используют шайбы специальной формы [5], которые крепятся на проводнике с помощью плотной или прессовой посадки. Для компенсации отражений в тракте расстояние между шайбами выбирается из условий: при двух шайбах $\sim 0,25 \lambda_{эКВ}$ (рис. 7.38,а), при нескольких шайбах $\sim 0,75 \lambda_{эКВ}$ (рис. 7.38,б), где $\lambda_{эКВ}$ — усредненная длина волны в тракте с учетом шайб.

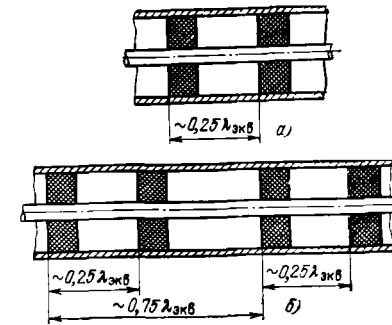


Рис. 7.38. Размещение диэлектрических шайб в коаксиальном волноводе для компенсации отражений от них: а — для двух шайб; б — для пар шайб

Диэлектрические шайбы изготавливаются из фторопласта, полиэтилена, полнстирола.

Металлические изоляторы используются вместо диэлектрических шайб в диапазоне сантиметровых волн и представляют собой жесткие параллельные короткозамкнутые шейфы четвертьволновой длины; делаются на узкополосные и широкополосные (рис. 7.39). Металлические изоляторы не нарушают согласования тракта на центральной рабочей частоте ν_0 и вносят малые дополнительные потери. Ширина полосы частот узкополосных изоляторов по уровню $\text{КСВ}_{\text{max}} = 1,10$ составляет 1... 2% ν_0 . В широкополосном изоляторе (рис. 7.39,б) по обе стороны короткозамкнутого шейфа включены четвертьволновые трансформаторы с пони-

женным волновым сопротивлением Z_T ; ширина рабочей полосы частот такого изолятора по уровню КСВН $m_{max} = 1,1$ составляет 80% v_0 . Конструктивные размеры ряда широкополосных изоляторов представлены в табл. 7.19. Электрическая прочность коаксиального тракта с металлическими изоляторами составляет $(0,25 \dots 0,3) P_{доп}$.

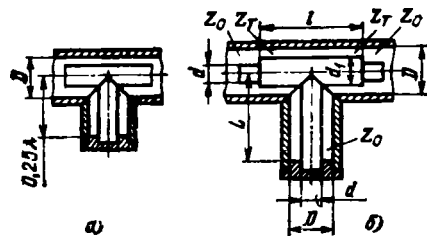


Рис. 7.39. Узкополосный (а) и широкополосный (б) металлические изоляторы

Соединительные устройства. Предназначены для сочленения отрезков коаксиальных волноводов между собой, линий с приборами или отдельных блоков в аппаратуре и должны обеспечивать: надежный электрический контакт, высокий уровень согласования, высокую электрическую и механическую прочность, низкие вносимые потери.

Жесткие коаксиальные волноводы соединяются с помощью специальных соединителей (рис. 7.40). Штырь и гнездо обеспечивают точность соединения центральных проводников не хуже 0,1 мм; надежный гальванический контакт создается цангой из фосфористой или бериллиевой брон-

зы с серебряным покрытием; высокая механическая стабильность обеспечивается накондной гайкой; допустимая передаваемая мощность в непрерывном режиме ≤ 100 Вт. При повышенной СВЧ мощности, больших динамических нагрузках и вибрациях применяют дроссельные соединения, обеспечивающие надежный электрический контакт. Пример простейшего дроссельного соединения, состоящего из двух короткозамкнутых коаксиальных полуволновых линий ABC и DEG, показан на рис. 7.41. Для рас-

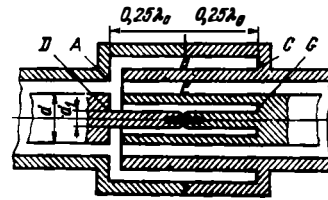


Рис. 7.41. Эскиз конструкции дроссельного сочленения

ширения полосы пропускания такого соединения рекомендуется сдвигать зазоры во внутреннем и внешнем проводниках (точки A и D) относительно друг друга на четверть длины волны; величина передаваемой мощности тракта с дроссельным соединением равна $P_1 = Pd^2, d^{-2}$ (P — мощность в линии при отсутствии соединения). Расчет характеристик дроссельного соединения дан в [4, 7].

Радиочастотные кабели соединяются с помощью стандартных радиочастотных соединителей СР с номинальными значениями волнового сопротивления 50, 75 и 100 Ом. По кон-

Таблица 7.19

Конструктивные размеры широкополосных металлических изоляторов (рис. 7.39, б) и разветвителей

Длина волны, см	Волновое сопротивление, Ом	D, мм	d, мм	d ₁ , мм	l, мм	L, мм
3,2	51	10,92	4,68	5,45	15,75	12,90
8,1	48	13,87	6,25	7,07	40,64	28,27
8,1	46	20,27	9,37	10,62	40,64	31,44
9,9	46	20,27	9,37	10,62	49,53	36,83
9,9	44	19,62	9,37	10,62	49,53	36,83
10,0	75	21,87	6,25	8,17	50,03	33,30
8,1	50	28,8	12,5	14,32	40,64	36,19

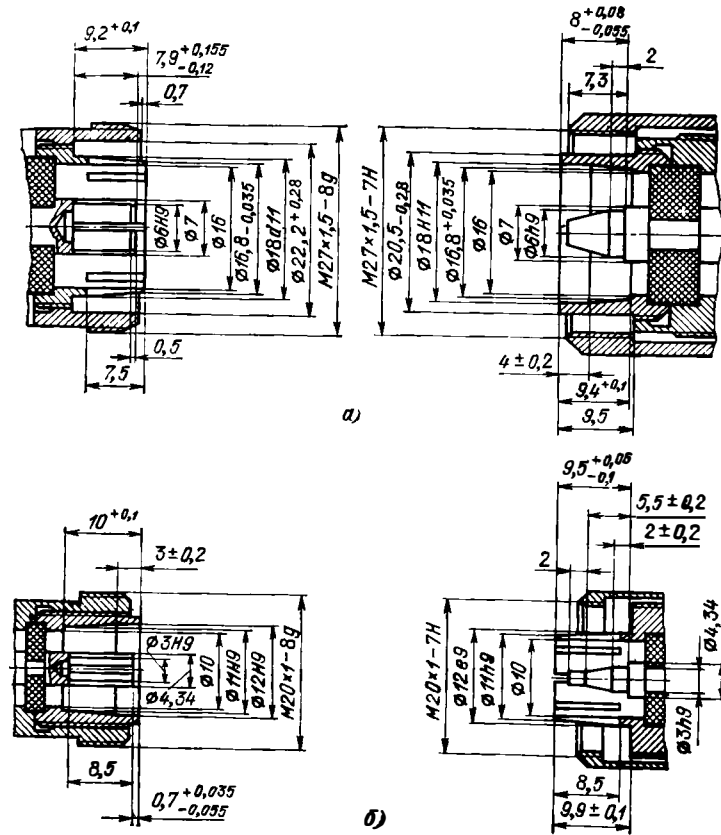


Рис. 7.40. Конструкции ВЧ соединителей (50 Ом) жестких коаксиальных волноводов для каналов 7/16 (а) и 4.34/10 мм (б)

структивному выполнению СР разделяются на кабельные, приборные, переходы, тройники и четверники; по типу соединения внутренних проводников различают розетки (гнездовой контакт) и вилки (штыревой контакт); по типу соединения внешних проводников — резьбовые (накондная гайка), байонетные (быстрозъемный фигурный замок) и врубные (непосредственное сочленение). Основные токонесущие детали СР изготавливают из бронзы, латуни или меди с серебряным покрытием; изоляционными материалами служат фторопласт-4 (тепlostойкие соединители 213... 473 К), полиэтилен и полистирол (нетепlostойкие 213... 358 К). Марки ряда радиочастотных кабелей РК и соответствующие им стандартные соединители СР приведены в табл.

7.20. Условное обозначение соединителя, например, СР-50-130П расшифровывается: СР — соединитель радиочастотный; 50 — номинальное волновое сопротивление, Ом; 130 — порядковый номер разработки (1... 100-байонетные соединители; 101... 500 — резьбовые; 501... 700 — врубные); П — опорная шайба из полиэтилена (Ф — из фторопласта-4, С — из полистирола). Величина КСВН стандартных соединителей до частот 3 ГГц не превышает 1,2... 1,3; согласование в сильной степени зависит от способа заделки кабеля в соединитель.

Выбор типа соединителя определяется требованиями к электрическим параметрам (рабочему диапазону частот, волновому сопротивлению, допустимому рабочему напряжению, ста-

Таблица 7.20

Марки стандартных ВЧ соединителей для соответствующих РК кабелей

Тип кабеля	Тип соединителя	Тип кабеля	Тип соединителя
РК 50-4-11 РК 50-4-13	СР 50-130П	РК 75-4-11 РК 75-4-12 РК 75-4-15 РК 75-4-16 РК 75-4-21 РК 75-4-22	СР 75-54П
	СР 50-131П		СР 75-55П
РК 50-4-21	СР 50-502Ф	РК 75-7-21	СР 75-58П
	СР 50-511Ф		СР 75-154П
	СР 50-521Ф		СР 75-155П
	СР 50-503Ф		СР 75-158П
РК 50-7-11	СР 50-512Ф	РК 75-7-21	СР 75-501Ф
	СР 50-522Ф		СР 75-505Ф
	СР 50-61П		СР 75-514Ф
	СР 50-163П		СР 75-502Ф
РК 50-7-15	СР 50-63П	РК 75-7-21	СР 75-506Ф
	СР 50-64П		СР 75-515Ф
	СР 50-161П		
	СР 50-164П		
	СР 50-504Ф		
	СР 50-513Ф		
	СР 50-523Ф		

бильности параметров при воздействии механических и климатических факторов). Резьбовые и байонетные соединители рекомендуется использовать до частот 3 ГГц, в рубного типа — до 10 ГГц. При размещении в аппаратуре необходимо исключить механические воздействия на кабели в месте их заделки в соединитель и обеспечить свободный доступ к ним.

Соединение коаксиальных волноводов различных сечений приводит к возникновению отражений от места стыка за счет изменения волнового сопротивления (рис. 7.42,а). В простейшем случае для сохранения постоянства волнового сопротивления вдоль такой линии ($Z_{01} = Z_{02} = Z_0$) не-

обходимо выполнить условие $d_1 D_2 = d_2 D_1$. Для расширения рабочей полосы частот сечение скачка центрального проводника сдвигают на величину $\Delta \approx 0,1 D_2$ (рис. 7.42,б); точные значения Δ определяются по графикам рис. 7.42,в, при этом величина Δ не зависит от частоты при $\lambda_0 > 4D_2$.

Конусообразный переход (рис. 7.43, а) дает возможность значительного снижения отражений в широкой полосе частот, обладает высокой электрической прочностью за счет отсутствия острых кромок на центральном проводнике. Волновое сопротивление $Z_{0к}$ по длине конусного перехода постоянно, когда оба конуса имеют общую вершину, и определяет-

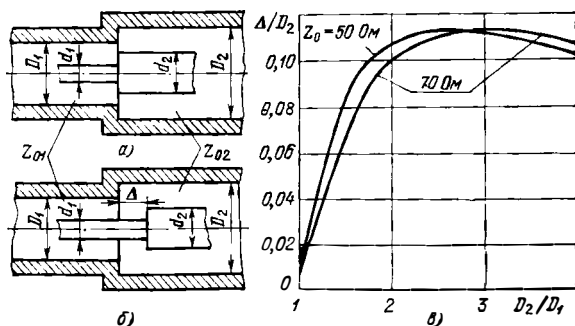


Рис. 7.42. Скачкообразное соединение коаксиальных волноводов без компенсации (а) и с компенсацией (б) отражений; выбор сдвига скачка проводников (в)

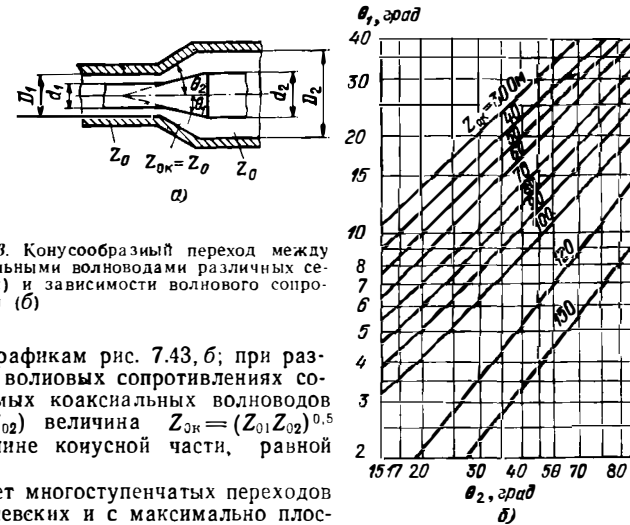


Рис. 7.43. Конусообразный переход между коаксиальными волноводами различных сечений (а) и зависимости волнового сопротивления (б)

ся по графикам рис. 7.43, б; при различных волновых сопротивлениях соединяемых коаксиальных волноводов (Z_{01}, Z_{02}) величина $Z_{0к} = (Z_{01} Z_{02})^{0,5}$ при длине конусной части, равной $0,25 \lambda_0$.

Расчет многоступенчатых переходов (чебышевских и с максимально плоской характеристикой) между коаксиальными волноводами различных сечений дан в [5].

Изгибы и разветвления коаксиальных волноводов. Основные типы изгибов жестких коаксиальных волноводов под углом 90° показаны на рис. 7.44. Прямоугольный изгиб (рис. 7.44,а) вносит в тракт заметное отражение в диапазоне дециметровых волн. Коррекция неоднородностей, обусловленных изгибом, достигается путем среза центрального проводника на величину δ (рис. 7.44,в) или

уменьшением его диаметра до d_1 (рис. 7.44,г); для линии с волновым сопротивлением $Z_0 = 70$ Ом величины δ и d_1 равны соответственно $0,14 D$ и $0,26 D$. Для уменьшения отражений используют два уголка по 45° каждый, расположенных на расстоянии $0,25 \lambda_0$ (рис. 7.44,д). В плавных изгибах (рис. 7.44,б) отражения минимальны при $R \approx 0,16 \lambda_0$ (λ_0 — средняя длина волны рабочего диапазона).

Разветвители предназначены для

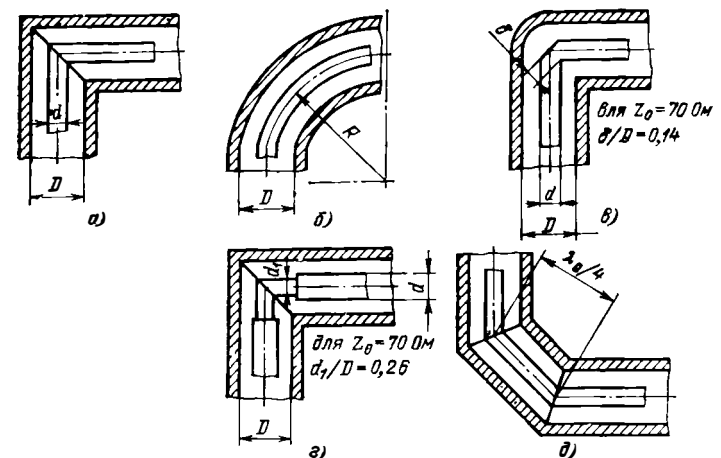


Рис. 7.44. Изгибы жестких коаксиальных волноводов: а — прямоугольный; б — плавный (радиусный); в, г — прямоугольные с коррекцией; д — двойной

деления мощности между несколькими каналами (рис. 7.45); размеры широкополосных разветвителей с утолщениями в области соединения центральных проводников приведены в табл. 7.19.

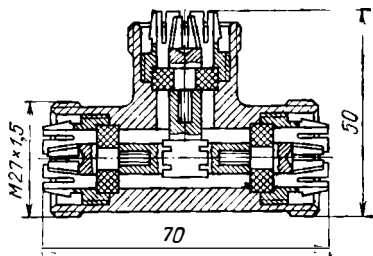


Рис. 7.45. Конструкция Т-образного коаксиального тройника

7.6. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТОВ [2, 5, 26]

Соединения волноводов. Различают три основных вида соединений СВЧ узлов и отрезков волноводов: неразъемные, разъемные для редкой и частой разборки. Соединения характеризуются следующими основными электрическими параметрами: величиной КСВН, коэффициентом электрогерметичности, дБ, $N_r = 10 \lg(P_0/P_{\text{пл}})$ и

коэффициентом вносимых потерь $\alpha = 10 \lg(P_{\text{пот}}/P_0)$ (P_0 — мощность в месте соединения; $P_{\text{пл}}$ — мощность паразитного излучения через соединение; $P_{\text{пот}}$ — активные потери из-за несовершенства конструкции и ошибок монтажа).

Неразъемные соединения прямоугольных волноводов с волной H_{10} при прецизионной сборке обладают $K_{\text{СВН}} \leq 1,005$, $\alpha \leq 0,05$ дБ и $N_r > 120$ дБ (рис. 7.46); жесткие допуски (среднеквадратичные значения радиального сдвига осей $\leq 0,04$ мм и излома осей $\leq 2,3$ угл. мин) при сочленении секций круглых волноводов с волной H_{01} обеспечиваются точными муфтами, которые запрессовываются на концы волноводов и привариваются к специальным кольцам.

Разъемные соединения прямоугольных волноводов осуществляются при помощи фланцев двух основных ти-

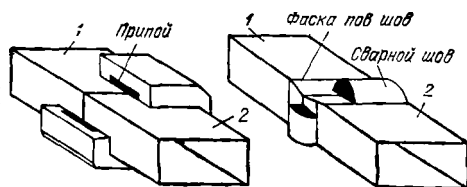


Рис. 7.46. Конструкции неразъемных волноводных соединений (1 и 2 — соединяемые отрезки волноводов)

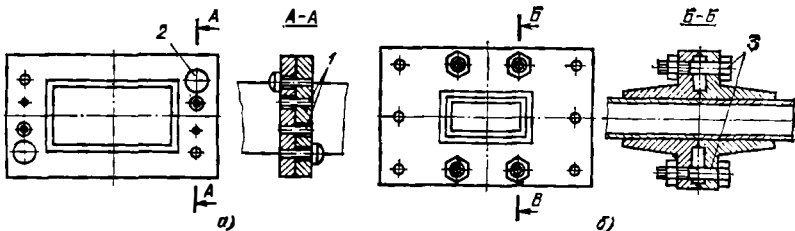


Рис. 7.47. Конструкции разъемных фланцевых соединений прямоугольных волноводов для редкой разборки: а — с направляющими штифтами 1 и вянтами 2; б — со стягивающими болтами 3; в — габаритные размеры (см. табл. 7.23)

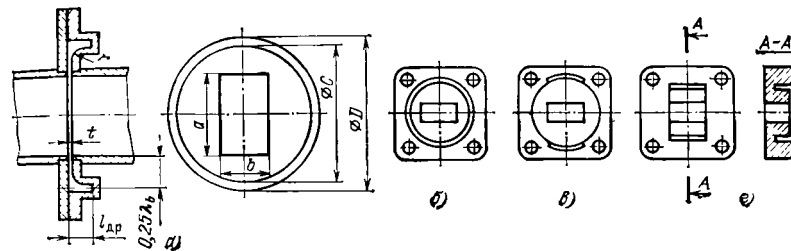


Рис. 7.48. Дроссельные фланцевые соединения прямоугольных волноводов с волной H_{10} : а — общий вид; б — дроссель в форме кольца; в — дроссель в форме двух полуколец; г — дроссель в форме двух сегментов

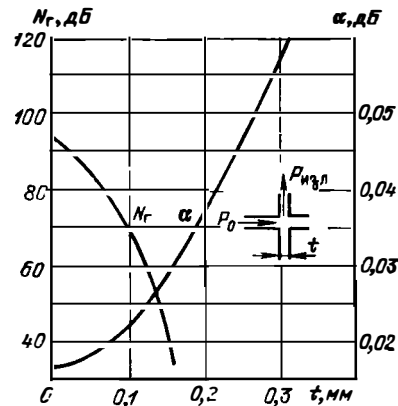


Рис. 7.49. Зависимости электрогерметичности N_r и вносимых потерь α контактного фланцевого соединения без прокладки для прямоугольного волновода сечением 23×10 мм от размера зазора между фланцами

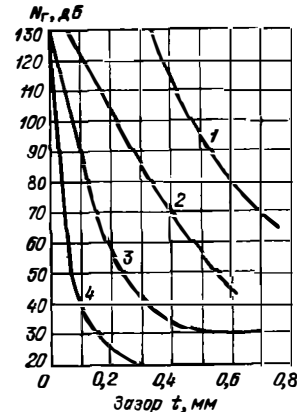


Рис. 7.50. Зависимости электрогерметичности соединения прямоугольных волноводов от зазора между фланцами и числа лепестков контактной прокладки: 1 — 16 лепестков; 2 — 5 лепестков; 3 — прокладка толщиной 0,2 мм без лепестков; 4 — фланец с контактным пояском

пов: контактных (рис. 7.47) и дроссельных (рис. 7.48).

Контактные соединения просты по конструкции, широкополосны, требуют высокой точности изготовления, обладают низкой надежностью при многократных переборках тракта; электрогерметичность и вносимые потери сильно зависят от размера зазора между фланцами (рис. 7.49). Повышение электрогерметичности (рис. 7.50) достигается использованием тонких контактных прокладок из бериллиевой бронзы БрБ2Т (рис. 7.51). Характеристики типовых контактных соединений для прямоугольных латунных волноводов приведены в табл. 7.21; конструктивные размеры контактных прокладок и контактных флан-

цев даны на рис. 7.51, 7.52. Для герметизации соединений используются прокладки из резины ИРП-1267 или резиновой смеси ИРП-1354 (рис. 7.53). Для соединения отрезков круглых волноводов в трактах наземных РРЛ [20] применяются фланцевые соединения, позволяющие поворачивать одну секцию относительно другой на 360° (рис. 7.54); соосность волноводов обеспечивает стальная центрирующая муфта 1, стягивающие кольца 3 удерживаются за счет разрезных колец 5, герметичность обеспечивается резиновыми прокладками 4.

Дроссельные соединения (см. рис. 7.48) менее чувствительны к перекосам фланцев, зазором и смещениям; допускают частые переборки; более

Таблица 7.21

Характеристики типовых контактных соединений для прямоугольных волноводов

Сечение волновода $a \times b$, мм	КСВН, не более	КСВН от монтажных допусков, не более	Потери $\alpha \times 10^2$, дБ, не более	Электрогерметичность, дБ, не менее	
7,2×3,4	1,030	—	5	50	
11×5,5	1,025	1,015	4	70	
13×6,5	1,020	1,015	3		
16×8	1,010	1,006	2		
17×8	1,010	1,005	2	80	
19×9,5		1,004	1,5		
23×10		1,004	1		
28,5×12,6		1,003	0,7	90	
35×15		1,002	0,5		
40×20		1,0015	0,4		
48×24		1,001	0,3		100
58×25			0,2		
72×34			0,15		
90×45			0,1		
110×55	0,08				
130×65	0,05				
160×80	0,04				
180×90	0,035				
196×98	0,03				
220×110	0,025				
248×124	0,02				

Примечание. Максимальное избыточное давление в полости волновода см. в табл. 7.31

Таблица 7.22

Основные конструктивные размеры дроссельного соединения для прямоугольных волноводов (рис. 7.48,а)

Тип волновода	Размеры волновода, мм		Размеры дросселя, мм				
	a	b	c	D	t	$l_{др}$	r
МЭК-32	72,14	34,0	84,3	98,6	0,91	21,84	2,3
МЭК-40	58,927	29,1	66,4	77,47	0,74	17,78	1,9
МЭК-48	47,55	22,15	55,63	64,92	0,63	14,48	1,52
МЭК-58	40,39	20,19	46,13	53,85	0,53	12,32	1,27
МЭК-70	34,85	15,18	40,6	47,24	0,43	10,29	1,02
МЭК-81	28,5	12,6	32,26	37,97	0,38	8,76	0,76
МЭК-100	22,86	10,16	25,78	31,11	0,29	6,73	0,51
МЭК-120	19,05	9,52	21,74	25,32	0,23	5,82	0,46
МЭК-140	15,8	7,9	18,03	21,03	0,19	4,83	0,41
МЭК-180	12,95	6,48	14,78	17,25	0,15	3,96	0,31
МЭК-220	10,67	4,32	12,0	13,60	0,13	3,28	0,20
МЭК-260	8,64	4,32	9,86	11,51	0,10	2,64	0,18
МЭК-320	7,11	3,56	8,15	9,45	0,09	2,18	0,15
МЭК-400	5,69	2,84	6,53	7,57	0,076	1,75	0,127
МЭК-500	4,78	2,39	5,46	6,35	0,063	1,45	0,102
МЭК-620	3,76	1,88	4,32	5,00	0,051	1,14	0,076
МЭК-740	3,10	1,55	3,53	4,11	0,038	0,94	0,063
МЭК-900	2,54	1,27	2,92	3,38	0,025	0,79	0,051
МЭК-1200	2,03	1,02	2,34	2,69	0,026	0,63	0,051

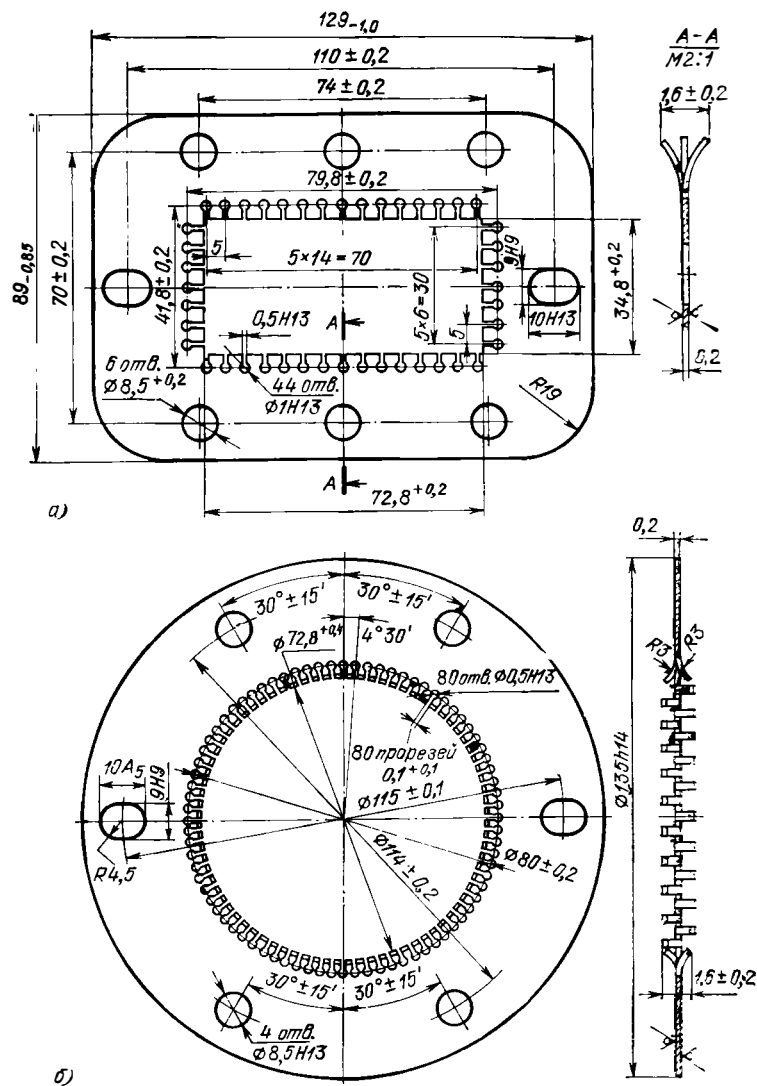


Рис. 7.51. Контактные промежуточные прокладки: а — для прямоугольного волновода сечением 72×34 мм; б — для круглого волновода диаметром 72 мм

узкополосны (10...20%, $v_{ср}$); величина электрогерметичности ≤ 60 дБ. Конструктивные размеры дроссельных фланцев даны в табл. 7.22; размеры участков прямоугольных волноводных труб, обработанных под фланцы, (рис. 7.47, в) — в табл. 7.23.

Независимо от вида соединения отражения и ухудшение электрогерме-

тичности в месте стыка волноводов вызываются: сдвигом и поворотом сечений волноводов, изломом оси и допусками на размеры соединяемых секций (рис. 7.55). При заданных (допустимых) значениях составляющих $|R|_a$ и $|R|_b$ модуля коэффициента отражения в месте стыка допуски $\delta_{a(b)}(\lambda_0)$ для прямоугольных

волноводов с волной H_{10} рассчитываются по формулам [7]:

для параллельного сдвига сечений (рис. 7.55,а) $\delta_a(\lambda_0) \approx 0,8|R|_a$, $\delta_b(\lambda_0) \approx \approx |R|_b$;

для одинаковых допусков на сечения при $\delta_a(\lambda_0) = \delta_b(\lambda_0)$ (рис. 7.55,б) $\delta_{a(b)}(\lambda_0) \approx 0,15|R|$;

для излома осей соединяемых отрезков (рис. 7.55,в) $|R|(\varphi_a) \approx 10^{-3}$ на 1° излома в плоскости широкой

стенки, $|R|(\varphi_b) \approx 2 \cdot 10^{-3}$ на 1° излома в плоскости узкой стенки;

для поворота соединяемых отрезков на угол φ (рис. 7.55,г) $|R|(\varphi) \approx \approx 3 \cdot 10^{-3}$ на 1° поворота.

В самом неблагоприятном случае суммарный коэффициент отражения, вызванный наличием нескольких видов погрешностей, определяется суммой модулей составляющих коэффициентов отражения, поэтому допуски

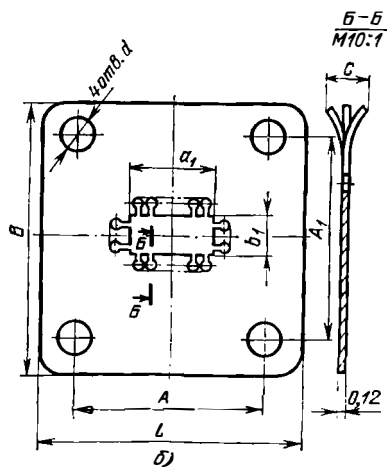
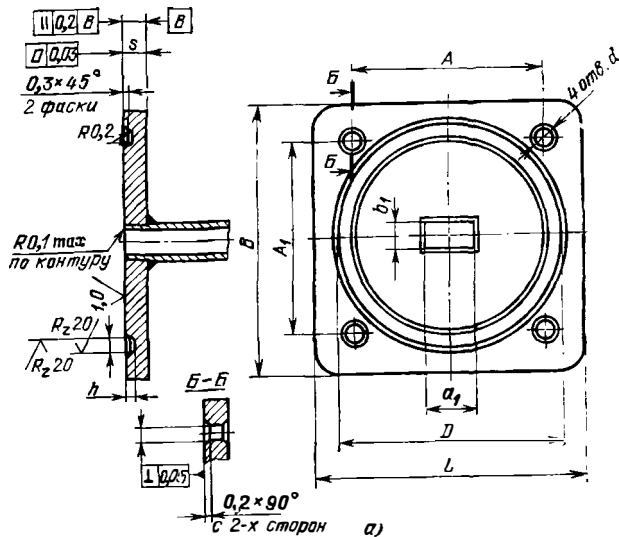


Рис. 7.52. Конструкция и размеры типовых контактных фланцевых соединений (а) и соответствующих им контактных прокладок (б)

Сечение волновода $a \times b$	L	B	A/A ₁		a ₁		b ₁		D		s	d	h
			доп. откл. $\pm 0,05$	ном.	доп. откл.	ном.	доп. откл.	ном.	доп. откл.	ном.			
11×5,5	29	29	21	22	11		5,5		24			3,5 ^{+0,25}	
13×6,5	30	30	22	23	13		6,5		26	+0,14	4,5 ^{±0,24}		1,3 ^{+0,06}
16×8	35	35	25	26	16	+0,04	8	+0,04	30				
19×9,5	39	39	29	30	19		9,5		34	+0,17			
23×10	42	42	31	32	23		10		38		5 ^{±0,24}	4,5 ^{+0,25}	1,5 ^{+0,06}
28,5×12,6	47	47	35	37	28,5	+0,05	12,6	+0,05	44				
35×15	54	54	41	42	35		15		51	+0,2			

Примечание. Все размеры даны в мм.

Сечение волновода $a \times b$	a ₁	b ₁	L	B	A	A ₁	d	c
11×5,5	11,5	6	29	29	21	22	3,5 ^{+0,25}	
13×6,5	13,5	7	30	30	22	23		1,1
16×8	16,5	8,5	35	35	25	26		
19×9,5	19,5	10	39	39	29	30		
23×10	23,5	10,5	42	42	31	32	4,5 ^{+0,25}	
28,5×12,6	29	13,5	47	47	35	37		1,5
35×15	35,5	15,5	54	54	41	42		

Примечание. Все размеры даны в мм.

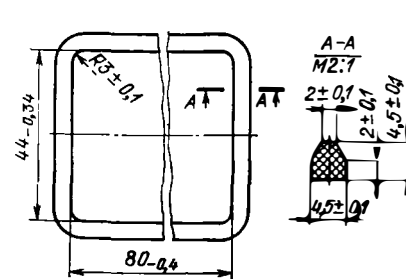


Рис. 7.53. Герметизирующая резиновая прокладка для прямоугольного волновода сечением 72×34 мм

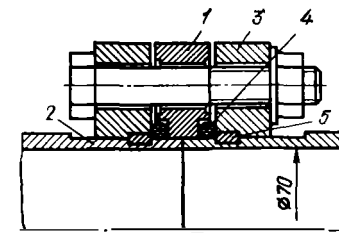


Рис. 7.54. Конструкция разъемного соединения круглых волноводов: 1 — стальная центрирующая муфта; 2 — круглый волновод; 3 — стягивающие кольца; 4 — герметизирующая резиновая прокладка; 5 — разрезное кольцо

Таблица 7.23

Размеры участков волноводных труб, обработанных под фланцы, мм

Сечение прямоугольного волновода $a \times b$	A	ΔA	B	ΔB	L	ΔL	C	δ_1	δ_2
11×5,5	11,8		6,3						
13×6,5	14,4		7,9		7,5		0,4		
16×8	17,6		9,6						
19×9,5	20,6		11,1						
23×10	24,6		11,6		8			0,1	0,1
28,5×12,6	31,6	-0,05...	15,2	-0,05...		+0,18			
35×15	37,6	-0,1	17,6	-0,01			0,8		
48×24	51,6		27,6						
58×25	61,6		28,6		9				
72×34	75		37						
90×45	93		48		24				
110×55	114		59		26				
130×65	134	-0,1...	69	-0,1...					
160×80	164	-0,2	84	-0,2		+0,26	1	0,2	0,3
180×85	185		90						
196×98	201		103		28				
220×110	225		115						
248×124	253		129						

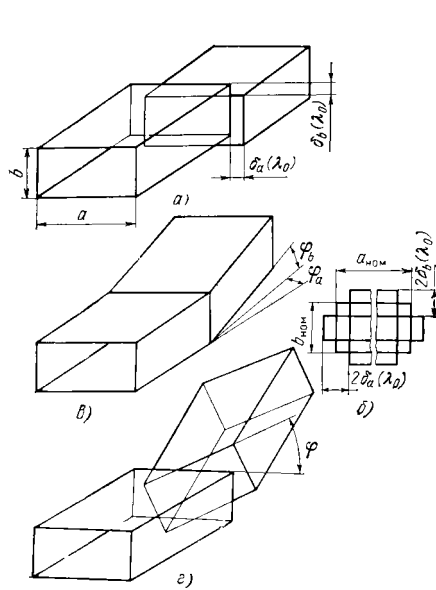


Рис. 7.55 Неоднородности в месте соединения волноводов: а — при параллельном сдвиге сечений; б — при выполнении сечений с одинаковым допуском, но с различными отклонениями по знаку (неблагоприятный случай); в — при изломе оси; г — при повороте сечений

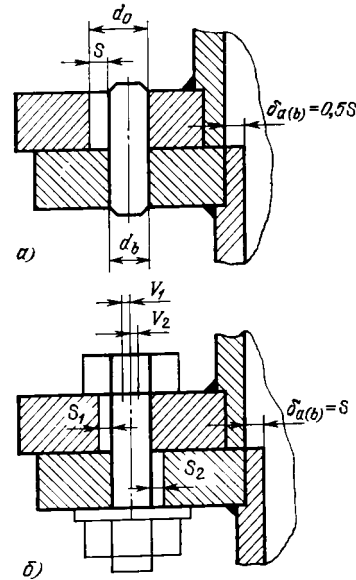


Рис. 7.56. Смещение каналов при штифтовом (а) и болтовом (б) соединениях прямоугольных волноводов

на отдельные виды погрешностей должны ужесточаться. Ухудшение электрогерметичности соединения находит по графикам рис. 7.49 пос-

ле расчета эквивалентного зазора t , вызванного всеми видами погрешностей.

Выбор и расчет допусков на установочные элементы для фланцевых соединений производят для выбранного типа соединения — штифтового или болтового (рис. 7.56), полагая, что стыкуемые каналы волноводов одинаковы. Расчетные соотношения для допустимого смещения каналов по размерам a и b [7]:

при штифтовом соединении (рис. 7.56, а) $\delta_{a(b)} \approx 0,5(d_0 - d_b) = 0,5S$, где d_0, d_b — номинальные диаметры соответственно отверстия и штифта (винта); S — зазор между отверстием и штифтом;

при болтовом соединении (рис. 7.56, б) $\delta_{a(b)} \approx V_1 + V_2 \approx 0,5(S_1 + S_2) = S$ (для $S_1 = S_2$). Допуск на расстояние между осями ΔL отверстий у обоих фланцев выбирают не более чем на диаметры установочных элементов и отверстий; допуск на несимметричность установочных отверстий к осям симметрии каналов волноводов берется равным (0,5... 1) $\delta_{a(b)}$.

Таблица 7.24

Рекомендуемые посадки для установочных элементов фланцевых соединений прямоугольных волноводов для конструкций серийного производства

Виды соединений	Посадки
Штифтовые (для двух установочных штифтов)	H9/I18
Винтовые: для 2-, 4-установочных винтов	H9/b11
для многорядного соединения	H13/b12 или H13/b11
Болтовые: для установочных болтов	H9/b11
для 2-, 4-установочных болтов	H9/b11
для многорядного соединения	H13/b12 или H13/b11

Рекомендуемые посадки при КСВН $\leq 1,02$ приведены в табл. 7.24. Для соединения элементов и узлов волноводного тракта миллиметрового диапазона рекомендуется использовать штифтовые соединения, для сантиметрового — установочные болты, для дециметрового — многорядное болтовое соединение.

Изгибы и скрутки волноводов. Используются в качестве вспомогательных соединительных элементов при монтаже тракта. Изгибы прямоугольных волноводов выполняются по широкой (Е-изгиб) и узкой (Н-изгиб) стенкам и делятся на плавные или радиусные (рис. 7.57) и уголкового с одним поворотом (рис. 7.58, а, в) и многоступенчатые (рис. 7.58, б, г). При резком изгибе тракта возникают отражения, для уменьшения которых изгиб выполняется на участках длиной в несколько длин волн в волноводе.

Плавные изгибы обладают минимальными отражениями при длине $L \approx 0,5n\lambda_n$ ($n=1, 3, 5, \dots$), что обусловлено взаимной компенсацией отраженных волн от концов изгиба. Высокие значения КВВ достигаются при величине внутреннего радиуса изгиба $R > \lambda_n$. Основные размеры и параметры плавных изгибов стандартных прямоугольных волноводов в плоскостях Е и Н приведены в табл.

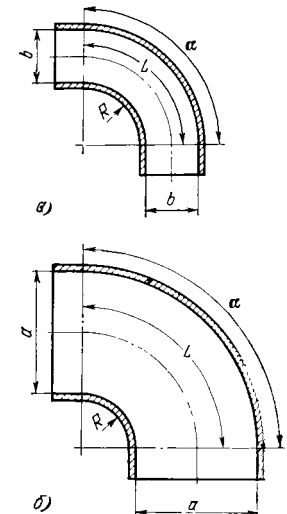


Рис. 7.57. Плавные изгибы прямоугольных волноводов в плоскостях Е (а) и Н (б)

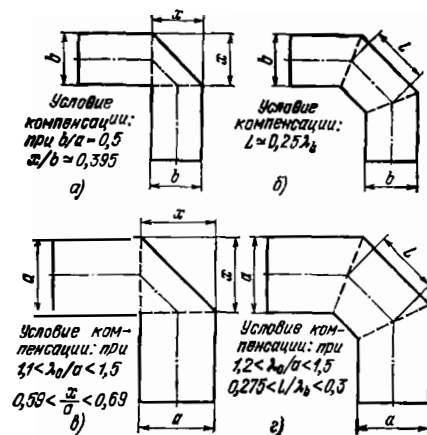


Рис. 7.58. Угловые изгибы прямоугольных волноводов: а — одиночный Е-уголок; б — Е-уголок с двойным поворотом; в — одиночный Н-уголок; г — Н-уголок с двойным поворотом

7.25; примеры конструкций даны на рис. 7.59.

Угловые изгибы с одним поворотом (рис. 7.58, а, в) имеют наименьшие габариты, но узкополосны; оптимальные размеры одиночных Е- и Н-уголков определяются по графикам рис. 7.60, а, б. Угловой изгиб с двойным поворотом под углом 45° (рис. 7.58, б, г) более широкополосен; для Е-уголка длина $L \approx 0,25 \lambda_b$; для Н-уголка оптимальная длина выбирается по графикам рис. 7.60, а.

Отражения от изгибов в сильной степени зависят от тщательности изготовления и деформации стенок волновода при изгибе; по всей длине изгиба необходимо обеспечить постоянство внутренней полости волновода и высокую чистоту токонесущих поверхностей; в многократно изогнутых волноводах малого сечения рекомендуется серебрить соединительные поверхности фланцев, внутренне по-

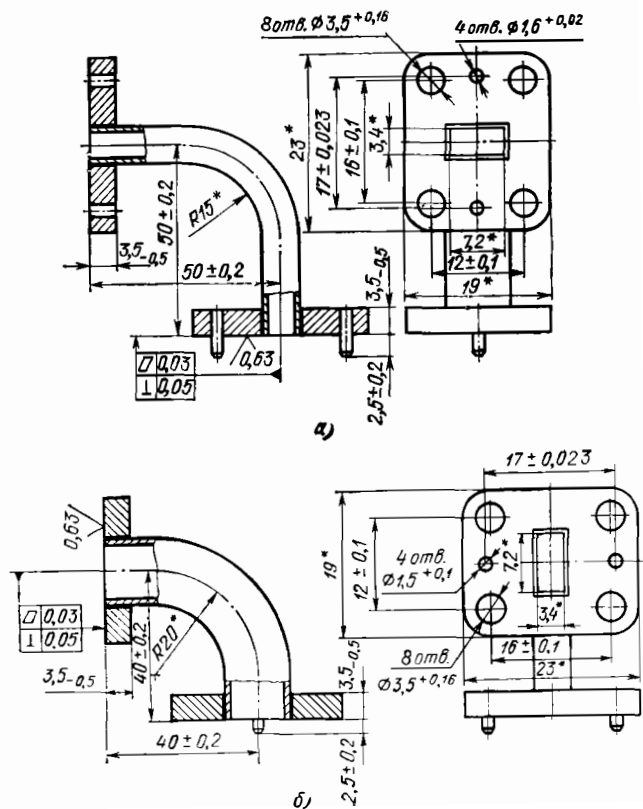


Рис. 7.59. Конструкции плавно изогнутых секций прямоугольных волноводов сечением 7,2×3,4 мм в плоскостях Е (а) и Н (б)

Параметры радиусных изгибов прямоугольных волноводов в плоскостях Е и Н

Номинальные размеры волновода, мм	Номинальный радиус изгиба и допустимые отклонения, мм		Номинальный (А, Б) угол изгиба и допустимые отклонения, град	КСВН в плоскости изгиба, не более	
	Е	Н		Е	Н
7,2×3,4	5±0,3	5±0,3	А±1, Б±0,5	1,07	1,1
	7±0,3	8±0,3			
	12±0,5	12±0,5			
11×5,5	5±0,3	—	А±1, Б±0,5	1,1 1,07	1,1 —
	7±0,3	7±0,3			
	11±0,5 20±0,5	12±0,5 20±0,5			
19×9,5	8±0,3	12±0,3	А±1, Б±0,5	1,1 1,07	1,1 —
	12±0,5	20±0,5			
	19±0,5 33±0,5	— 35±0,5			
23×10	9±0,3	—	А±1, Б±0,5	1,1 1,07	1,1 —
	15±0,3	15±0,3			
	23±0,5 40±0,5	25±0,5 40±0,5			
28,5×12,6	11±0,3	18±0,3	А±1, Б±0,5	1,1 1,05	1,1 —
	18±0,5	30±0,5			
	29±0,5 50±0,5	— 50±0,5			
35×15	14±0,3	—	А±1, Б±0,5	1,1 1,07	1,1 —
	25±0,5	25±0,5			
	35±0,5 60±0,5	40±0,5 60±0,5			

Примечание. А соответствует значениям угла изгиба 15, 30, 45, 60, 75, 90°, Б — значениям 15, 30, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180°. Допустимые отклонения сечения в зоне изгиба ±0,3 / -0,2 мм.

верхности покрывать лаком УР-231 или ВЛ-831.

Скрученные секции предназначены для поворота плоскости поляризации волны в волноводе. Плавно скрученная секция прямоугольного волновода с волной Н₁₀ показана на рис. 7.61; длина L скрученного отрезка волновода выбирается равной $L > 2\lambda_b(1 + 0,25n)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). Для

поворота плоскости поляризации волны Н₁₁ в круглом волноводе используется скрученная металлическая пластина [1].

Разветвления волноводов. Предназначены для деления СВЧ мощности между несколькими каналами и для подключения нескольких источников к общей нагрузке. Различают следующие типы разветвителей на

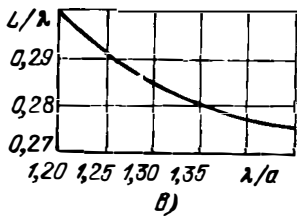
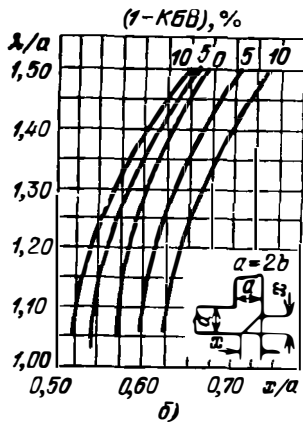
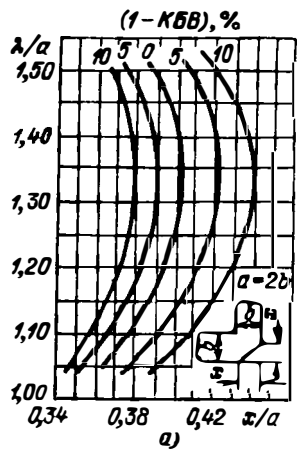


Рис. 7.60. Оптимальные размеры угловых изгибов прямоугольных волноводов: а — для Е-уголка; б — для Н-уголка; в — для двойного Н-уголка

прямоугольном волноводе (рис. 7.62): У-образный; Т-образный в плоскости Е (Е-тройник); Т-образный в плоскости Н (Н-тройник); двойной Т-образный мост.

В простейшем У-образном разветвителе используется металлическая пластина, перпендикулярная вектору Е волны H_{10} (рис. 7.62,а). В Е-тройнике плоскость разветвления совпадает с плоскостью электрических силовых линий волны H_{10} , при подаче энергии в плечо В она делится в противофазе между плечами А и В (рис. 7.62,б). В Н-тройнике плоскость разветвления совпадает с плоскостью магнитных силовых линий волны H_{10} , энергия делится симметрично между плечами А и В (рис. 7.62,в). Примеры конструкций Е- и Н-тройников приведены на рис. 7.63.

Двойной Т-образный мост (рис. 7.62,г) состоит из совмещенных Е- (плечи А, Б, В) и Н- (плечи А, В, Г) тройников. Мощность, поступающая в волновод Б, делится поровну между волноводами А и В и не попадает в волновод Г; аналогично, мощность из плеча Г делится поровну между волноводами А и В и не попадает в плечо Б. Плечи Г и Б оказываются развязанными (величина развязки ≥ 40 дБ), что позволяет, например, к плечу Г подключить приемную антенну, к плечу Б — гетеродин, к плечам А и В — детекторы. Для согласования плеч двойного Т-образного моста применяются индуктивный штырь в плече Б и емкостной — в плече Г [4].

Переходы и преобразователи типов волн. Переходы предназначены для соединения двух волноводов различных поперечных сечений с целью согласования их волновых сопротивлений. При заданных перепаде волновых сопротивлений, рабочем диапазоне частот и допуске на рассогласование длина перехода должна быть минимально возможной. Переходы делятся на плавные и ступенчатые; при одинаковых допусках на рассогласование и одинаковом перепаде волновых сопротивлений длина ступенчатого перехода всегда меньше длины плавного; электрическая прочность плавного перехода выше, чем ступенчатого.

Плавный линейный переход между прямоугольными волноводами различных сечений (рис. 7.64) имеет простую конструкцию, высокую электрическую прочность, но значительную длину. Для получения минимальных отражений длина плавного перехода выбирается равной $L \approx 0,5 n \lambda_v$ (λ_v — длина волны в волноводе с учетом

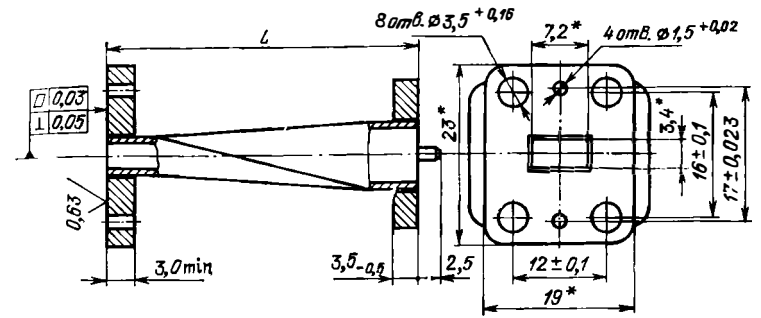


Рис. 7.61. Конструкция скрученной секции прямоугольного волновода

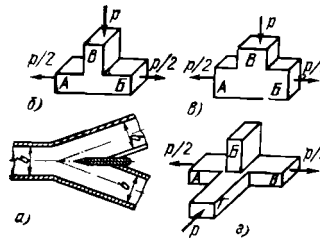


Рис. 7.62. Волноводные разветвления: а — У-образный по узкой стенке; б — Е-тройник; в — Н-тройник; г — двойной Т-образный мост

изменения размеров поперечного сечения; $n \geq 5$ — целое положительное число); при одинаковых размерах узких стенок соединяемых волноводов

($b_1 = b_2$) и небольшом различии ширинок стенок a_1 и a_2 длина $L = 0,16 \times (\lambda_{v1} + \lambda_{v2}) + 0,67 \lambda_v$ (λ_{vcp} — длина волны в волноводе шириной $a_{cp} = 0,5(a_1 + a_2)$).

Для простейшего четвертьволнового ступенчатого перехода (рис. 7.65) величина $b = (b_1 b_2)^{0,5}$. Расчет плавных и многоступенчатых волноводных переходов с чебышевской и максимальной плоской частотными характеристиками дан в [5].

Для преобразования волны H_{10} в прямоугольном волноводе в волну H_{11} в круглом волноводе используют плавные и ступенчатые переходы. Длину плавного перехода следует выбирать не менее $(2 \dots 3) \lambda_v$, диаметр круглого волновода — больше диаго-

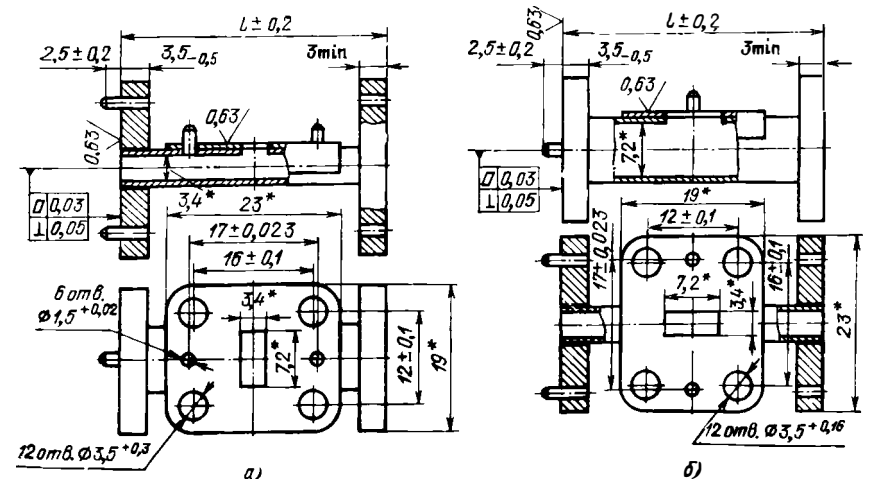


Рис. 7.63. Конструкция волноводных Е- (а) и Н-тройников (б)

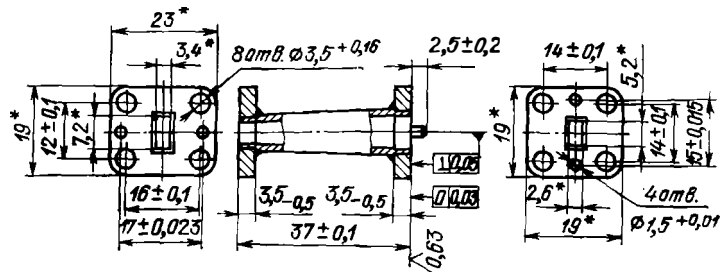


Рис. 7.64. Конструкция перехода между волноводами различных сечений

нали сечения прямоугольного волновода. Пример конструкции плавного перехода дан на рис. 7.66. Ширина полосы частот ступенчатого перехода определяется числом ступенек и их размерами [5].

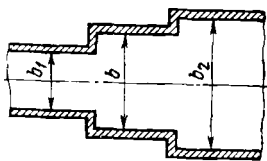


Рис. 7.65. Ступенчатый переход между прямоугольными волноводами

Примеры конструкций переходов от прямоугольного волновода с волной H_{10} к круглому с волной E_{01} показаны на рис. 7.67 [11].

Для перехода от коаксиальной линии с Т-волной к прямоугольному волноводу с волной H_{10} используются переходы следующих основных типов: зондовые, с поперечным стержнем, пугоничные и многоступенчатые. Зондовые переходы (рис. 7.68) обла-

дают КСВН $\leq 1,1$ в полосе частот $\pm 6\%$ $\nu_{ср}$, низким значением допускаемой мощности P_{max} . Переходы с поперечным стержнем (рис. 7.69) имеют достаточную точность и жесткость установки внутреннего проводника,

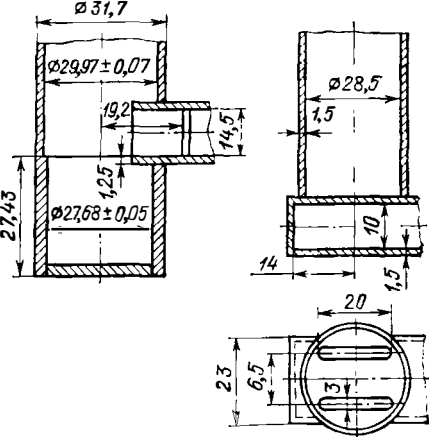


Рис. 7.67. Переходы от прямоугольного волновода с волной H_{10} к круглому с волной E_{01}

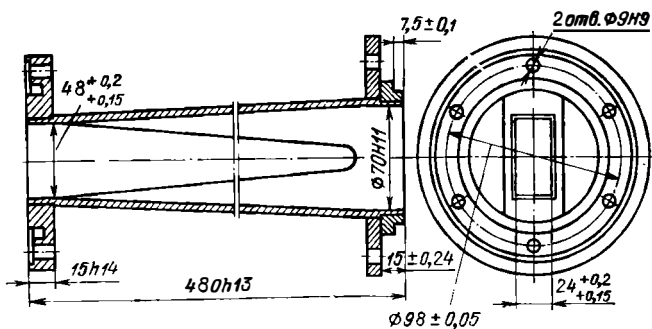


Рис. 7.66. Конструкция плавного перехода с прямоугольного волновода сечением 48 × 21 мм на круглый диаметром 70 мм

величина P_{max} в два раза выше, чем у зондового перехода. Переходы пугоничного типа (рис. 7.70) предназначены для работы на высоком уровне мощности (1 ... 2 МВт). Многосту-

го типа требуют некоторого экспериментального подбора размеров диаметра d_2 и высоты h_2 [5].

Вращающиеся сочленения. Предназначены для передачи СВЧ энергии при круговом вращении подвижных частей в трактах РЭА без нарушения электрического контакта и качества согласования. Характеризуются следующими основными электрическими и механическими параметрами: рабочим диапазоном частот, %, $\Delta\nu/\nu_{ср} = (\nu_{max} - \nu_{min})/\nu_{ср} \cdot 100$; коэффициентом стоячей волны по напряжению КСВН; девиацией КСВН при повороте на 360° ; $\Delta\text{КСВН} = \text{КСВН}_{max}/\text{КСВН}_{min} - 1$; вносимыми потерями, дБ; электропрочностью, кВт; электрогерметичностью, дБ; максимальной скоростью вращения, мин^{-1} ; интервалом рабочих и предельных температур.

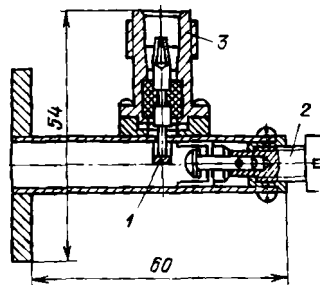


Рис. 7.68. Коаксиально-волноводный переход зондового типа: 1 — возбуждающий штырь; 2 — короткозамыкатель; 3 — коаксиальный волновод

пенчатые коаксиально-волноводные переходы обладают наибольшей полосой пропускания; конструкция перехода с чебышевским законом изменения ступенек при КСВН $\leq 1,3$ в полосе соответствующих волноводов показана на рис. 7.71. Переходы тако-

При выполнении вращающихся сочленений используют короткие отрезки коаксиального волновода с Т-волной или круглого волновода с волной E_{01} . Основные типы устройств: коаксиальные, волноводно-коаксиальные и волноводные [24].

Коаксиальные сочленения делятся на контактные (с трущимися контактами) и бесконтактные (с дроссельными канавками). Контактные конструкции [11] обеспечивают работу в широком диапазоне частот, на низком и среднем уровнях мощности, при частотах вращения менее 60 об/мин. Для повышения износоустойчивости трущиеся детали изготавливают из бериллиевой меди или фосфористой бронзы; переходное сопротивление контакта должно быть не выше 0,03 Ом. Бесконтактные устройства (рис. 7.72) более износоустойчивы, могут работать при частотах вращения до 3000 мин^{-1} ; обеспечивают по уровню КСВН $\leq 1,1$ рабочую полосу частот до 50%. Зазор между проводниками дроссельной линии выбирают в пределах 0,5 ... 2 мм; отношение диаметров D/d ; для получения максимальной пропускательной способности 2,72; для получения минимальных потерь 3,6. Расчет величины входного КБВ сочленения рис. 7.72 при идеальном согласовании на его выходе ведется по формуле [4]

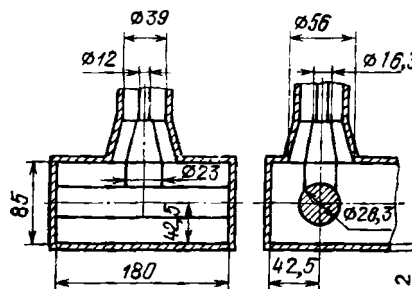


Рис. 7.69. Коаксиально-волноводный переход с поперечным стержнем

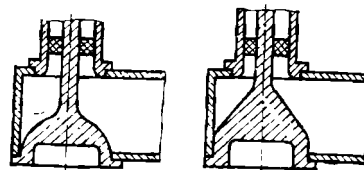


Рис. 7.70. Коаксиально-волноводные переходы пугоничного типа

$$\text{КБВ} \approx 1,59 Z_0^{-1} (\Delta\nu \nu^{-1}) \times \times [Z_2 (1 + Z_2 Z_1^{-1}) - - Z_4 (1 + Z_4 Z_3^{-1})]$$

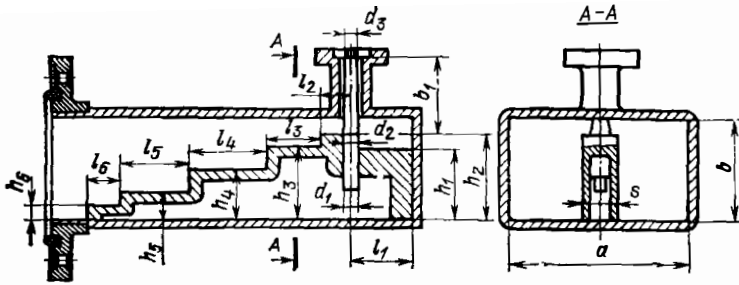


Рис. 7.71. Конструкция и размеры, мм, многоступенчатых коаксиально волноводных переходов

Сечение волновода $a \times b$	Коакс. линия $Z_0, \Omega \cdot \text{м}$	s	b_1	d_1	d_2	d_3	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
110×55	75	27.5	27.1	5.0	6.8	4.6	44.6	20.3	40.6	42.1	45.4	49.7	55.0	45.9	43.2	36.0	23.1	9.6
110×55	50	27.5	24.6	5.0	7.7	7.0	44.0	20.0	40.6	42.5	46.2	50.5	38.0	48.4	42.7	33.5	20.8	8.3
90×45	75	22.5	25.4	5.0	5.9	4.6	30.0	13.0	26.3	27.1	28.2	29.4	25.0	37.6	32.2	24.8	16.0	6.8
90×45	50	22.5	23.3	5.0	7.4	7.0	27.8	12.8	26.0	26.7	27.9	29.3	30.0	39.7	35.6	28.6	18.3	7.9
72×34	75	18.0	23.5	5.0	5.5	4.6	20.5	13.4	27.4	28.7	30.9	33.3	20.0	28.5	23.6	18.2	12.1	4.8
72×34	50	18.0	22.2	5.0	7.0	7.0	26.5	13.5	26.6	27.8	30.7	33.1	25.2	29.8	26.9	23.8	13.2	5.3

(Δv — относительное изменение частоты v ; Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 — волновые сопротивления подводящего коаксиального волновода и коаксиальных зазоров). Для уменьшения отраже-

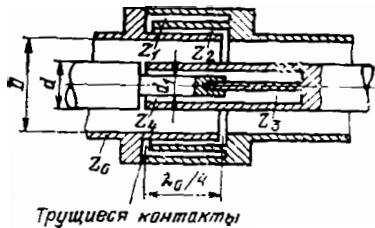


Рис. 7.72. Эскиз коаксиального дроссельного вращающегося сочленения

ний в сочленении необходимо снизить волновые сопротивления проходных канавок дросселей Z_2 и Z_4 и увеличивать волновые сопротивления короткозамкнутых канавок Z_1 и Z_3 . Величина максимальной передаваемой

мощности рассчитывается по формуле

$$P_{max} = P_0 d_1^2 d^{-2} Z_4^2 Z_3^{-2}$$

(P_0 — максимальная пропускаемая мощность подводящего коаксиального волновода). Пример конструкции бесконтактного коаксиального вращающегося сочленения показан на рис. 7.73.

Вращающиеся сочленения с прямоугольными волноводными выходами включают либо отрезок коаксиального волновода с Т-волной (см. рис. 7.72), либо отрезок круглого волновода с волной E_{01} и два согласованных преобразователя типов волн для перехода к прямоугольным волноводам с волной H_{10} . Контакт между вращающимися частями выполняется скользящим или дроссельного типа. В зависимости от взаимного расположения волноводных выходов изготавливают конструкции с параллельно, перпендикулярно и линейно располо-

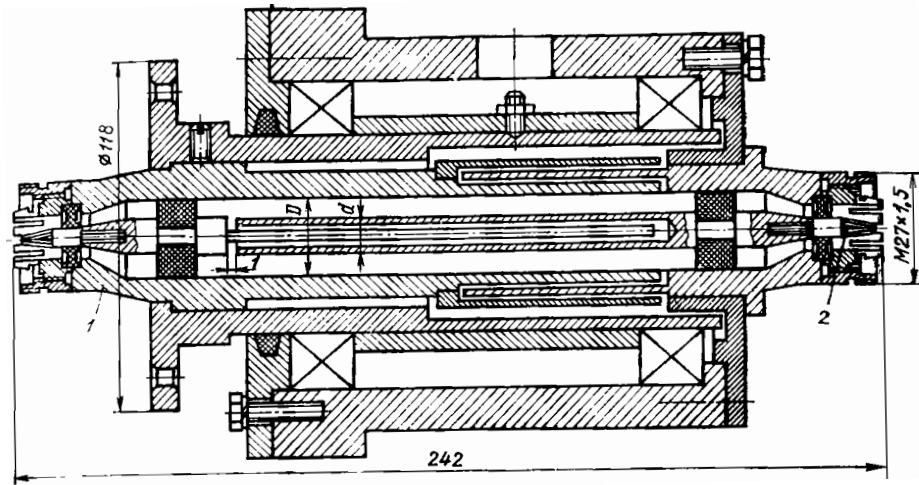


Рис. 7.73. Конструкция коаксиального вращающегося сочленения с дроссельной связью: 1 — внешний проводник; 2 — внутренний проводник

женными выходами (рис. 7.74); рекомендуемые габаритные размеры даны в табл. 7.26. В зависимости от рабочего диапазона частот различают три класса вращающихся волноводных сочленений: 1) $\Delta v/v_{ср}$ от 0 до 5%, КСВН $\leq 1,15$; 2) $\Delta v/v_{ср}$ от 5 до 15%, КСВН $\leq 1,25$; 3) $\Delta v/v_{ср}$ от 15 до 40%, КСВН $\leq 1,5$; для каждого класса величина девиации КСВН не более 0,05; вносимые потери не более 0,3 дБ; электрогерметичность не менее 50 дБ. Пример конструкции широкополосного волноводно-коаксиального вращающегося сочленения на прямоугольных волноводах сечением 72×34 мм приведен на рис. 7.75. **Волноводные согласованные поглощающие нагрузки.** Предназначены для поглощения СВЧ энергии и обес-

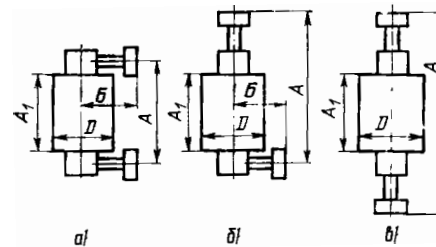


Рис. 7.74. Типы волноводных вращающихся сочленений с выходами, расположенными: а — параллельно; б — перпендикулярно; в — линейно

Таблица 7.26

Рекомендуемые габаритные размеры волноводных вращающихся сочленений (рис. 7.74)

Сечение при прямоугольном волноводе, мм	Габаритные размеры, мм, не более					
	А			Б	А ₁	D
	а)	б)	в)			
7,2×3,4	30	50	70	40	25	70
11,0×5,5	40	60	80	40	30	70
16,0×8,0	45	70	90	45	40	70
23,0×10,0	80	90	100	60	60	80
28,5×12,6	80	90	100	60	60	80
35,0×15,0	100	110	120	90	80	120
48,0×24,0	140	130	200	100	90	140
58,0×25,0	170	140	250	110	100	160
72,0×34,0	200	160	300	140	100	180
90,0×45,0	220	180	350	150	120	200

печивают при минимальном уровне КСВН в заданном диапазоне частот рассеяние определенного уровня мощности — низкого (до 10 Вт) или высокого (до десятков кВт). Конструктивно выполняются в виде короткозамкнутого на одном конце отрезка волновода с расположенным внутри поглощающим элементом. Различают согласованные нагрузки с поверхностным и объемным поглощающими сопротивлениями.

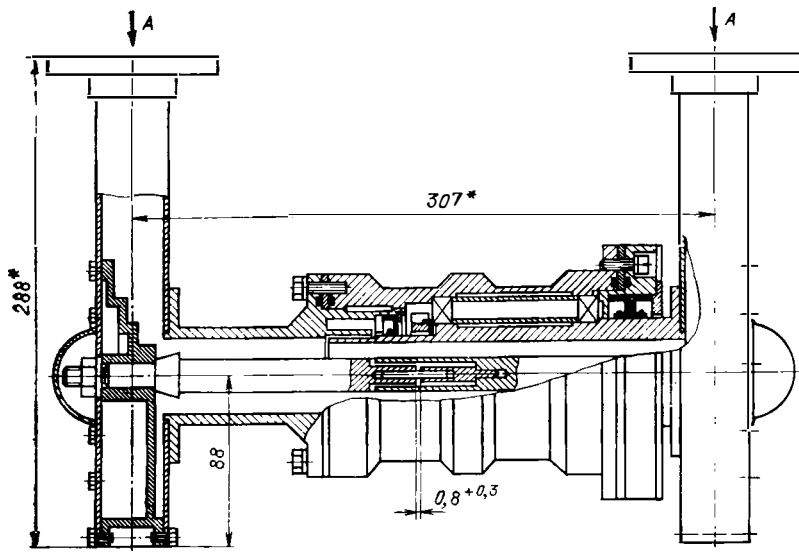


Рис. 7.75. Конструкция волноводно-коаксиального вращающегося сочленения

Согласованные нагрузки с поверхностным сопротивлением применяются для рассеяния низкого уровня мощности; в качестве поглощающего элемента используются тонкие клинообразные диэлектрические пластины (керамика, стекло, гетинакс, слюда, текстолит), покрытые тонкой пленкой материала с высоким удельным сопротивлением (нихром, лакосажевые суспензии) и расположенные параллельно электрическому полюсу линии поля. Клинообразная форма пластин обеспечивает низкий уровень КСВН и равномерный нагрев по длине, что исключает возникновение деформаций. Снижение габаритов достигается использованием двух скле-

енных пластин разной длины [2]. Согласованные нагрузки с объемным сопротивлением применяются для рассеяния низкого и высокого уровней мощности. Пример конструкции волноводной согласованной нагрузки показан на рис. 7.76. Общие вопросы компоновки волноводных трактов [6, 7]. Компоновка сложных СВЧ трактов требует использования вспомогательных элементов (отрезки линий, повороты, скрутки, переходы и т. д.), введение которых приводит к ухудшению электрических характеристик системы. Задачей конструктора является разработка геометрии вспомогательных

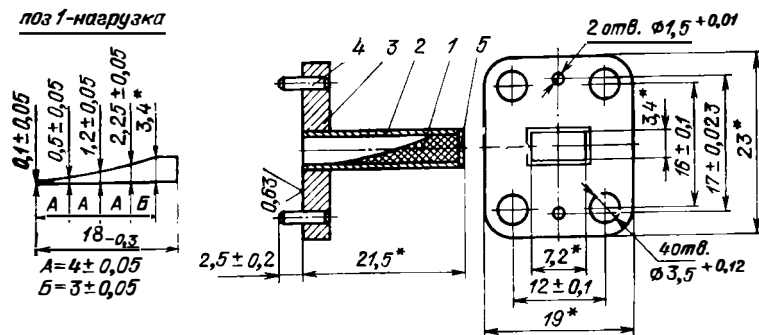


Рис. 7.76. Оконечная согласованная нагрузка на прямоугольном волноводе: 1 — поглощающая нагрузка; 2 — волновод; 3 — фланец; 4 — штифты; 5 — заглушка

элементов и компоновки тракта в заданном объеме так, чтобы отклонения собственных и выходных характеристик системы укладывались в заданные нормы. Одной из важнейших является задача оптимизации волноводных трактов по критерию минимальных суммарных потерь, величина которых зависит от числа фланцеводроссельных соединений, поворотов, скруток и переходов. Число, крутизна скруток и радиусы поворотов определяются конкретными требованиями к компоновке тракта. Не всегда уменьшение суммарной длины тракта и числа фланцевых соединений обеспечивает минимальное значение суммарных потерь. Например, при малых радиусах изгиба, несмотря на сокращение абсолютной длины, потери в таком соединительном элементе возрастают из-за ухудшения качества токонесущих поверхностей и искажения формы поперечного сечения. Расчет дополнительных потерь от радиуса изгиба волновода $\alpha_1(R_{изг})$ и

в качестве соединительных элементов. Наименьшей механической жесткостью обладают изгибы волноводов в плоскости Е. Рекомендуемые формы волноводных изгибов приведены на рис. 7.78; изгибы вида а, б рекомендуются применять для соединения волноводов под углом 90° ; вида в, г — для

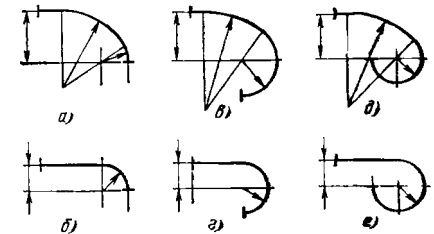


Рис. 7.78. Формы волноводных изгибов, обеспечивающие компенсацию ошибок монтажа волноводного тракта

сопряжения волноводных каналов, фланцы которых расположены под углом 180° ; вида д, е — при значительном разбросе по длине соединяемых элементов и узлов. При компоновке волноводных трактов следует применять стандартные или нормализованные соединительные элементы; для уменьшения числа фланцевых соединений рекомендуется использовать монолитные изгибы простейших форм.

7.7. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА НА ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДАХ [14, 17, 18]

Полосковые волноводы обладают всеми преимуществами печатных схем (малые масса и габариты, простая технология, низкая стоимость) и позволяют создавать элементы и узлы СВЧ тракта по своим параметрам, аналогичные волноводным и коаксиальным устройствам.

Опорные и согласующие элементы. Основные способы крепления центрального проводника ПВ показаны на рис. 7.79. Пластинастые ПВ наиболее просты и удобны при массовом производстве печатными методами, но обладают сравнительно высокими потерями в диэлектрике. Центральный проводник ПВ с диэлектрическими опорами (рис. 7.79,г) имеет вырезы в местах опор для выравнивания волнового сопротивления. Такие ПВ

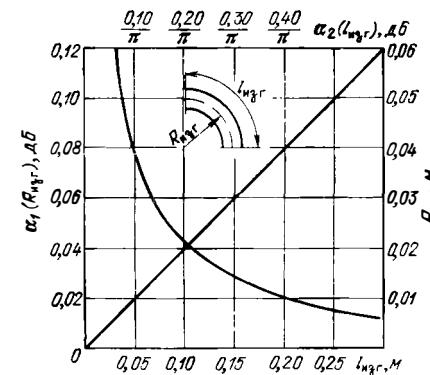


Рис. 7.77. Зависимости дополнительных потерь $\alpha_1(R_{изг})$ и $\alpha_2(l_{изг})$ изогнутого волноводного тракта

потерь от длины изгиба $\alpha_2(l_{изг})$ проводится по графикам рис. 7.77; суммарные потери в таком элементе равны $\alpha_1 + \alpha_2$.

Монтаж СВЧ тракта на жестком основании и температурные воздействия вызывают механические деформации, что приводит к росту суммарных активных потерь и падению электрогерметичности тракта. Для исключения этих явлений в конструкцию тракта вводят специальные волноводные изгибы — компенсаторы, которые одновременно используются

обладают наименьшими возможными потерями. Толщина опорного диэлектрического листа (рис. 7.79,в) выбирается из условий механической прочности (2...5 мм). ПВ с диэлектрическими опорами и опорным диэлектрическим листом рекомендуется использовать в устройствах с высокой добротностью (резонаторы, резонанс-

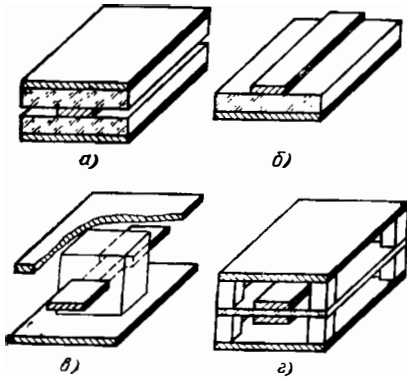


Рис. 7.79. Опорные элементы в ПВ: а — диэлектрические пластины в СПВ; б — НПВ с одной диэлектрической пластиной; в — СПВ с диэлектрическими опорами; г — СПВ с опорным диэлектрическим листом

ные элементы), с малой массой или при передаче импульсных сигналов большой мощности. Выбор диэлектрика для опор в ПВ определяется требованиями, предъявляемыми к устройству, в котором используется ПВ.

В качестве опорных СВЧ диэлектриков наиболее часто используются

полистирол, полиэтилен, фторопласт. Технологические допуски на размеры ПВ (δb, δh) определяются допустимой величиной коэффициента отражения $|\Gamma_{max}| = b(b+h)^{-1}(\delta h h^{-1} - \delta b b^{-1})$. Для согласования ПВ с произвольной нагрузкой применяются параллельные (см. табл. 7.28,е) (разомкнутые или замкнутые на конце) и последовательные (см. табл. 7.27,г и 7.28,ж) шлейфы, двухшлейфовые (разнесенные на $0,125\lambda$) и трехшлейфовые (разнесенные на $0,25\lambda$) трансформаторы, согласующие плавные переходы от b_1 к b_2 длиной $L = (5...20)b_2$, где $b_2 < b_1$.

Соединения, изгибы, разветвления. При соединении двух СПВ допустимый относительный сдвиг центральных проводников $0,1b$. В месте соединения СПВ из-за возникшей неоднородности могут возбуждаться высшие типы волн. Их можно подавить при помощи металлических штырей, перпендикулярных плоскости СПВ и размещенных по обе стороны от проводящей пластины. Роль этих штырей, как правило, выполняют крепежные винты. Проводники открытых ПВ соединяются методом термокомпрессии перемычками из металлической ленты.

Возможные типы поворотов под углом $\alpha = 90^\circ$ в плоскости центрального проводника (плоскость Н): со срезанной вершиной (КСВН $\leq 1,04$), с закругленной вершиной (КСВН $\leq 1,08$), плавный (КСВН $\leq 1,2$), прямоугольный (КСВН ≤ 2); при $\alpha \leq 30^\circ$ изгиб не вносит заметных отражений. Изгибы в плоскости, перпендикулярной центральному проводнику (плос-

кость Е), при малой толщине ПВ по сравнению с шириной не вносят заметных отражений и используются для уменьшения габаритов протя-

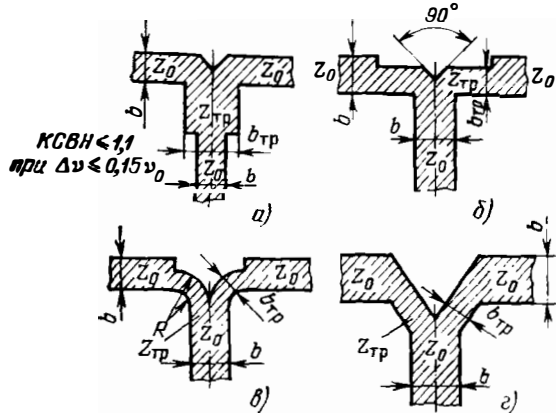


Рис. 7.80. Т- и Y-образные разветвления полоскового волновода

женных устройств путем свертывания их в рулон (например, поглощающих нагрузок, фильтров).

Разветвления предназначены для деления СВЧ мощности между несколькими каналами. Схемы Т- и Y-образных разветвлений приведены на рис. 7.80. Для согласования используются четвертьволновые трансформаторы, включаемые до разветвления (рис. 7.80,а $Z_{тр} = 0,707 Z_0$) или после него (рис. 7.80,б, в, г $Z_{тр} = 1,414 Z_0$). На рис. 7.81 приведены

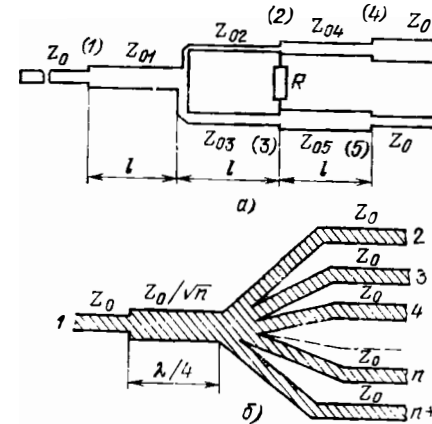


Рис. 7.81. Сумматоры — делители мощности на полосковом волноводе: а — двухканальный; б — многоканальный

другие схемы разветвлений. Параметры схемы рис. 7.81, а определяются по формулам [18]: $Z_{01} = Z_0 n^{0,25} \times (1+n^2)^{-0,25}$; $Z_{02} = Z_0 n^{0,75} (1+n^2)^{0,25}$; $Z_{03} = Z_0 n^{-1,25} (1+n^2)^{0,25}$; $Z_{04} = Z_0 n^{0,5}$; $Z_{05} = Z_0 n^{-0,5}$; $R = Z_0 (1+n^2) n^{-1}$; $n = P_3 P_2^{-1}$; $l = 0,25 \lambda_0 \epsilon_3^{-0,5}$, где P_2, P_3 — мощности на выходах 2 и 3. Развязка между входными каналами схемы рис. 7.81,б равна $-10 \lg [(1-n^{-2}) \times (2n-1)^{-1}]$.

Простейшие элементы полосковых волноводов. Основные типы конденсаторов и индуктивных элементов на ПВ и формулы для их расчета приведены соответственно в табл. 7.27 и 7.28 [17]. Пересечение проводников в ПВ может иметь место при конструировании делителей мощности, мостовых устройств, индуктивностей. Пересечение ПВ обычно осуществляется при помощи перемычек или многослойных структур (металл — диэлектрик — металл).

Полосковые переходы. Предназначены для соединения ПВ с коаксиальными и прямоугольными волноводами. Основной параметр — КСВН на входе в рабочей полосе частот.

Коаксиально-полосковые переходы (КПП) делятся на торцевые (оси обеих линий совпадают или параллельны) и перпендикулярные (оси соединяемых линий перпендикулярны). Торцевое соединение коаксиального волновода с ПВ можно выполнить с помощью прямого кабельного ввода (непосредственное соединение внутреннего проводника коаксиального кабеля с полосковым проводником) или через КПП. Прямой кабельный ввод имеет недостаточную механическую прочность и чаще всего применяется в экспериментальных конструкциях. Основные рекомендованные размеры соединителей устанавливают: ГОСТ 13317—73. Соединители радиочастотные радиоизмерительные. Присоединительные размеры; ГОСТ 20265—74. Соединители радиочастотные общего применения. Присоединительные размеры.

КПП — наиболее распространенный тип соединения коаксиального волновода с ПВ. КПП соединяется с полосковым проводником пайкой, сваркой или механическим прижимом, а к полосковому узлу крепится при помощи фланца, сухаря, цилиндрической конструкции под впайвание и т. п. На рис. 7.82, 7.83 приведены

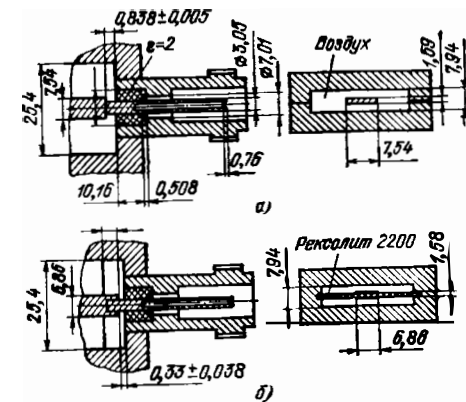
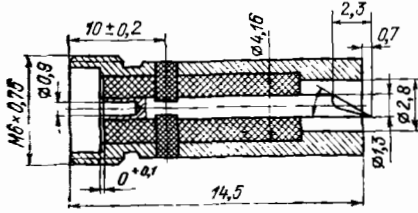
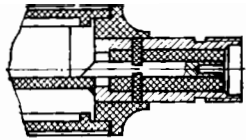


Рис. 7.82. Коаксиально-полосковые переходы: а — на СПВ с воздушным заполнением ($v = 3...11$ ГГц, КСВН $\leq 1,05$); б — на ВПВ ($v = 3...11$ ГГц, размер выступа $3,775$ мм, КСВН $\leq 1,05$)



конструкции КПП на различные типы ПВ.

Параллельные волноводно-полосковые переходы (ВПП) изображены на рис. 7.84, перпендикулярные — на рис. 7.85. Методика расчета ВПП некоторых типов приведена в [13].

Кольцевые мосты (рис. 7.86) представляют собой направленные восьмиполосники; характеризуются в рабочей полосе частот КСВН, величиной

Рис. 7.83. Малогабаритный КПП с иглощитым выводом к полоску (ν до 10 ГГц, КСВН < 1,2)

Таблица 7.27

Основные типы конденсаторов на полосковых волноводах

Последовательные емкости	Параллельная и сосредоточенные емкости
<p>a) $C = 88,5 \text{ eblh}^{-1}$</p>	<p>a) $Z_1 \ll Z_0$ $l < \frac{\lambda}{8}$ $C = 3333 Z_1^{-1} \text{e}_3^{0,5} l$</p>
<p>b) $C = 88,5 \text{ eblh}^{-1}$</p>	<p>b) $C = 26,53 \text{ eblh}^{-1} + 3333 [Z_0(b, h, l) \times Z_0^{-2}(b, h, \text{e}) + b Z_0(l, h, l) \times Z_0^{-2}(l, h, \text{e})]$</p>
<p>a) $C = b(e + 1) [10,86(n - 1) \times h^{-0,189} t^{0,439} s^{-0,25} + 6,85(1 + st^{-2})^{-2}(2n - 1)^{-1} + 3,61];$ n — число секций</p>	<p>e) $C = \text{e}_3 r_0 [27,78 r_0 h^{-1} + 40,72 \lg(1,571 r_0 h^{-1}) + 31,35]$</p>

C, пФ; все длины, м

Таблица 7.28
Основные типы индуктивных элементов на полосковых волноводах

Сосредоточенные и петлевые индуктивности	Параллельная, последовательная и спиральные индуктивности
<p>a) $L = 10^{-9} l [460,5 \lg \{l(b+t)^{-1} + 44,8 l^{-1}(b+t) + 238,6\} + Q = 12,57 k R_s^{-1} l^{-1}(b+t) \nu L; k=0,5...0,8; \nu, \text{ ГГц}; R_s, \text{ Ом} \text{ (табл. 7.18)}$</p>	<p>e) $L = 0,531 \cdot 10^{-9} \lambda \lg(6,28 l \lambda^{-1}); l < 0,125 \lambda$</p>
<p>b) $L = 10^{-9} l [460,5 \lg (ld^{-1}) + 772]; Q = 2,39 \cdot 10^{12} d l^{-1} (\nu \rho_{Cu} \rho^{-1})^{0,5} L; \nu, \text{ ГГц}; \rho_{Cu}, \rho, \text{ Ом} \cdot \text{м} \text{ (табл. 7.18)}$</p>	<p>ж) $L = 3,333 \cdot 10^{-9} Z_1 l \text{e}_3^{0,5}; Z_0 \ll Z_1; l < 0,125 \lambda$</p>
<p>a) $L = 10^{-6} (b + 2r) \{1,447 \lg [6,28 (b + 2r) (b+t)^{-1} - 1,540]\}$</p>	<p>з) $L = 6,29 \cdot 10^{-6} n^2 (r_1 + r_2)^2 (13r_2 - 7r_1)^{-1}; Q = 2 \cdot 10^6 \nu^{0,5} n b (r_1 + r_2) (15r_2 - 7r_1)^{-1}; n$ — число витков; ν, ГГц</p>
<p>a) $L = 10^{-6} l \{0,4605 \lg [2l(b+t)^{-1}] - 0,5706\}$</p>	<p>и) $L = 0,27 \cdot 10^{-6} l^{2,667} b^{1,667} \times (1 + sb^{-1})^{-1,667}; Q = 1,6 \cdot 10^6 \nu^{0,5} n b (r_1 + r_2) \times (15r_2 - 7r_1)^{-1}; n$ — число витков; ν, ГГц</p>
<p>d) $L = 10^{-6} l \{0,4605 \lg [2l(b+t)^{-1}] - 0,6394\}$</p>	

L, Гн; все длины, м

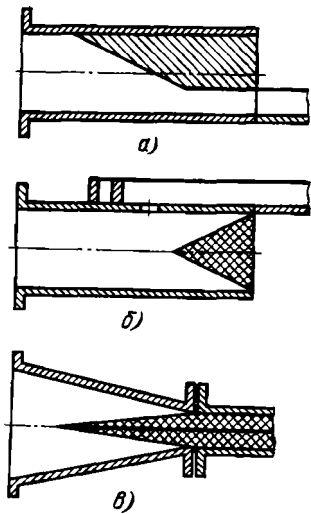


Рис. 7.84. Параллельные ВПП: а — с металлическим гребнем; б — с согласованной нагрузкой; в — соосный

связи между двумя несопряженными плечами (плечи 2—4, 2—3) и изолирующей сопряженных плеч (плечи 2—1). Расчет параметров и конструктивных размеров кольцевых мостов [13].

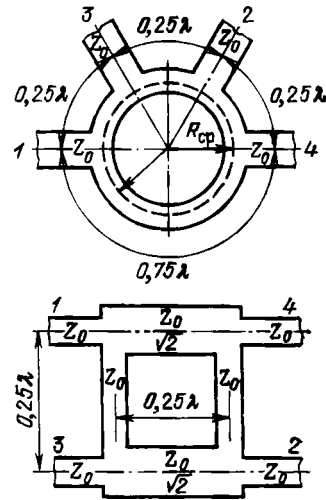


Рис. 7.86. Схемы кольцевых мостов (в верхней схеме $R_{cp} = Z_0\sqrt{2}$)

При заданных $h, t, \lambda_{cp}, \epsilon$ определяется затухание βl (дБ) в четвертьволновых отрезках для НПВ и СПВ (рис. 7.87). Рассчитываются: величина изоляции $L_{21} \approx 20 \lg [12 + 2,828(\beta l)^{-1}]$; величина связи $L_{24} \approx 20 \lg (1,414 + 3\beta l)$;

$$K_{стV} = (1 + 5,66\beta l)(1 + 2,83\beta l)^{-1};$$

средняя длина волны в ПВ $\lambda_{cp} = \lambda_0 \epsilon_0^{-0,5}$ (для СПВ $\epsilon_0 = \epsilon$); радиус кольца $R = 0,239 \lambda_{cp}$; волновое сопротивление кольца $Z_k = 1,414 Z_0$; ширина токонесящих проводников b . Из конструктивных соображений в диапазоне $\lambda_{cp} \leq 3$ см длина средней окружности выбирается равной $1,5 n \lambda_{cp}$ ($n = 2, 3, \dots$), или все участки моста (или любые два смежных участка) удлиняются на $0,25 n \lambda_{cp}$ ($n = 1, 2, \dots$).

Для расширения рабочей полосы частот участок моста длиной $0,75 \lambda_{cp}$ заменяют участком длиной $0,25 \lambda_{cp}$ с фазопроклидывающим устройством (рис. 7.88). Конструктивные размеры его на СПВ (рис. 7.88,а) подбираются экспериментально, а на связанных

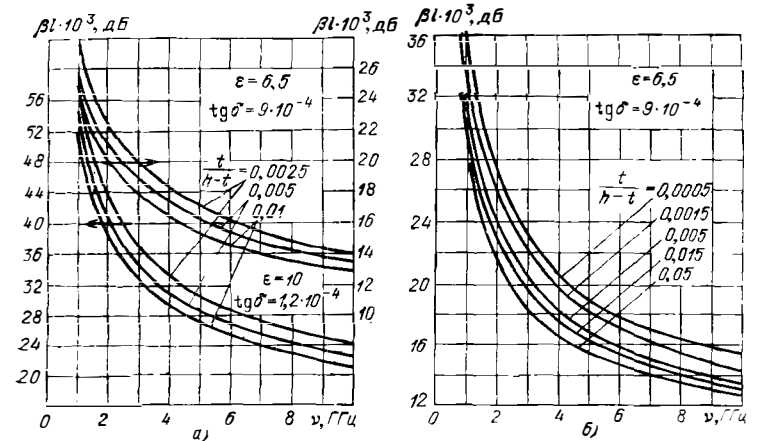


Рис. 7.87. Зависимости затухания в четвертьволновых отрезках НПВ (а) и СПВ (б) с медными проводниками и $Z_0 = 50$ Ом

ПВ (рис. 7.88,б) — по методике расчета связанных ПВ. Кольцевые мосты на НПВ необходимо экранировать на высоте $\geq 10h$. Кольцевые мосты используются в делителях и сумматорах мощности генераторов, усилителей, преобразователях, модуляторах [13, 14]. Кольцевой мост при подаче мощности в плечо 1 делит ее поровну между плечами 2 и 4 (при равных нагрузках), плечо 3 развязано; рабочая полоса частот примерно 6% ν_{cp} . При подаче равных мощностей двух генераторов соответственно в

отбора части СВЧ мощности из основного канала в дополнительный. Одно из плеч дополнительного канала развязано. В двух других плечах входная мощность делится в соответствии с величиной связи. Выполняются на прямоугоньных, коаксиальных и полосковых волноводах. Параметры: рабочее затухание $C_{12} = 10 \lg P_1 P^{-1}_2$, дБ; переходное ослабление (связь) $C_{13} = 10 \lg P_1 P^{-1}_3$, дБ; коэффициент деления мощности $C_{23} = 10 \lg P_2 P^{-1}_3 = C_{13} - C_{12}$, дБ; развязка $C_{14} = 10 \lg P_1 P^{-1}_4$, дБ; направленность $C_{34} = 10 \lg P_3 P^{-1}_4$, дБ; $\Delta \nu$ — рабочая полоса частот, в пределах которой неравномерность (отклонение от среднего значения) ΔC_{13} или ΔC_{34} не превышает заданной величины. По величине связи делятся: НО с сильной связью ($C_{13} < 10$ дБ); НО со слабой связью ($C_{13} > 10$ дБ); различают НО с боковой связью (рис. 7.89), с емкостной связью (см. рис. 7.23), со связью шлейфного типа (рис. 7.90). При расчетах НО задаются типом ПВ, величинами $\Delta C_{13}, C_{13}, \nu_0, Z_0, \epsilon, h$ и коэффициентами рассогласования в плечах $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$.

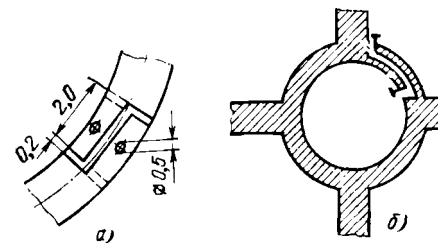


Рис. 7.88. Фазопроклидывающее устройство на кольцевом мосте: а — на НПВ и СПВ; б — на связанных ПВ

развязанные плечи 1 и 2 мощность суммируется в плечо 3; плечо 4 нагружено на балластное сопротивление.

Направленные ответвители — взаимные устройства для направленного

Расчет НО с боковой связью (рис. 7.89) [5]. По заданному C_{13} определяется амплитудный коэффициент связи k : $C_{13} = -20 \lg k$; вычисляются характеристические сопротивления для четного и нечетного типов колебаний $Z_{0c} = Z_0(1+k)^{0,5}(1-k)^{-0,5}$; $Z_{0o} = Z_0(1-k)^{0,5}(1+k)^{-0,5}$; вычисляют

Рис. 7.85. Перпендикулярные (зондовые) ВПП: а — ВПП на СПВ и топология его полоска; б — ВПП на НПВ

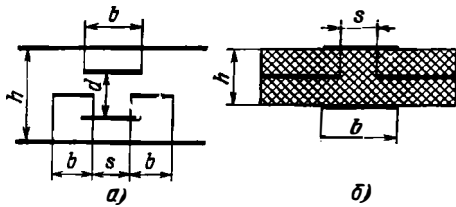


Рис. 7.89. Полосковые НО со слабой электромагнитной связью: а — со связью через диафрагму на СПВ; б — со связью через диафрагму на НПВ

размеры $h^{-1}s$, bh^{-1} ; для рис. 7.23 при $b \geq 0,35s$ и $b \geq 0,35(h-s)$:

$$h^{-1}s = 0,733 \lg \{ \text{cth} [296 k e^{-0,5} Z_0^{-1} \times (1 - k^2)^{-0,5}] \};$$

$$bh^{-1} = 94,25 e^{-0,5} Z_0^{-1} - 0,366 \lg \{ 2 [1 + \exp(-296 k \times e^{-0,5} Z_0^{-1} (1 - k^2)^{-0,5})] \};$$

для рис. 7.89,а при $b \geq 0,15h$:

$$h^{-1}s = 0,318 \text{ arch} \{ \exp[296 e^{-0,5} \times (Z_0^{-1} - Z_0^{-1})] \};$$

$$bh^{-1} = 47,1 e^{-0,5} Z_0^{-1} - 0,2203;$$

для рис. 7.89,б при $b \geq 0,35h$:

$$h^{-1}s = 0,637 \text{ arch} \{ \exp[296 e_3^{-0,5} \times (Z_0^{-1} - Z_0^{-1})] \};$$

$$bh^{-1} = 157,1 Z_0^{-1} e_3^{-0,5} - 0,5.$$

Вычисляют частотные характеристики C_{13} и C_{12} :

$$C_{13} = 10 \lg \{ k^{-2} [1 + (1 - k^2) \times \text{ctg}^2(6,28 l \lambda^{-1})] \};$$

$$C_{12} = 10 \lg \{ (1 - k^2)^{-1} [1 - k^2 \times \cos^2(6,28 l \lambda^{-1})] \},$$

где $l = 0,25 \lambda_0 e_3^{-0,5}$.

Рассчитывается рабочая полоса частот по заданному ΔC_{13} : $\Delta v = 2(v_r - v_0)v_0^{-1} 100\%$; по допустимым Γ_2 , Γ_3 , Γ_4 определяют:

$$C_{13} = 20 \lg \{ [1 - \Gamma_3 k^2 + \Gamma_2 (1 - k^2)] k^{-1} (1 + \Gamma_3)^{-1} \};$$

$$\begin{aligned} \Delta C_{12} &= \Delta C_{13} = \\ &= 10 \lg \{ (8\alpha l Z_0 + Z_{0e} + Z_{0o}) \times \\ &\times (4\alpha l Z_0 + Z_{0e} + Z_{0o})^{-1} \}, \alpha l \leq 0,1; \\ C_{12} &= 20 \lg \{ [1 + \Gamma_3 k^2 + \Gamma_2 (1 - k^2)] \times \\ &\times (1 + \Gamma_2)^{-1} (1 - k^2)^{-0,5} \}; \\ C_{34} &= 20 \lg \{ (1 + \Gamma_3) (1 - \Gamma_3 \Gamma_4) \times \\ &\times (1 + \Gamma_4)^{-1} (\Gamma_2 + \Gamma_3)^{-1} (1 - k^2)^{-0,5} \}; \\ K_{\text{ст.У}} &= [1 + |k^2 (\Gamma_2 + \Gamma_3) - \Gamma_2|] \times \\ &\times [1 - |k^2 (\Gamma_2 + \Gamma_3) - \Gamma_2|]^{-1}. \end{aligned}$$

Расчет двухшлейфового НО (рис. 7.90) [13]. По заданному C_{13} опреде-

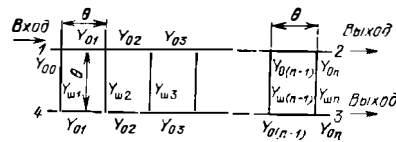


Рис. 7.90. Схема n-шлейфового направленного ответвителя

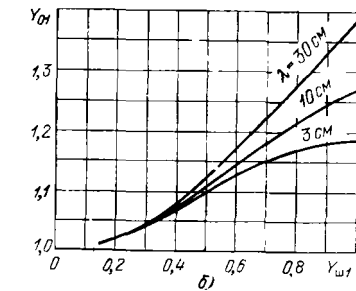
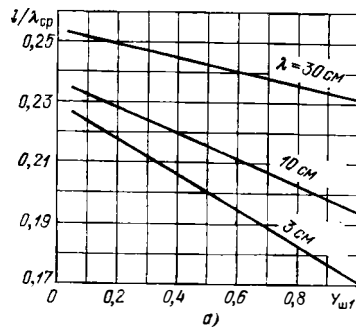


Рис. 7.91. Зависимости длины шлейфа НО от его проводимости (а) и графики коррекции нормированной проводимости шлейфов (б)

ляют $Y_{\text{ш1}} = Y_{\text{ш2}} = Y_{\text{ш}}; C_{13} = 10 \lg (Y_{\text{ш}^{-2}+1)$; вычисляют $Y_{01}^2 = 1 + Y_{\text{ш}}^2$; по рис. 7.91,а находят $l/\lambda_{\text{ср}}$, по рис. 7.91,б — скорректированное значение Y_{01} ; вычисляют $Z_{\text{ш}} = Z_0 Y_{\text{ш}}^{-1}$, $Z_{01} = Z_0 Y_{01}^{-1}$, $\lambda_{\text{ср}} = \lambda_0 e^{-0,5}$, $l = 0,25 \lambda_0 e^{-0,5}$. По полученным результатам определяют геометрические размеры подводящих ПВ, шлейфов и расстояние между шлейфами. Далее рассчитывают: $C_{12} = 20 \lg |Y_{01}|$; $C_{13} = 20 \lg |Y_{01} Y_{\text{ш}}^{-1}|$; $C_{23} = -20 \lg |Y_{\text{ш}}|$; $C_{34} = 20 \lg |\sin [1,571 (v_0 - v) v^{-1}]|$; $K_{\text{ст.У вх}} = (2 + |\Gamma_3 - \Gamma_2|) (2 - |\Gamma_3 - \Gamma_2|)^{-1}$; $C_{13} = 20 \lg |0,707 (2 + \Gamma_2 - \Gamma_3) (1 + \Gamma_3)^{-1}|$; $C_{12} = 20 \lg |0,707 (2 + \Gamma_2 - \Gamma_3) (1 + \Gamma_2)^{-1}|$; $C_{14} = 20 \lg |2 + \Gamma_2 - \Gamma_3| (1 + \Gamma_4)^{-1} (\Gamma_2 + \Gamma_3)^{-1}|$; $C_{23} = 20 \lg |1 + \Gamma_3| (1 + \Gamma_2)^{-1}|$.

Подробный расчет полосковых НО приведен в [13].

Полосковые излучатели. Основные излучающие элементы полосковых антенн — вибратор и щель. Для вибратора длиной $2l$: $Z_{\text{в}} = 276 \lg (3,14 l b^{-1}) - 120$, $\Delta l = -0,0968 l [\lg (0,5 \lambda b^{-1})]^{-1}$.

Для поперечной щели на СПВ активная составляющая $Z_{\text{вх}} Y = 1,698 Y_0 h (b + 0,44 h)^{-1} (2 l \lambda^{-1})^2 \times [1 - 0,374 (2 l \lambda^{-1})^2 + 0,130 (2 l \lambda^{-1})^4]$.

Обычно применяют резонансные щели с $R \approx 200$ Ом. Для изменения проводимости щели ее поворачивают на некоторый угол или смещают от-

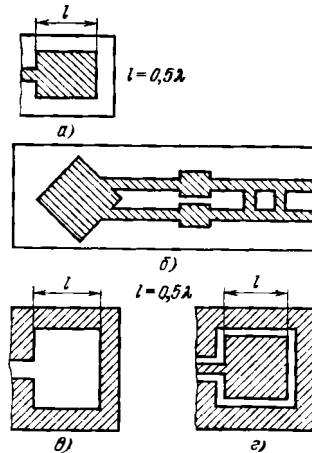


Рис. 7.92. Полосковые излучатели: а — с линейной поляризацией на НПВ; б — с круговой поляризацией на НПВ; в — с эллиптической поляризацией на ШПВ; г — на КПВ

носительно оси СПВ. Ширина щели 0,5...1 мм. На рис. 7.92 изображены вибраторные излучатели на ПВ других типов. Резонансная частота прямоугольного полоскового излучателя $\nu = 1,5 \cdot 10^8 l^{-1} e^{-0,5}$, Гц; круглого $\nu = 8,79 \cdot 10^8 r^{-1} e^{-0,5}$, Гц.

7.8. РАЗВЯЗЫВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА СВЧ [29]

Предназначены для устранения влияния нагрузочных цепей на режим генераторов, что необходимо для стабилизации их частоты ν и мощности P , и для регулировки P в измерительной РЭА.

Аттенуаторы — взаимные устройства, характеризуются определенной величиной L , дБ. Подразделяются на фиксированные и переменные, предельные и диссипативные. Выполняются на прямоугольных, круглых, коаксиальных и полосковых волноводах.

Предельные аттенуаторы с дисковыми элементами электрической связи (рис. 7.93,а) или с индуктивной

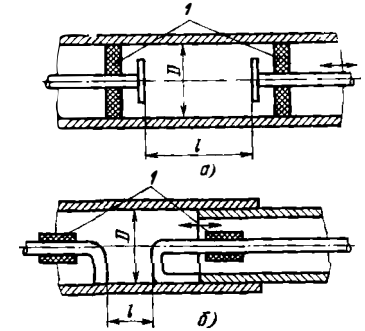


Рис. 7.93. Конструктивная схема предельного коаксиального аттенуатора с электрической связью (а) и магнитной связью (б); l — согласующие резисторы

связью (рис. 7.93,б) включают за пределами круглого волновода длиной l с волной E_{01} . Диаметр D выбирается из условия $\nu_{\text{кр}} > \nu_{\text{раб}}$. Длина волновода определяет ослабление: $L = (32 l / D) \sqrt{1 - 2,91 (D / \lambda)^2}$, при $D \ll \lambda$ шкала линейна. Для устранения реакции за пределами участка используют дисковые согласующие сопротивления из диэлектрика с большими потерями (l , рис. 7.93,а) или безындукционные резисторы в цент-

ральных проводниках коаксиальных волноводов (1, рис. 7.93,б). Начальное L предельных аттенуаторов за счет согласующих дисков или резисторов ≥ 15 дБ.

Диссипативные аттенуаторы с постоянным ослаблением выполняются в виде различных вкладышей в волноводы из радиопоглощающих материалов РПМ. Форма вкладышей выбирается из условия согласования. В переменных аттенуаторах на прямоугольных волноводах используются подвижные пластины с нанесенным слоем из РПМ (например, слой никрома с поверхностным сопротивлением $0,5 \dots 1,0$ кОм на стеклянной пластине). Форма пластин выбирается из условия согласования в заданной полосе ν и линейной зависимости L от хода пластины, при этом L регулируется от $0,5$ до $30 \dots 40$ дБ.

Расчет ослабления в переменных аттенуаторах: $L \approx 54,5 \text{ tg } \delta (l/\lambda) [1 - 0,25 (\lambda/a)^2 S/(ab)] \sin^2 (\pi x/a)$, дБ, где a, b — размеры широкой и узкой стенок волновода; S, l — площадь поперечного сечения и длина поглотителя; $0 \leq x \leq a/2$ — расстояние поглотителя от узкой стенки волновода; $e \text{ tg } \delta$ — параметры поглотителя (для воды на $\nu = 3$ ГГц $e \text{ tg } \delta \approx 12$).

В диссипативных переменных аттенуаторах на коаксиальных волноводах диэлектрическая пластина с поглощающим покрытием вводится по центру.

Переменные аттенуаторы на полосообразных волноводах выполняют, используя электрически управляемые СВЧ *pin*-диоды. Ослабление изменяется от 0 до 30 дБ при КСВН $\leq 1,5$ в полосе частот $\Delta\nu/\nu$ до 40% .

Ферритовые вентили [29] — взаимные четырехполюсники с малыми потерями в прямом направлении ($L_{пр}$, дБ) и большими в обратном ($L_{обр}$, дБ). Характеризуются величиной вентиляющего отношения $V = L_{обр}/L_{пр}$ и согласованием (КСВН) в полосе рабочих частот $\Delta\nu/\nu$.

Конструируются с использованием ферритовых вкладышей из нормализованных марок ферритов СВЧ [29] (табл. 7.29). В подмагниченном состоянии ферриты характеризуются тензорной магнитной проницаемостью

$$\underline{\mu} = \mu_0 \begin{pmatrix} \mu & -jk & 0 \\ +jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{pmatrix}$$

компоненты которой зависят от намагниченности M , частоты ν и подмагничивающего поля:

$$\mu = \mu' - j\mu'', \quad k = k' - jk'', \quad \mu_z \approx 1, \\ \mu' \approx 1 + p\sigma/(\sigma^2 - 1),$$

$$k' \approx -p/(\sigma^2 - 1),$$

$$\mu'' \approx \delta p (\sigma^2 + 1)/(\sigma^2 - 1)^2 + 4\sigma^2 \delta^2/(1 + \delta^2),$$

$$k'' \approx -(2\delta p \sigma/\sqrt{1 + \delta^2})/(\sigma^2 - 1)^2 + 4\sigma^2 \delta^2/(1 + \delta^2).$$

Относительные намагничивающее поле $\sigma = \gamma H^i/\nu$ и намагниченность $p = \gamma M/\nu$ определяются гиромагнитным отношением электрона $\gamma \approx 35,2$ МГц/(кА·м⁻¹), или 2,8 МГц/Э, внутренним магнитным полем H^i и намагниченностью M или намагниченностью насыщения M_s , если материал насыщен, на рабочей частоте ν . Ферромагнитный резонанс (ФМР) наблюдается при $H^i_{рез} = \nu/\gamma$, т. е. $\sigma_{рез} = 1$. Ширина кривой поглощения ФМР по половинному уровню ΔH определяет значение фактора потерь $\delta = \gamma \Delta H/2\nu$. При ФМР $\mu''_{рез} = (1 + \delta^2)p/2\delta$, $k''_{рез} = -\sqrt{1 + \delta^2}p/2\delta$. Взаимные свойства феррита оцениваются отношением $k/\mu \approx -p/(\sigma^2 + p\sigma - 1)$. Если подмагничивание поперечно (H^i ортогонально направлению распространения СВЧ энергии), эффективная магнитная проницаемость $\mu_{\perp} = (\mu^2 - k^2)/\mu \approx 1 + p(\sigma + p)/(\sigma^2 + p\sigma - 1)$.

Применяют ферритовые вентили резонансные и на смещении поля.

Резонансные ферритовые вентили используют явление взаимного поглощения СВЧ энергии при ФМР в намагниченных ферритовых вкладышах, которое наблюдается при круговой поляризации СВЧ магнитного поля, если плоскость поляризации перпендикулярна намагничивающему полю H^i .

Резонансный ферритовый вентиль на прямоугольном волноводе. В таком волноводе с волной H_{10} СВЧ магнитное поле линейно поляризовано в центре и на узких стенках и вращается в противоположные стороны при смещении от центра в сторону одной или другой узкой стенки. Плоскость поляризации параллельна широкой стенке волновода, т. е. лежит в плоскости Н. Геометрические

место точек, где поляризация рассматриваемого поля чисто круговая, — две плоскости, параллельные узким стенкам и расположенные симметрично относительно продольной оси волновода. Расстояние этих плоскостей от центра волновода зависит от длины волны λ и размера широкой стенки волновода a :

$$t_0/a = \text{arctg} [\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}/\lambda/2a]/\pi.$$

В центре полосы пропускания волновода при $\lambda/a = \sqrt{2}$ $t_0 = 0,25a$.

В вентилях длинные ферритовые пластины располагают вдоль волновода так, чтобы центр пластины был удален на t_0 от центра волновода. Вкладыш ориентируют либо в плоскости Н (рис. 7.94,а), либо в плоскости Е (рис. 7.94,б). При работе на высоком уровне мощности используют вентиль в плоскости Н. Рассмотрим последовательность его приближенного расчета.

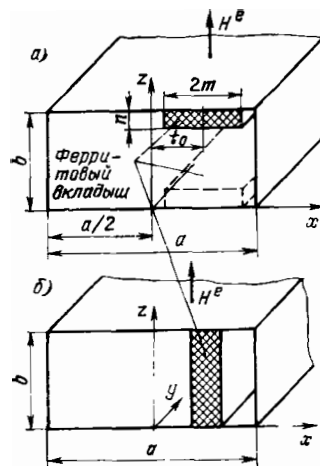


Рис. 7.94. Конструктивные схемы ферритового волноводного резонансного вентиля: а — ферритовый вкладыш в плоскости Н; б — ферритовый вкладыш в плоскости Е

1. Выбирают марку феррита по заданной λ (табл. 7.29), имея в виду, что первая цифра в обозначении марки — это средняя длина волны (см) диапазона, для которого разрабатывались ферриты данной марки. Для достижения высокого значения V и работоспособности на высоком уровне мощности ΔH должна быть малой, а θ_k большой, при этом на ми-

нимальной частоте диапазона ν_1 должно выполняться неравенство: $M_s \leq \nu_1/\gamma - H_a$, где H_a — поле анизотропии выбранной марки, считается ≈ 0 , если оно неизвестно.

2. Рассчитывают положение центра вкладыша t_0 по средней длине волны заданного рабочего диапазона и расстояние плоскостей с круговой поляризацией t_1 и t_2 от центра волновода на минимальной λ_1 и максимальной λ_2 длинах волн рабочего диапазона.

3. Выбирают размеры вкладышей, так, чтобы выполнялись следующие неравенства: $2m \leq (0,3 \dots 0,4)a$, но $2m > |t_1 - t_2|$. Толщина вкладыша $n \leq (0,05 \dots 0,1)b$ (и тем меньше, чем выше уровень мощности).

4. Определяют значение рабочего внутреннего магнитного поля по средней частоте ν заданного диапазона: $H^i = \nu/\gamma$. При этом относительное внутреннее поле $\sigma = 1$, и относительная намагниченность насыщения $p = \gamma M_s/\nu$. Рассчитывают для крайних частот диапазона $\sigma_{1,2} = \gamma H^i/\nu_{1,2}$ и $p_{1,2} = \gamma M_s/\nu_{1,2}$, а для средней частоты — фактор потерь δ . По этим величинам определяют соответствующие края диапазона значения $\mu''_{1,2}$ и $k''_{1,2}$.

5. Рассчитывают длину ферритовых пластин l_{Φ} . Для уменьшения общей длины вентиля в волноводе симметрично на противоположных широких стенках устанавливают две пластины. При этом заданное на краях рабочей полосы значение $L_{обр 1,2}$, дБ, определяет минимально допустимую длину вкладышей:

$$L_{обр 1,2} \approx 8,7 \frac{2n}{b} \frac{l_{\Phi}}{a} \frac{\sin 2\pi m/a}{\sin 2\pi t_{1,2}/a} \times \\ \times \left[\mu''_{1,2} \left(\frac{2\pi m/a}{\sin 2\pi m/a} - \cos \frac{2\pi t_{1,2}}{a} \cos \frac{2\pi t_0}{a} \right) - k''_{1,2} \sin \frac{2\pi t_{1,2}}{a} \sin \frac{2\pi t_0}{a} \right].$$

По этому же выражению рассчитывают прямые потери на краях полосы, сменив знак перед $k''_{1,2}$ на обратный.

6. В центре заданного диапазона $L_{обр} \approx 8,7 \frac{2n}{b} \frac{l_{\Phi}}{a} \frac{\sin 2\pi m/a}{\sin 2\pi t_0/a} \times$

Таблица 7.29

Параметры СВЧ ферритов

Марка феррита	M_r , кА/м	B_r , Тл	H_c , кА/м	μ_n	ϵ_ϕ	$\lg \delta \epsilon$	ΔH , кА/м	$\theta_{кр}$, °С	Плотность, г/см ³	λ_ϕ , Вт/м·К	ТКЛР $\times 10^{-3}$, К ⁻¹
I. Иттриевые ферриты — гранаты											
10С46	140	0,095	<0,08	100	14,8	<10 ⁻³	<4,8	280	5,0	6,7	9,05
30С43	96	0,065	<0,08	80	14,6	<10 ⁻³	<5,6	230	5,0	5,6	8,65
30С46	104	0,022	0,08	76	15,0	5·10 ⁻³	<8,0	280	5,3	6,0	6,95
30С49	80	—	0,056	75	14,5	<10 ⁻³	<4,8	210	—	—	—
40С42	62,5	0,034	0,08	44	14,2	<10 ⁻³	<4,8	195	4,9	4,5	7,45
40С44	72	0,024	0,16	31	15,5	1,7·10 ⁻³	<12,8	290	5,4	5,0	8,15
40С45	52	—	0,048	—	14,5	4·10 ⁻³	<4,8	175	—	—	—
50С41	48	—	—	—	14,7	2·10 ⁻⁴	2,1	180	—	—	—
60С4	37,6	0,032	0,08	30	14,0	4·10 ⁻⁴	3,2	150	4,8	4,2	6,70
80С4	28	0,009	0,08	20	13,5	<10 ⁻³	<4,8	120	4,9	4,6	—
90С4	18,8	—	—	—	13,0	3·10 ⁻³	<4,0	—	4,9	5,6	—
II. Никелевые ферриты — шпинели											
1С42	231	0,05	0,24	20	12,5	~10 ⁻³	22,3	400	4,5	~4	—
1С43	350	0,22	0,16	86	10,4	2,5·10 ⁻³	31,8	400	4,4	4	—
1С44	382	0,28	0,16	83	11,1	8,0·10 ⁻⁴	13,5	400	5,0	4	—
2С44	358	0,14	0,16	47	12,5	~10 ⁻³	9,6	450	4,9	4	—
3С416	271	—	—	—	12,7	—	8,8	—	—	4	—
4С49	255	0,104	0,32	27	11,0	<10 ⁻¹	22,3	450	5,1	4	—
4С410	175	0,042	0,32	22	12,4	~10 ⁻³	17,5	530	5,0	4	—
III. Магниеые ферриты — шпинели											
2С41	151	0,104	0,32	24	11,7	4·10 ⁻⁴	50,0	370	3,8	2,3	9,2
3С41	135	0,098	0,48	13	8,2	6,5·10 ⁻³	55,7	370	3,7	~4,0	7,9
3С47	135	0,103	0,24	23	12,3	6,0·10 ⁻⁴	14,3	330	4,1	3,0	9,65
3С415	167	0,130	0,16	12	13,0	8,0·10 ⁻⁴	37,4	360	4,5	~4,0	—
3С417	127	—	—	—	12,5	2,5·10 ⁻⁴	45,4	—	—	4,0	—
4С41	66,5	0,027	0,40	9	6,5	2,1·10 ⁻³	68,0	250	—	4,0	—
4С43	87,5	0,025	1,03	5	5,4	—	63,7	400	—	~4,0	—
4С44	135	0,078	0,28	18	10,5	1,2·10 ⁻³	39,8	310	3,5	4,0	—
4С411	175	0,168	0,16	20	9,5	3,0·10 ⁻³	23,9	320	4,2	4,0	—
IV. Ферроалюминаты и феррохромиты											
6С41	115,0	0,025	0,16	61	12,0	4·10 ⁻⁴	10,3	150	—	—	—
8С41	60,0	0,048	0,40	12	9,6	3·10 ⁻³	31,8	290	3,5	3,46	—
8С45	82,0	—	—	—	10,5	1,6·10 ⁻³	23,9	—	3,8	3,22	7,60
10С4	60,0	0,03	0,40	12	8,2	2·10 ⁻³	28,0	300	—	—	—
10С41	38,5	0,032	0,40	11	5,8	4·10 ⁻³	23,2	140	—	—	—
10С48	52,0	0,035	0,16	17	9,5	2,5·10 ⁻³	14,7	140	3,6	5,32	7,50
10С412	87,5	0,059	0,60	8	10,0	8·10 ⁻⁴	18,0	350	4,8	4,40	7,45
15С41	43,0	0,015	0,20	20	6,7	4,2·10 ⁻³	19,9	150	3,5	3,30	—
30С4	56,0	0,031	0,16	13	8,5	2,1·10 ⁻³	17,5	180	4,1	2,33	—
30С42	97,5	0,078	0,08	48	10,0	~10 ⁻²	12,7	140	—	—	—
40С4	70,0	0,025	0,08	40	10,2	2·10 ⁻³	7,2	100	5,0	4,44	—

Примечания: 1. B_r — остаточная индукция; H_c — коэрцитивная сила; μ_n — относительная начальная магнитная проницаемость; ϵ_ϕ — относительная диэлектрическая проницаемость; $\delta \epsilon$ — угол диэлектрических потерь; ΔH — ширина линии ФМР (для ферритов групп I и IV на $\nu=3$ ГГц, групп II и III — на $\nu=10$ ГГц); λ_ϕ — коэффициент теплопроводности; ТКЛР — температурный коэффициент линейного расширения.
2. Первая цифра марки — средняя длина рабочей волны, см, рекомендуемого диапазона.

$$\times \left[\mu_{рез} \left(\frac{2\pi m/a}{\sin 2\pi m/a} - \cos^2 2\pi t_0/a \right) - k_{рез}'' \sin^2 2\pi t_0/a \right],$$

вентильное отношение (без учета диэлектрических потерь)

$$B \approx \frac{\mu_{рез} \left(\frac{2\pi m/a}{\sin 2\pi m/a} - \cos^2 \frac{2\pi t_0}{a} \right) - \rightarrow}{\mu_{рез} \left(\frac{2\pi m/a}{\sin 2\pi m/a} - \cos^2 \frac{2\pi t_0}{a} \right) + \rightarrow} \rightarrow - k_{рез}'' \sin^2 2\pi t_0/a \rightarrow + k_{рез}'' \sin^2 2\pi t_0/a$$

а $L_{пр} = L_{обр}/B$.

7. Внешнее магнитное поле $H^e \approx H' + M_s$.

Для расширения полосы рабочих частот используют неоднородное по длине или ширине внешнее магнитное поле. Согласование достигается устройством на концах пластин клиновидных скосов. Улучшение характеристик наблюдается при введении диэлектрического активатора (рис. 7.95)

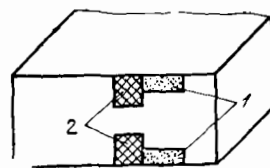


Рис. 7.95. Схема резонансного ферритового вентиль с улучшенными электрическими характеристиками: 1 — ферритовые пластины; 2 — диэлектрические активаторы

из материала с низким $\lg \delta$ и $\epsilon_d = 10 \dots 15$. Крепление вкладышей и активаторов при низких уровнях мощности производится клеями (например, ПДИ-ЗАК, БФ-4, К-400). Последний имеет повышенную теплопроводность. При высоких уровнях

мощности пластины часто припаиваются к стенкам волновода, охлаждаемым принудительно. Залуживание феррита производят мягкими припоями ультразвуковым способом или вжиганием серебряных паст. Для пайки с латунной, медной, алюминиевой арматурой толщиной менее 5 мм рекомендуют применять припой ПОИ-75.

Резонансный ферритовый вентиль на коаксиальном волноводе является широкополосным прибором со сравнительно малыми габаритами. Основной тип волны — поперечная Т-волна. Области с круговой поляризацией СВЧ магнитного поля в обычных условиях в таком волноводе нет. Для их создания частично заполняют коаксиальный волновод диэлектриком с большой проницаемостью $\epsilon_d \approx 10 \dots 20$ (рис. 7.96). Круговая поляризация на поверхности диэлектрика возникает, если $\pi/2 < \mathcal{N}(D+d) < \pi$. Диаметры проводников волновода должны также обеспечивать заданное волновое сопротивление. Марка феррита выбирается, как указывалось выше. Толщина вкладыша для стандартных размеров волноводов (16×6,95 мм, 16×4,6 мм, 10×4,34 мм) $t \approx 1 \dots 2$ мм, длина $l_\phi \approx 0,5\lambda$. Диэлектрический вкладыш имеет согласующие полуконусы длиной также $\sim 0,5\lambda$. Выполняется из

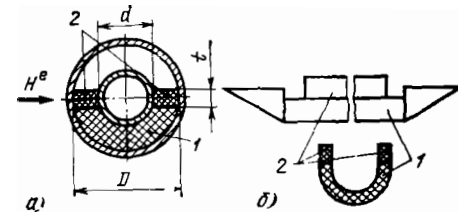


Рис. 7.96. Резонансный ферритовый вентиль на коаксиальном волноводе: а — поперечное сечение волновода с частичным феррито-диэлектрическим заполнением; б — форма феррито-диэлектрического вкладыша: 1 — диэлектрический вкладыш; 2 — ферритовые пластины

материалов типа ПТ, СТ, ПЭНДТ или алюминооксидной керамики. Требуемую ϵ_d при заданных D, d, t и λ определяют из соотношения

$$t/\lambda = 1/\{2\pi \sqrt{\epsilon_d - \epsilon_\phi} \times \times \operatorname{tg}\{4,94(D+d)\sqrt{\epsilon_d - \epsilon_\phi}/\lambda\} - 2\pi \sqrt{\epsilon_\phi - 1}\}.$$

Требуемое внешнее магнитное поле

$$H_{\text{рез}}^e = \sqrt{M_s^2 (N_x - N_y)^2/4 + (\nu/\gamma)^2 + M_s [N_z - (N_x + N_y)/2]},$$

где $N_x + N_y + N_z = 1$ — размагничивающие факторы ферритовых пластин по осям, выбранным так, что ось y совпадает с направлением распространения СВЧ энергии (с осью волновода), ось z — с направлением постоянного магнитного поля. Для длинных пластин с размерами $t \times l_\phi \times \times 2m, N_y \approx 0, N_z \approx t/(t+2m), N_x \approx \approx 2m/(t+2m)$. Такие вентили при использовании иттриевых феррогранатов имеют в диапазоне ДШВ $L_{\text{обр}} \gg \gg 20$ дБ, $B \gg 20$, КСВН $\leq 1,3$ в двухкратной полосе частот.

Резонансный ферритовый вентиль на полосковом волноводе (рис. 7.97) использует для создания области с круговой поляризацией СВЧ магнитного поля гребенчатую замедляющую структуру на центральном полоско-

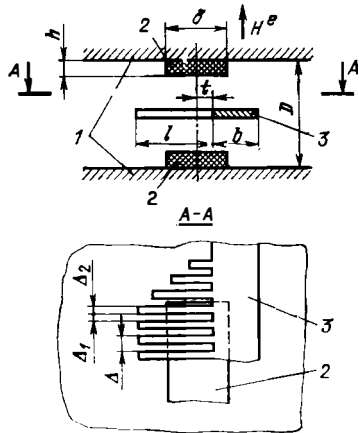


Рис. 7.97. Резонансный вентиль на полосковом волноводе с гребенчатым центральным проводником: 1 — заземленные пластины; 2 — ферритовые вкладыши; 3 — центральный проводник с гребенчатой замедляющей структурой

вом проводнике, образованную рядом разомкнутых шлейфов, длины которых на основной части вентиль $(\approx \approx 0,125\lambda)$, а на концах вентиль для широкополосного согласования l плавно уменьшается. Выбор размеров: длина ферритовой пластины $l_\phi \approx (0,5 \dots 0,7)\lambda, h \approx (0,1 \dots 0,2)D, \delta \approx \approx (0,05 \dots 0,1)\lambda, \Delta_1 \approx \Delta_2, 3\Delta < D, \Delta_1 + \Delta_2 = \Delta$. Выбор марки феррита производят так же, как и для волноводных вентилях, внешнее подмагничивающее поле $H^e \approx H^i + M_s, H^i = \nu/\nu$. Эти вентили широкополосны, имеют относительно малые габариты и хорошие условия для отвода тепла от ферритовых вкладышей, могут работать на высоком уровне мощности.

Ферритовые вентили на смещении поля основаны на изменении распределения СВЧ электрического поля при прямом и обратном направлениях распространения волны в линии передачи с подмагниченной внешним полем ферритовой пластиной. Ферритовый вентиль на прямоугольном волноводе (рис. 7.98,а) включает подмагниченную полем H^e ферритовую пластину 1, на боковой поверхности которой нанесен резистивный поглощающий слой 2 с поверхностным сопротивлением $\rho_s = = 100 \dots 200$ Ом/□. Положение ферритовой пластины фиксируется диэлектрической прокладкой 3 из материала с невысоким значением ϵ_d (кварцевое стекло, стеклотекстолит). Амплитуда СВЧ электрического поля на поглощающем слое при прямом направлении распространения близка к нулю (малые потери), при обратном — максимальна (большие потери). Для работы в сантиметровом диапазоне волн рекомендуют выбирать марки ферритов с достаточно высокой $M_s \approx 200 \dots 300$ кА/м и узкой резонансной кривой ($\Delta H \leq 10$ кА/м). Допустимо использовать марки с повышенным значением $\operatorname{tg} \delta_e$. Для широкополосных приборов целесообразно иметь $\rho = \nu M_s/\nu < 1$.

Внутреннее магнитное поле должно обеспечивать выполнение следующего условия: $\mu_\perp < 0$. Этому, а также получению достаточно малых $L_{\text{пр}}$ соответствует такая область: $1 - \rho < < \sigma < \sqrt{\rho^2/4 + 1} - \rho/2 - 2\delta$. Это соотношение является исходным для расчета и конструирования магнитной системы, при этом внешнее магнитное поле ввиду слабого размагничи-

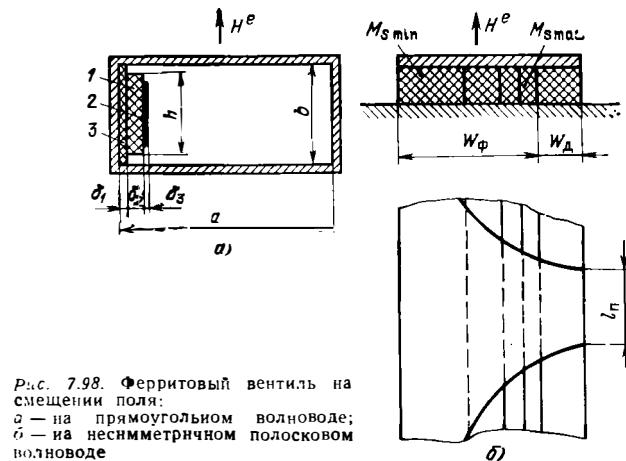


Рис. 7.98. Ферритовый вентиль на смещении поля: а — на прямоугольном волноводе; б — на несимметричном полосковом волноводе

вания из-за вертикального расположения пластины немного больше внутреннего $H^i = \sigma\nu/\nu$.

Резистивный слой наносится напылением термостойких никромовых и других пленок и защищается от окисления при разогреве термостойкими покрытиями.

Геометрические размеры: длина поглощающего слоя (вдоль волновода) $\approx 1,5\lambda$, длина согласующих скосов на концах феррито-диэлектрического вкладыша $\approx 0,5\lambda$, высота ферритовой пластины $h \approx 0,7b$, толщины $\delta_1 \approx \approx (0,03 \dots 0,04)a, \delta_2 \approx (0,15 \dots 0,16)a, \delta_3 \approx (0,001 \dots 0,002)a$.

Вентили на полосковом волноводе на смещении поля (рис. 7.98,б) очень широкополосны (достигаются перекрытия частот от 3:1 до 5:1), малогабаритны (особенно на несимметричном полосковом волноводе). Используют сложные феррито-диэлектрические вкладыши, в которых диэлектрический материал с большими потерями (ферроэпоксид и др.) является поглотителем. Для достижения широкополосности ферритовая часть вкладыша набирается из феррита трех-четырёх разных марок. Слой, прилегающий к поглотителю, должен иметь самую высокую $M_s \approx 0,8\nu_{\text{max}}/\nu$, где ν_{max} — максимальная частота рабочего диапазона; в дальнейшем от поглотителя слой используют материал с $M_s \text{ min} \approx 1,3\nu_{\text{min}}/\nu$. Ширина полоскового проводника на ферритовом заполнении, мм: $W_\phi \approx 250/(\nu_{\text{max}} \sqrt{\epsilon_\phi})$, ν_{max} в ГГц. Ширина проводника на

поглотителе $W_\pi \approx (0,03 \dots 0,05)\lambda$. Длина поглотителя $l_n \approx 3W_\pi$. Требуемое внутреннее относительное подмагничивание $\sigma < 1$, а внешнее поле $H^e \approx \approx M_s$. Согласование вентиль обеспечивается многоступенчатыми или плавными переходами, длина и радиус кривизны последних $\approx \lambda/\sqrt{\epsilon_\phi}$.

Ферритовые циркуляторы [29] — независимые трех- или более плечевые устройства, в которых электромагнитная энергия передается в определенном порядке из одного плеча в другое; например, $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow \rightarrow 1 \rightarrow \dots$ (цифры — номера плеч). Изменение направления внешнего постоянного магнитного поля на противоположное приводит к обратному направлению распространения СВЧ энергии: $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow$. Основное преимущество циркуляторов перед вентилями — отраженная энергия поглощается не в ферритовом вкладыше, а отводится в изолированное плечо и рассеивается в специально подключенной нагрузке. Используются как развязывающие устройства при неизменном направлении подмагничивающего поля или как переключатели, управляемые сменой направления подмагничивания.

Симметричный Y-циркулятор на прямоугольном волноводе (рис. 7.99) имеет 3 плеча. Цилиндрический ферритовый вкладыш l заполняет по высоте либо полностью, либо частично (с зазором Δ) 120-градусное разветвление в H -плоскости 2. Для увеличения широкополосности на вкладыш надевают кольцевой диэлектрич-

ческий трансформатор 3 и вводят дополнительные диэлектрические штыри 4. В простейшем случае чисто ферритового вкладыша без зазора ($\Delta=0$) его диаметр $D_\phi \approx 0,75\lambda/\sqrt{\epsilon_\phi}$, требуемая относительная намагниченность материала, который обычно ненасыщен, $p \approx \sqrt{\epsilon_\phi}/(8,5\sqrt{\epsilon_\phi}-14)$. Требуемая $M = \nu\rho/\gamma$, соответствующее внутреннее поле H^i определяется для

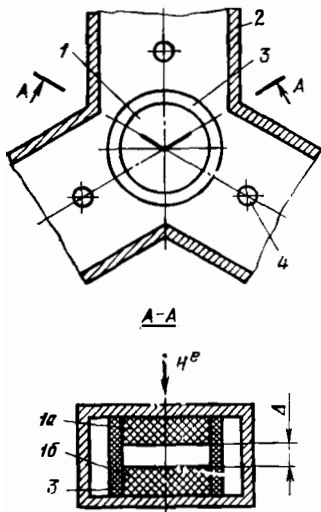


Рис. 7.99. Симметричный Y-циркулятор на прямоугольном волноводе

выбранного материала по кривой намагничивания $M=f(H^i)$. Внешнее поле $H^e = H^i + N_z M$. Размагничивающий фактор цилиндрического образца диаметром D_ϕ и высотой h

$$N_z \approx \left[1 - \frac{h}{D_\phi} \times \frac{\arcsin \sqrt{1 - (h/D_\phi)^2}}{\sqrt{1 - (h/D_\phi)^2}} \right] / [1 - (h/D_\phi)^2].$$

Полосковые Y-циркуляторы (рис. 7.100) конструируют на базе 120°-ного разветвления полоскового волновода, образованного заземленными пластинами 1 и центральным проводником 2. Между ними помещают ферритовые дисковые вкладыши 3, намагниченные магнитной системой 4. Могут работать как в дорезонансных полях ($\sigma < 1$), так и в резонансных

области. Размеры вкладышей и требуемая величина подмагничивающего поля определяется уравнениями циркуляции, решаемыми с учетом

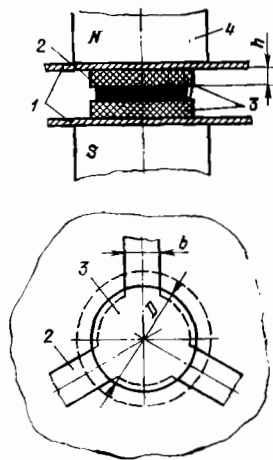


Рис. 7.100. Y-циркулятор на симметричном полосковом волноводе

зависимости компонент $\vec{\mu}$ от подмагничивающего поля:

$$D \approx 0,58 \lambda / \sqrt{\mu_\perp \epsilon_\phi},$$

$$h \approx 0,00153 \lambda m Z_0 |k/\mu| / (\alpha_z \mu_\perp),$$

где m — число дисковых вкладышей ($m=2$ при симметричном полосковом волноводе; $m=1$ — при несимметричном); Z_0 — волновое сопротивление подводящих волноводов; α_z — коэффициент, учитывающий краевые поля. Для симметричного полоскового волновода $\alpha_z = 1 - 0,00456 Z_0 \sqrt{\epsilon_\pi} = 1 / (1 + 0,43 \cdot 2h/b)$, для несимметричного $\alpha_z = 1 / [1 + 1,735 e^{-0,0724} \times (b/h)^{-0,836}]$, ϵ_π — проницаемость диэлектрического заполнения полоскового волновода.

В диапазоне ЦВ применяют резонансный режим ($\sigma > 1$). Расчет ведут по задаваемым λ и h , принимаемой равной высоте подводящих волноводов. Выбирают марку феррита (целесообразно из иттриевых феррогранатов), определяя таким образом необходимые для дальнейшего расчета значения M_s и ϵ_ϕ . Рассчитывают параметр $A = 653 \alpha_z (h/\lambda) / Z_0 m$ и требуемое относительное поле $\sigma = \sqrt{1 - \rho/A} - \rho$ по относительной

намагниченности насыщения $p = \nu M_s / v$. Для обеспечения малых вносимых потерь должны выполняться следующие неравенства: $\sigma \geq 1,4 \dots 1,6$ и $\rho < \sigma$. При невыполнении одного из них меняется либо марка феррита, либо высота вкладыша h . Далее определяют $\mu_\perp = 1 + \rho(\rho + \sigma) / (\sigma^2 + \rho\sigma - 1)$ и по первому уравнению циркуляции — диаметр вкладыша. Полоса рабочих частот (по уровню развязки 20 дБ) $2\Delta\nu/v \approx 30\rho / (\sigma^2 + \rho\sigma - 1)$, %. Внешнее поле подмагничивания $H^e \approx \sigma\nu/\gamma + N_z M_s$. Для определения N_z можно пользоваться приведенной выше формулой, но для $m=2$ высоту вкладыша нужно удвоить.

При $\lambda < (20 \dots 30)$ см и применении соответствующих по диапазону иттриевых феррогранатов рекомендуют использовать дорезонансный режим ($\sigma < 1$) — снижается масса магнитной системы и несколько расширяется полоса рабочих частот. При заданной высоте h расчет ведут в следующем порядке. Определяют параметр A . Затем, так как материал вкладышей в этом случае обычно ненасыщен, рассчитывают требуемое значение относительной намагниченности $p \approx 0,95 A / \sqrt{A^2 + 1}$, при этом $\rho < 0,5 \dots 0,6$. Найдя значение эффективной магнитной проницаемости $\mu_\perp \approx 0,9 - \rho^2$, по первому уравнению циркуляции определяют диаметр вкладыша. Внутреннее поле подмагничивания H^i находят по кривой намагничивания выбранного материала, имея в виду, что $M = \nu\rho/\gamma$. Расчет внешнего поля проводится так же, как и для волноводного Y-циркулятора. Полоса рабочих частот $2\Delta\nu/v \approx 30\rho$, %. Низкие вносимые потери обеспечиваются при $\mu_\perp \geq 0,7 \dots 0,8$.

Для расширения полосы рабочих частот используют четвертьволновые трансформаторы на входах циркулятора, специальные комбинации отрезков линий длиной $\lambda_\pi/8$ ($\lambda_\pi = \lambda/\sqrt{\epsilon_\pi}$), а также специальные режимы. Конструкторские расчеты для этих случаев приведены в [29].

Y-циркуляторы высокого уровня мощности выполняют на симметричных полосковых волноводах. Ферритовые вкладыши запаивают или приклеивают клеем с высокой теплопроводностью к заземленным пластинам,

от которых производится теплоотвод. При разогреве феррита падает M_s , поэтому максимальная рабочая температура вкладыша не должна превышать $t_{max} = (0,6 \dots 0,7)\theta_k$. При интенсивном приуудительном охлаждении можно ориентироваться на следующее значение максимально допустимой средней мощности: $P_{доп} \leq 600 \lambda \Delta t / (Z_0 |k/\mu|)$, Вт (Δt — разность между температурой охлаждаемых заземленных пластин и t_{max} , λ подставляется в м).

В диапазоне $\nu < 1 \dots 1,5$ ГГц для уменьшения D вкладышей используют емкостные реактивные элементы, включаемые на входах Y-циркулятора у внешней поверхности дисков. Используют малогабаритные керамические конденсаторы К10-9, подстроечные типа КТ4. Небольшие величины емкости (до 10...20 пФ) можно реализовать с помощью разомкнутых полосковых шлейфов длиной менее $\lambda_\pi/4$ или путем расширения подводящих полосков. Порядок расчета следующий. По заданным Z_0 и h определяется ширина b центрального полоскового проводника подводящих волноводов. Из конструктивных соображений выбирают $D \leq 0,04\lambda$ и рассчитывают угол запитки $\psi = \arctg b/D$. По графикам (рис. 7.101) отыскивают функции

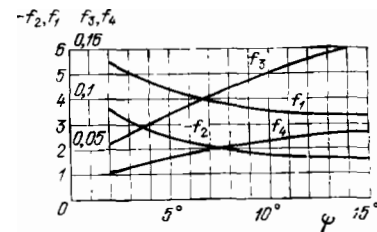


Рис. 7.101. Графики для определения расчетных функций угла запитки

этого угла $f_{1...4}(\psi)$. Исходя из рабочей λ , выбирают марку феррита и по M_s рассчитывают p . Ориентировочно в рабочей точке задают $\mu_\perp = 1,4 \dots 1,8$, затем определяют аргумент $x_\perp = \sqrt{\epsilon_\phi \mu_\perp} \pi D / \lambda$ и параметр A (см. выше). Рассчитывают относительное поле подмагничивания $\sigma = \sqrt{1 + \rho[f_3(\psi) + x_\perp^2 f_4(\psi)] / A} - \rho$. Уточняют $\mu_\perp = 1 + \rho(\sigma + \rho) / (\sigma^2 + \rho\sigma -$

—1), при слишком больших ($>10 \dots 20\%$) расхождениях расчетного значения μ_{\perp} и ранее заданного производится корректировка этой величины и пересчет x_{\perp} и σ . Для обеспечения низких вносимых потерь необходимо выполнение неравенств: $\sigma \gg \rho$ и $\sigma \gg 1,4 \dots 1,6$. При их невыполнении либо уменьшают высоту дисков h , либо выбирают марку феррита с меньшей M_s . Далее рассчитывают $|k/\mu| = \rho / (\sigma^2 + \rho\sigma - 1)$ и емкость, включаемую в каждое плечо Y-циркулятора: $C/\lambda = 306 [f_1(\psi) + x^2_{\perp} f_2(\psi)] / (Z_0 |k/\mu|)$, пФ/м. Внешнее поле подмагничивания $H^e = \sigma v / \gamma + N_z M_s$.

Фазовые циркуляторы конструируют на прямоугольных волноводах для использования на высоких уровнях мощности. Через циркулятор, изображенный на рис. 7.102д, энергия рас-

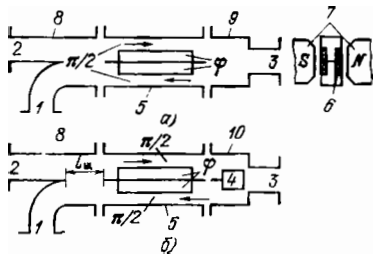


Рис. 7.102. Конструктивные схемы фазовых ферритовых циркуляторов на прямоугольных волноводах: 1—4 — входы (плечи) фазового циркулятора; 5 — секция невзаимных фазовращателей; 6 — ферритовые вкладыши; 7 — полюсные наконечники магнитной системы; 8 — секция трехдобиельного щелевого моста; 9 — переход на двоярный волновод; 10 — модифицированный двойной Т-мост

пространяется в направлении $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ или противоположном при смене знака H^e , через циркулятор, схема которого соответствует рис. 7.102б, направление распространения — $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ (или противоположное). Длина щели 3-децибельного моста $L_{\text{м}} = 0,5\lambda / [\sqrt{1 - (0,25\lambda/a)^2} - \sqrt{1 - (0,5\lambda/a)^2}]$, где a — ширина волновода.

Марка феррита выбирается по тем же рекомендациям, что и для резонансного волноводного вентиля. При прочих одинаковых параметрах целесообразно ориентироваться на марки с меньшим значением M_s . Ферритовые вкладыши устанавливают так же,

как и в волноводных резонансных вентилях: координата центра пластины $t_0 \approx 0,25a$; рекомендации по выбору размеров m и n те же. Длина вкладышей L_{ϕ} должна обеспечивать для каждой из четырех ферритовых пластин дифференциальный фазовый сдвиг $\Delta\phi = 0,25\lambda$. Это выполняется, если $L_{\phi}/a \approx 1/[8k'(2m/a)(n/b)]$, где k' — недиагональная компонента тензора $\bar{\mu}$. Обычно выбирают $L_{\phi}/a \geq 3 \dots 8$, при этом требуется $k' < 1$, что обеспечивает малые вносимые потери. Внутреннее магнитное поле дорезонансное: $\sigma < \sqrt{1 - \rho} = \sqrt{1 - \gamma M_s / v}$.

Концы вкладышей для согласования выполняются в виде клиньев длиной до $\lambda_v/2$. При работе с большой мощностью вкладыши набирают из прямоугольных пластин со стороны 30...40 мм, которые запаивают на стенку волновода один рядом с другим, образуя пластинчатый вкладыш необходимой длины. Острые кромки тщательно скругляют ($r \approx 1$ мм).

7.9. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ СВЧ [4, 5]

Применяют отрезки длинных линий в режиме стоячей волны и кольцевые резонаторы бегущей волны. Параметры: резонансная частота ν_0 и длина волны λ_0 — в свободном пространстве или λ_{0v} — в системе (в волноводе), собственная (ненагруженная) добротность Q_0 , нагруженная Q_n , КПД системы $\eta_k = 1 - Q_0/Q_n$. Колебательные системы СВЧ могут возбуждаться на различных типах колебательных систем (объемных резонаторов) Q_0 прямо пропорциональна V/S (V — объем резонатора, S — ограничивающая внутренняя поверхность).

Короткозамкнутые отрезки линий с поперечной волной. Применяют симметричные двухпроводные линии с сосредоточенной емкостью C_0 (рис. 7.103а), коаксиальные волноводы (рис. 7.103б, в), тороидальные объемные резонаторы (рис. 7.104), полосковые волноводы. Условие резонанса для систем, изображенных на рис. 7.103а, б, при заданной рабо-

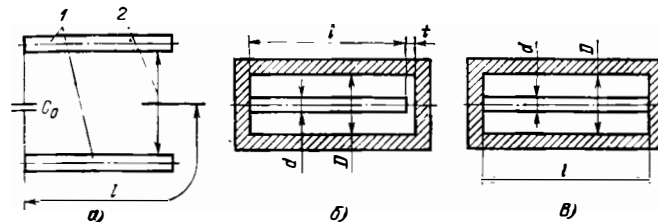


Рис. 7.103. Схемы колебательных систем на короткозамкнутых линиях с Т-волной: а — отрезок двухпроводной симметричной линии с сосредоточенной емкостью C_0 (1 — проводники линии; 2 — короткозамыкатель); б — отрезок коаксиального волновода с укорачивающей емкостью (зазор длиной t); в — полуволновая система

чей $\lambda : l = 0,159\lambda \arctg [5,31\lambda / (C_0 Z_0)] + 0,5\lambda$ (C_0 — в пФ, Z_0 — в Ом, λ и l — в см).

С учетом потерь только в проводниках линий $Q_0 \approx \lambda Z_0 (\lambda R_1)$. Для линии рис. 7.103а $R_1 = 0,318 R_s / r$, Ом/см,

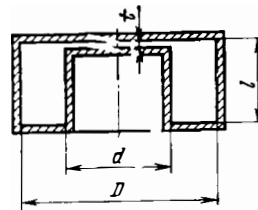


Рис. 7.104. Тороидальный объемный резонатор

для коаксиальных волноводов $R_1 = 0,318 R_s (1/d + 1/D)$. Поверхностное сопротивление $R_s = 0,045k / \sqrt{\lambda}$. Для меди $k=1$, алюминия — 1,27, золота (покрытие) — 0,965, золота (покрытие) — 1,5. Для систем рис. 7.103б, в Q_0 максимально при $2,5 \leq D/d \leq 6$, емкость C_0 зазора t рассчитывается как для плоского конденсатора. Условие отсутствия продольных видов колебаний: $3,14(D+d) < 2\lambda$. Добротность полуволнового резонатора (см. рис. 7.103а) с учетом потерь в медных стенках $Q_0 = 1300 \sqrt{\lambda} / [1 + (1 + D/d)(0,5\lambda/D) / \ln D/d]$.

Тороидальный резонатор (см. рис. 7.104) при $D \ll 0,5\lambda$, $t \ll \lambda/4$ и $t \ll l$ рассчитывается по следующим формулам: $Q_0 = i R_s \sigma [1 + l/D(1 + D/d) / \ln D/d]$; $\lambda_0 = 1,57d \sqrt{2l/t(1 + 2,55t/d) \times \ln l/t} / \ln D/d$, где σ — удельная объемная проводимость материала стенок.

Разомкнутые отрезки длинных линий. При наличии на одном конце емкостного элемента C_0 имеют резонанс при длине $l = 0,159 \times \lambda_{\text{д}} \arctg [5,31\lambda_{\text{д}} / (C_0 Z_0)] + (n + 0,5) \times \lambda_{\text{д}}/2$, $\lambda_{\text{д}}$ — длина волны в линии. Разомкнутыми обычно оставляют в колебательных системах отрезки несимметричных полосковых линий, нанесенных на диэлектрические подложки.

Колебательные системы на полосковых волноводах. При малой добротности ($\leq 100 \dots 200$) выполняют на отрезках длиной $0,5\lambda_{\text{д}}$, замкнутых на коротко с двух сторон либо путем металлизации торцов или сквозных отверстий, либо установкой стягивающих металлических шпнлек. Для несимметричного полоскового волновода (см. рис. 7.16а) при $t \leq 0,2h$ (v — в ГГц и линейные размеры — в м):

$$Q_0 = \frac{7900 v h / R_s \{1 + 0,5 b/h + \rightarrow\}}{1 + 0,5 b/h + 0,159 [1 + \rightarrow\} + 0,159 [1 + 2,3 \lg (1 + \rightarrow\} + 2,3 \lg (1 + 2h/t)]/h + \rightarrow\} + 2h/t) t/h} \rightarrow + 0,733 \lg (1 + 2h/t)$$

Для симметричного полоскового волновода при тех же условиях:

$$Q_0 = 3950 h / R_s (1 - t/h) \times [b/h + 1,466 \lg (2 - t/h) / (1 - t/h) - 0,733 \lg (1/\sqrt{1 - t/h} - 1) t/h] / [2b/h + 1 - t/h + 0,733 (1 + t/h) \lg (2h/t - 1)]$$

Системы с высокой добротностью (Q_0 до 3000) выполняют на симметричных полосковых волноводах с воз-

душным заполнением — с разомкнутыми концами или с одним короткозамкнутым концом. Применяют также дисковые системы на диэлектрических подложках.

Объемные резонаторы на отрезках прямоугольного и круглого волноводов. Выполняют замыканием их коротко с двух сторон. Прямоугольные резонаторы (рис. 7.105,а) возбуждаются на типах колебаний H_{mnp} или E_{mnp} , m — число полуволн вдоль широкой стенки волновода a ; n — вдоль узкой b ; p — вдоль длины l . Условие резонанса: $\lambda_0 = 2l / \sqrt{(ma/a)^2 + (nb/b)^2 + (pl/l)^2}$. Основной (низший) тип H_{101} . Для него

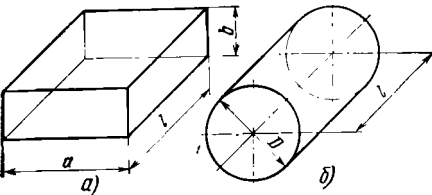


Рис. 7.105. Объемные резонаторы на отрезках прямоугольного (а) и круглого (б) волноводов

$Q_0 = \lambda_0 R_s \sigma 0,5 b (a^2 + l^2)^{1,5} / [l^3 \times (a + 2b) + a^3 (l + 2b)]$.

Резонатор на круглом волноводе (рис. 7.105,б) возбуждается на типах H_{mnp} или E_{mnp} (m, n, p — число полуволн вдоль $1/2$ длины окружности, диаметра D и длины волновода l соответственно). Условие резонанса: $\lambda_0 = \lambda_{кр} / \sqrt{1 + (0,5\rho\lambda_{кр}/l)^2}$. Расчет критической длины волны $\lambda_{кр}$ — см. табл. 7.16. Диаграмма типов ко-

лебаний приведена на рис. 7.106. Добротность максимальна для колебаний H_{0np} при $D=l$. Расчет добротности: при H_{011} $Q_0 = 0,61 \lambda_0 R_s \sigma [1 + 0,17 (D/l)^2]^{1,5} / [1 + 0,17 (D/l)^3]$; при H_{111} $Q_0 = 0,206 \lambda_0 R_s \sigma [1 + 0,73 (D/l)^2]^{1,5} / [1 + 0,22 (D/l)^2 + 0,51 (D/l)^3]$; при E_{010} $Q_0 = 0,38 \lambda_0 R_s \sigma / (1 + 0,5 D/l)$.

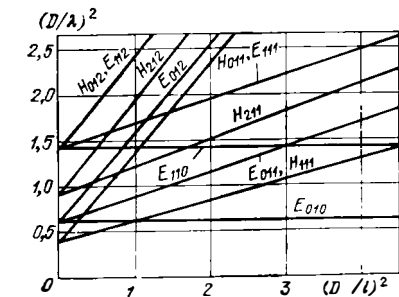


Рис. 7.107. Способы возбуждения и связи с нагрузкой колебательных систем на коаксиальном волноводе: а — емкостная связь; б — индуктивная связь; в — кондуктивная связь

лебаний приведена на рис. 7.106. Добротность максимальна для колебаний H_{0np} при $D=l$. Расчет добротности: при H_{011} $Q_0 = 0,61 \lambda_0 R_s \sigma [1 + 0,17 (D/l)^2]^{1,5} / [1 + 0,17 (D/l)^3]$; при H_{111} $Q_0 = 0,206 \lambda_0 R_s \sigma [1 + 0,73 (D/l)^2]^{1,5} / [1 + 0,22 (D/l)^2 + 0,51 (D/l)^3]$; при E_{010} $Q_0 = 0,38 \lambda_0 R_s \sigma / (1 + 0,5 D/l)$.

Устройства связи и перестройки колебательных систем. Для возбуждения систем и их связи с нагрузкой применяют элементы емкостного, индуктивного и коидуктивного типов (рис. 7.107), а также отверстия и щели, тип связи через которые определяется конфигурацией СВЧ поля в области их размещения. Для получения максимальной связи четыре или емкость связи (рис. 7.107,а) располагают в пучности электрического поля, степень связи регулируют изменением емкости или глубины погружения щели. Витки связи (рис. 7.107,б) размещают в пучности магнитного поля, регулировку производят вращением плоскости витка. Отверстия и щели связи располагают в общих стенках резонаторов и подводящих линий с целью возбуждения требуемого типа колебаний. Связь с системами на полосковых волноводах — через емкостные зазоры.

Перестройку по частоте осуществляют изменением длины l отрезков линий (волноводов) с помощью короткозамыкателей бесконтактного и контактного типов. Пружинные элементы последних выполняют из фосфористой или берилловой бронзы, хромируют, никелируют или покрывают родием, палладием. Для под-

стройки применяют также сосредоточенные емкостные элементы или индуктивные короткозамкнутые витки.

Длину разомкнутых несимметричных полосковых волноводов, нанесенных на диэлектрическую подложку, изменяют следующим способом. В продолжение основного волновода наносят короткие (несколько мм) участки полоски, которые для подстройки последовательно соединяют перемычками (например, из припоя).

Немеханическую широкополосную перестройку колебательных систем можно производить, перестраивая связанный с основным резонатором монокристаллический ферритовый резонатор шаровой формы из железонитриевого граната (ЖИГ). Его резонансная частота $\nu_0 = \gamma H$ изменяется при регулировке постоянного отношения электрона $\gamma = 2,8$ МГц/Э, или 35,2 МГц/(кА/м).

7.10. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СВЧ УСТРОЙСТВ [7. 19]

Основные определения. Электрическая прочность характеризуется пробивной (разрядной) напряженностью электрического поля $E_{пр}$ и соответствующей ей пробивной (разрядной) мощностью $P_{пр}$, которая относится к мощности падающей волны на входе устройства и определяется для нормальных условий. На практике пользуются величиной относительной пробивной мощности $P_{пр}$, равной отношению $P_{пр}$ устройства к $P_{пр}$ регулярной линии, соединяющей это устройство с генератором. Максимальный уровень рабочей (допустимой) мощности $P_{р\max}$ должен быть в $K_{зап}$ раз (коэффициент запаса элек-

трической прочности) меньше $P_{пр}$ ($K_{зап} = P_{пр}/P_{р\max}$). Значение $K_{зап}$ выбирается равным 2...4 и определяется с учетом условий эксплуатации (давления, температуры и т. д.), параметров (рассогласования, потеря и т. д.) и качества сборки тракта.

Способы повышения электрической прочности. Электрическая прочность СВЧ устройств возрастает при заполнении диэлектриком (газообразным, жидким или твердым), $E_{пр}$ которого выше, чем у воздуха. Для воздуха при нормальных условиях $E_{пр} \approx 29$ кВ/см и незначительно меняется до частот ~ 10 ГГц. Зависимости $E_{пр}$ и $P_{пр}$ воздуха от давления и температуры рассчитывают по формулам

$$E_{пр} = E_{пр}^н (2,9 \cdot 10^{-3} \rho / T)^{3/4},$$

$$P_{пр} = P_{пр}^н (2,9 \cdot 10^{-3} \rho / T)^{3/2}$$

($E_{пр}^н$ и $P_{пр}^н$ — при нормальных условиях; $\rho = 101$ кПа; $T = 293$ К; ρ и T — соответственно текущие давление, Па, и температура, К).

Высокой электрической прочностью обладают электроотрицательные газы (табл. 7.30). Практическое применение нашел элегаз (гексафторид серы SF_6), пробивная напряженность которого при нормальном давлении $\sim 2,5$ раза выше, чем воздуха [19].

Величина $P_{пр}$ элементов СВЧ характеризуется коэффициентом упрочнения K_u (отношение $P_{пр}$ элемента, заполненного газом, к $P_{пр}$ того же элемента, заполненного воздухом, при одинаковом давлении) и зависит от коэффициента неоднородности электрического поля q [19]. Зависимости K_u от q различных элементов СВЧ, заполненных элегазом, приведены на рис. 7.108.

Электрическая прочность тракта

Таблица 7.30

Параметры фторосодержащих газообразных диэлектриков

Газ	Молекулярная масса	$E_{пр}$, кВ/см	Температура кипения, θ , К	Давление на-ра при 293 К, кг/см ²
Перфторциклобутан (C_4F_8)	200,0	130	269	2,5
Фреон-115 (C_2F_5Cl)	142,5	116	235	8,7
Фреон-12 (CCl_2F_2)	121,0	89	243,2	5,8
Гексафторид серы (элегаз) (SF_6)	146,0	73	209,2	Газ
Фреон-142 ($C_2H_3ClF_2$)	100,5	54	263,2	3,0

Рис. 7.106. Диаграмма типов колебаний резонатора на круглом волноводе

Таблица 7.31

Максимально допустимые избыточные давления для стандартных прямоугольных волноводов

Сечение волновода, мм	Толщина стенки, мм		Избыточное давление $\times 10^{-5}$, Па	
	Л	А	Л	А
7,2×3,4	0,5	—	3,5	2,0
16,0×8,0	1,0	1,4	3,8	1,5
23,0×10,0	1,0	1,0	2,9	1,0
28,5×12,6	1,5	1,5	2,3	0,8
35,0×15,0	1,5	1,5	2,0	0,8
48,0×24,0	2,0	2,0	1,0	0,5
58,0×25,0	2,0	2,0	1,0	0,4
72,0×34,0	2,0	2,5	0,75	0,25
90,0×45,0	2,0	3,0	0,5	0,15
110,0×55,0	2,5	3,0	0,3	0,1

Примечание. Л — латунь, А — алюминий.

возрастает при создании в нем избыточного давления (рис. 7.109, где $K_y = P_{пр}(p_1)/P_{пр}(p_2)$ при $p_1 > p_2$), величина которого ограничена механической прочностью элементов (табл. 7.31).

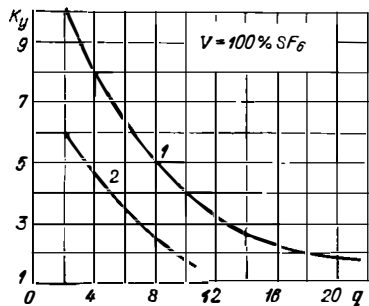


Рис. 7.108. Зависимость K_y от степени неоднородности поля для элегаза при нормальном давлении для диапазонов: 1 — $\lambda = 3 \dots 40$ см; 2 — $\lambda = 0,8$ см

Обязательным условием использования для заполнения трактов твердых диэлектриков (см. табл. 7.15, 7.16) является отсутствие воздушных включений и зазоров между материалом заполнения и токонесущими элементами (при величине зазора t допустимая мощность снижается в t^2 раз).

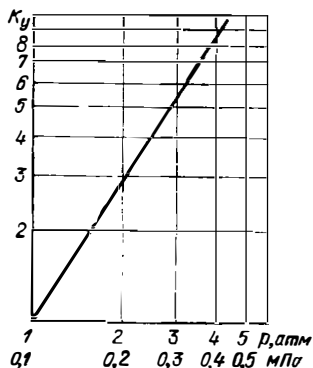


Рис. 7.109. Повышение электрической прочности тракта при увеличении давления внутри волновода

Величина рабочей мощности возрастает с увеличением поперечного сечения линий передачи, что обусловлено уменьшением коэффициента за-

тухания и ростом теплоотдачи в окружающее пространство [7], однако при этом возникает опасность возникновения высших типов волн в областях неоднородностей тракта.

Электрическая прочность типовых СВЧ устройств. Формулы для расчета $P_{пр}$ линий передачи [5]: коаксиальная линия с Т-волной (см. рис. 7.5):

$$P_{пр} = 8,34 E_{пр}^2 d^2 \epsilon_r^{-0,5} \ln(D d^{-1});$$

прямоугольный волновод (см. рис. 7.9.a):

$$P_{пр} = 0,66 E_{пр}^2 ab(1 - 0,25 \lambda_0^2 a^{-2})^{0,5}$$

(волна H_{10}),

$$P_{пр} = 0,33 E_{пр}^2 ab(1 + b^2 a^{-2}) \times (1 - 0,25 \lambda_0^2 a^{-2} - 0,25 \lambda_0^2 b^{-2})^{0,5}$$

(волна H_{11}),

$$P_{пр} = 0,66 E_{пр}^2 \lambda_0^{-1} (a^{-2} + b^{-2}) \times (4a^2 b^2 - \lambda_0^2 a^2 - \lambda_0^2 b^2)^{0,5}$$

(волна E_{11}),

круглый волновод (см. рис. 7.9.б):

$$P_{пр} = 1,98 E_{пр}^2 R^2(1 - 0,086 \lambda_0^2 R^{-2})^{0,5}$$

(волна H_{11}),

$$P_{пр} = 1,98 E_{пр}^2 R^2(1 - 0,37 \lambda_0^2 R^{-2})^{0,5}$$

(волна H_{01}),

$$P_{пр} = 2,94 E_{пр}^2 R^3 \lambda_0^{-1} (6,82 \lambda_0^2 R^2 - 1)^{0,5}$$

(волна E_{01})

($P_{пр}$, кВт; $E_{пр}$, кВт/см; λ_0 ; a ; b ; R , см).

Для полосковых волноводов с воздушным заполнением максимальная передаваемая мощность P_{max} определяется по графикам рис. 7.110, а, б.

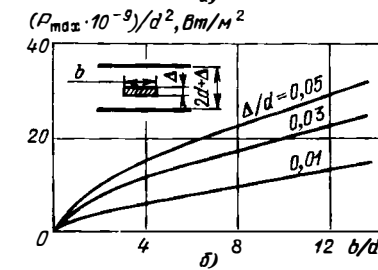
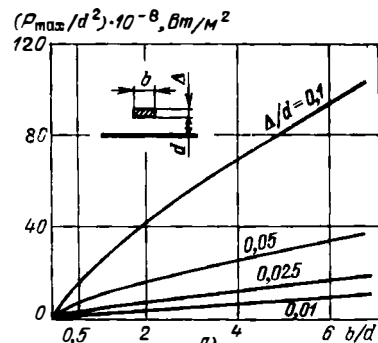


Рис. 7.110. Зависимости максимальной передаваемой мощности для несимметричного (а) и симметричного (б) полосковых волноводов

Снижение относительной величины $P_{пр}$ из-за неоднородностей в тракте прямоугольного волновода приведено на рис. 7.111. Характеристики электрической прочности ряда волноводных устройств даны в табл. 7.32.

Расчет сложных СВЧ трактов высокого уровня мощности ведется по максимальной рабочей мощности $P_{р max}$ и минимальной пробивной мощности $P_{пр min}$ элементов в предельных эксплуатационных условиях. Величина $P_{пр min}$ определяется с учетом температуры, давления и КБВ в тракте с помощью частных коэффициентов снижения электрической

прочности K_θ , K_p , K_k (рис. 7.112, а—в); случайные факторы (дефекты монтажа и конструкций) учитываются коэффициентом $K_c = 0,5 \dots 0,6$. Порядок расчета: по графикам рис. 7.112 определяются значения коэффициентов K_θ , K_p , K_k , рассчитываются величины $K_\Sigma = K_\theta K_p K_k K_c$ и $P_{пр min} = P_{пр} K_\Sigma$ ($P_{пр}$ — пробивная мощность элемента тракта в нормальных условиях). Расчет проводится для элементов тракта с минимальной электрической прочностью.

Пример расчета. В тракте сечением 72×34 мм, работающем при $T_{max} = 333$ К ($\theta = +60^\circ$ С), $p = 80$ кПа ($p = 600$ мм рт. ст.), КБВ = 0,85 и $P_{р max} = 600$ кВт, наименьшей пробивной мощностью обладает волноводно-коаксиальное вращающееся сочленение $P_{пр} = 1000$ кВт (табл. 7.32). По графикам рис. 7.112 находим $K_\theta = 0,83$, $K_p = 0,72$, $K_k = 0,86$; определяем $K_\Sigma = K_\theta K_p K_k K_c = 0,83 \cdot 0,72 \times 0,86 \cdot 0,6 = 0,3$. Отсюда $P_{пр min} = 1000 \cdot 0,3 = 300$ кВт и $K_y =$

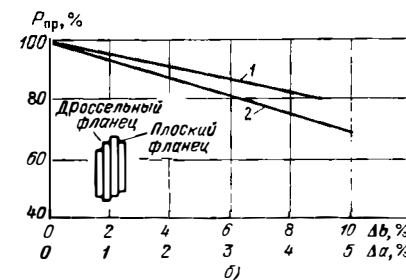
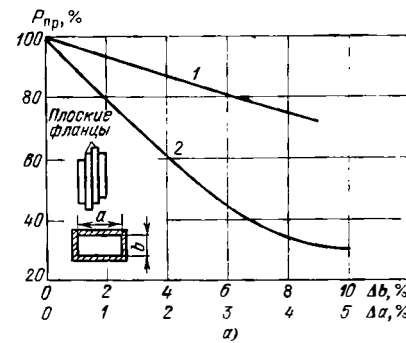


Рис. 7.111. Снижение относительной $P_{пр}$ при смещении плоских (а), плоского и дроссельного (б) фланцев прямоугольных волноводов: 1 — смещение в плоскости Н; 2 — смещение в плоскости Е

Электрическая прочность волноводных устройств

Тип устройства	Размеры волновода, мм	КСВН	$P_{пр}$, кВт	$P'_{пр}$	
Переходы ступенчатые четвертьволновые:	23×10→28,5×12,6	1,05	600	0,65	
					одноступенчатый, $r_c=0,3$ мм
					двухступенчатый, $r_c=0,5$ мм
трехступенчатый, $r_c=2$ мм	90×15→90×45	1,08	1600	0,27	
Волноводная скрутка	23×10→23×10	1,05	380	0,40	
	Волноводно-коаксиальный переход зондового типа $H_{10}^{\ominus} \rightarrow T^{\ominus}$	90×45→ $D=14$; $d=6$	1,1	3400	0,19
Тройники:	23×10	$K_H=1,1$, $K_E=2,0$	180	0,195	
					двойной настраиваемый
					двойной ненастраиваемый
в Н-плоскости с совмещенными боковыми плечами	23×10	$K_H=1,08$, $K_E=1,25$	340	0,37	
Уголок 90° в Е-плоскости, $r_c=0,8$ мм	23×10	1,07	120	0,13	
Гибкие волноводы:	90×45	1,1	4000	0,23	
					гофрированный с размерами выступа $r=h=2$ мм
					винтовой позвонковый
Волноводные вращающиеся сочленения:	23×10; $D=30$	1,1	170	0,185	
					с резонансными кольцами
					с короткозамкнутыми шлейфами
Волноводно-коаксиальные вращающиеся сочленения с возбуждателем:	28,5×12,6; $D=13$; $d=5$	1,1	300	0,2	
					зондовым
					петлевым
Герметизирующие секции:	23×10	1,08	450	0,46	
					прокладка из слюды толщиной 0,1 мм, дроссель стандартный, $r_c=2$ мм
					прокладка из керамики толщиной 3 мм (секция «баночного» типа)
	28,5×12,6	1,1	450	0,31	

Тип устройства	Размеры волновода, мм	КСВН	$P_{пр}$, кВт	$P'_{пр}$
прокладка из фторопласта толщиной 3 мм, дроссель стандартный: $r_c=1$ мм $r_c=4,5$ мм	90×45 90×45	1,08 1,08	4500 7000	0,25 0,40

Примечание. r_c — радиус скругления острых кромок.

$= P_{р max} / P_{р min} = 2$. По графику рис. 7.109 находим величину требуемого давления воздуха в тракте и определяем $p_{взб} \approx 0,45$ атм, что является допустимым для волновода данного сечения (см. табл. 7.31).

7.11. ЭКРАНИРОВАНИЕ СВЧ УСТРОЙСТВ [7]

Экран — функциональный узел СВЧ, предназначенный для подавления паразитных электромагнитных полей и представляющий собой замкнутую пространственную конструкцию, охватывающую экранируемую часть устройства. Качество металлических экранов характеризуется полным экранным затуханием, дБ:

$$= A_{отр} + A_{погл} - A_{ф} - A_{рез}$$

($A_{отр}$ — относительные потери на отражение от наружной поверхности экрана; $A_{погл}$ — потери на поглощение в материале экрана; $A_{ф}$ — составляющая, обусловленная формой экрана; $A_{рез}$ — составляющая, обусловленная резонансными явлениями в экране).

Для увеличения отражения падающей волны от поверхности экрана ($A_{отр}$) целесообразно использовать металлы с высокой электропроводностью поверхности слоя (медь, алюминий или сплавы на их основе, рис. 7.113,а), защитные проводящие пленки на поверхности основного металла, диэлектрики с напыленным слоем металла. Поглощение падающей волны ($A_{погл}$) увеличивается при использовании ферромагнитных материалов (низкоуглеродистые кон-

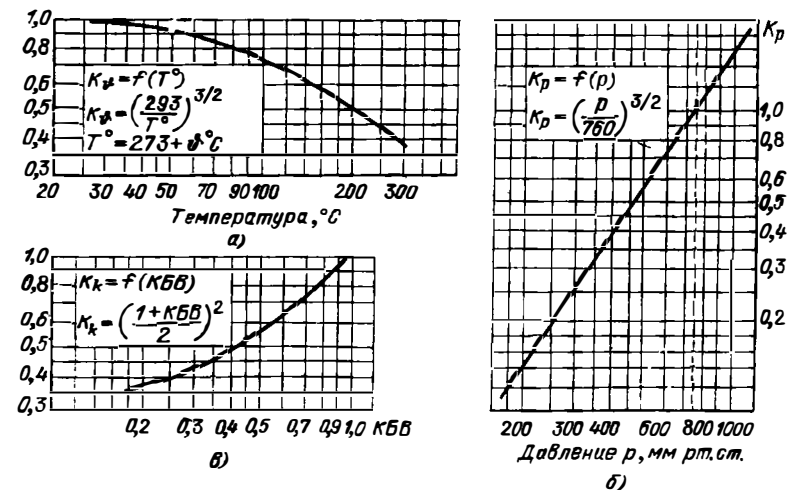


Рис. 7.112. Частные коэффициенты снижения электрической прочности

струкционные стали, рис. 7.113,б); однако из-за высокого коэффициента реакции такие экраны нельзя располагать вблизи СВЧ узлов, управляемых низкочастотными полями. Характеристики экранирования слабо зависят от формы экрана; при расчетах величина A_{ϕ} принимается равной 0; 6 и 9,6 дБ соответственно для эквивалентного плоского, цилиндрического и сферического экранов.

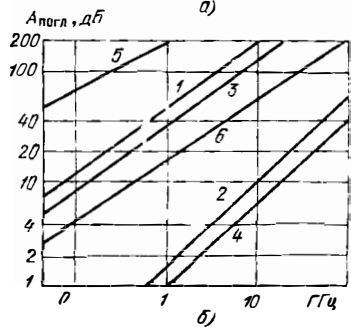
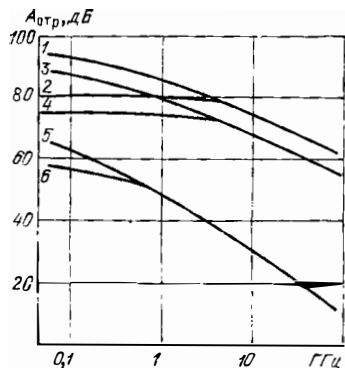


Рис. 7.113. Расчетные частотные зависимости $A_{отр}$ (а) и $A_{погл}$ (б) от толщины стенки экрана: 1 — медь, 10 мкм; 2 — медь, 1 мкм; 3 — алюминий, 10 мкм; 4 — алюминий, 1 мкм; 5 — сталь, 10 мкм; 6 — сталь, 1 мкм

Собственные резонансные длины волн внутренней полости металлических экранов приближенно равны $\lambda_{рез} \approx 2l_0/m$ ($m=1, 2, 3, \dots$; l_0 — наибольший размер полости). Внутренние размеры полости экрана выбираются из условия $\lambda_{пом} > \lambda_{рез}$ ($\lambda_{пом}$ — длина волны помехи; $\lambda_{рез}$ — максимальная резонансная длина волны полости экрана). При совпадении резонансных частот экрана с частотами волн помехи полное экран-

ное затухание уменьшается на величину $A_{рез}$ (рис. 7.114).

Расчет однородных металлических экранов. Исходными данными при конструировании экранов являются:

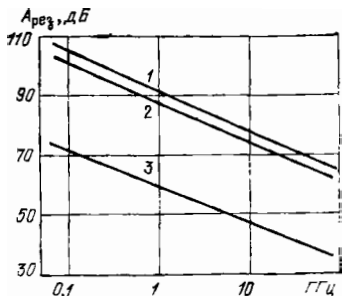


Рис. 7.114. Расчетные частотные зависимости $A_{рез}$ для различных металлов: 1 — медь; 2 — алюминий; 3 — сталь

величина требуемого полного экранного затухания $A_{п}$, дБ, требование к коэффициенту реакции, структура волны и диапазон частот поля помехи. Последовательность расчета: по коэффициенту реакции и типу волны поля помехи выбирается материал экрана и приближенно по графикам рис. 7.113,а находится величина $A_{отр}$; произойдет выбор формы и основных размеров экрана; по форме эквивалентного экрана определяется значение A_{ϕ} ; при невыполнении условия $\lambda_{пом} > \lambda_{рез}$ (нижние резонансные частоты экрана попадают в диапазон волн помехи) по графикам рис. 7.114 определяется величина $A_{рез}$. Рассчитывается $A_{погл} = A_{п} - A_{отр} + A_{\phi} + A_{рез}$ и по графикам рис. 7.113,б определяется требуемая толщина стенки экрана. Затем уточняется значение $A_{отр}$ и окончательно рассчитываются $A_{погл}$ и толщина стенки экрана l_0 .

Пример. Рассчитать толщину металлического покрытия внутренней полости пластмассового экрана клистронного гетеродина. Исходные данные: требуемая величина полного экранного затухания $A_{п} = 80$ дБ; рабочая длина волны клистрона $\lambda_0 = 3$ см; экран цилиндрической формы диаметром 5,5 и высотой 7,5 см.

По условиям работы в качестве материала покрытия выбираем медь. Эквивалентная форма экрана — сфера диаметром $D = 7,5$ см, откуда $A_{\phi} = 9,6$ дБ. Определяем собствен-

ные резонансные частоты экрана $\lambda_{0,рез} \approx 2D/m = 15; 7,5; 3,75; 3$ см и т. д. Рабочая длина волны клистрона попадает в спектр резонансных длин волн внутренней полости экрана. По графикам рис. 7.114 при $\lambda_0 \approx 3$ см находим $A_{рез} = 75$ дБ, по графикам рис. 7.113,а — приближенное значение $A_{отр} = 75$ дБ. Определяем $A_{погл} = A_{п} - A_{отр} + A_{\phi} + A_{рез} = 80 - 75 + 75 + 9,6 \approx 90$ дБ. Из графиков рис. 7.113,б при $A_{погл} = 90$ дБ находим толщину медного покрытия $l_0 \approx 8$ мкм.

Расчет диэлектрических и поглощающих экранов дан в [7].

7.12. АНТЕННЫЕ УСТРОЙСТВА СВЧ [27, 30]

Параметры. Диаграмма направленности (ДН) (рис. 7.115) — угловое распределение мощности излучения в пространстве; различают ДН в плоскости вектора напряженности электрического поля (плоскость E) или в плоскости вектора напряженности магнитного поля (плоскость H); приближенно характеризуется шириной главного лепестка по половинной мощности ($2\theta_{0,5P}$).

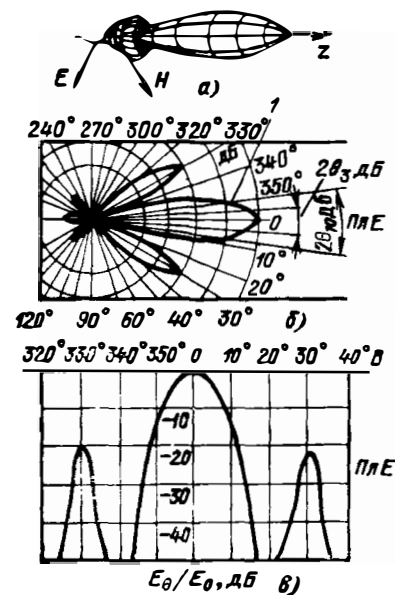


Рис. 7.115. Диаграммы направленности антенны: а — пространственная; б — в полярной системе координат (1 — главный лепесток); в — в прямоугольной системе координат

Коэффициент направленного действия (КНД) $G = P/P_{ср}$ — отношение мощности излучения в данном направлении к средней мощности излучения по всем направлениям; в качестве заданного направления обычно выбирается направление максимума ДН; $G \approx 27 \cdot 10^3 (2\theta_E 2\theta_H)^{-1}$, где $2\theta_E, 2\theta_H$ — ширина ДН по половинной мощности соответственно в плоскостях E и H.

Коэффициент усиления (КУ) — отношение максимальной мощности излучения данной антенны к максимальной мощности эталонной антенны (изотропный излучатель, диполь), к которой подводится та же мощность; $KУ = \eta G$, где η — КПД антенны, равный отношению излучаемой мощности к подводимой.

Уровень боковых лепестков ДН — отношение мощности в максимуме боковых лепестков к мощности в главном направлении.

Поляризация — ориентация вектора напряженности электрического поля антенны в пространстве. Различают антенны с линейной поляризацией — горизонтальной или вертикальной (по отношению к земной поверхности); с эллиптической поляризацией — две (A_1) и (A_2) ортогональные компоненты поля с некоторым фазовым сдвигом $\Delta\phi$; частный случай — круговая поляризация ($A_1 = A_2, \Delta\phi = \pm 90^\circ$) правого (вектор напряженности электрического поля волны вращается по часовой стрелке при распространении и при наблюдении от антенны) и левого (против часовой стрелки) направлений вращения.

Эффективная площадь $S_{эф} = G\lambda^2/4\pi$. Коэффициент использования поверхности $K = S_{эф}/S$, где S — площадь раскрытия антенны.

Входное сопротивление ($Z_A = R_A + jX_A$) — отношение напряжения к току на зажимах антенны.

Коэффициент бегущей (стоячей) волны КБВ (КСВ) характеризует степень согласования антенны с фидерным трактом: $KБВ = \frac{1-|\Gamma|}{1+|\Gamma|}$, где $|\Gamma|$ — модуль коэффициента отражения.

Вибраторные антенны. Простейшие типы: симметричный вибратор, шлейф-вибратор Пистолкорса (рис. 7.116).

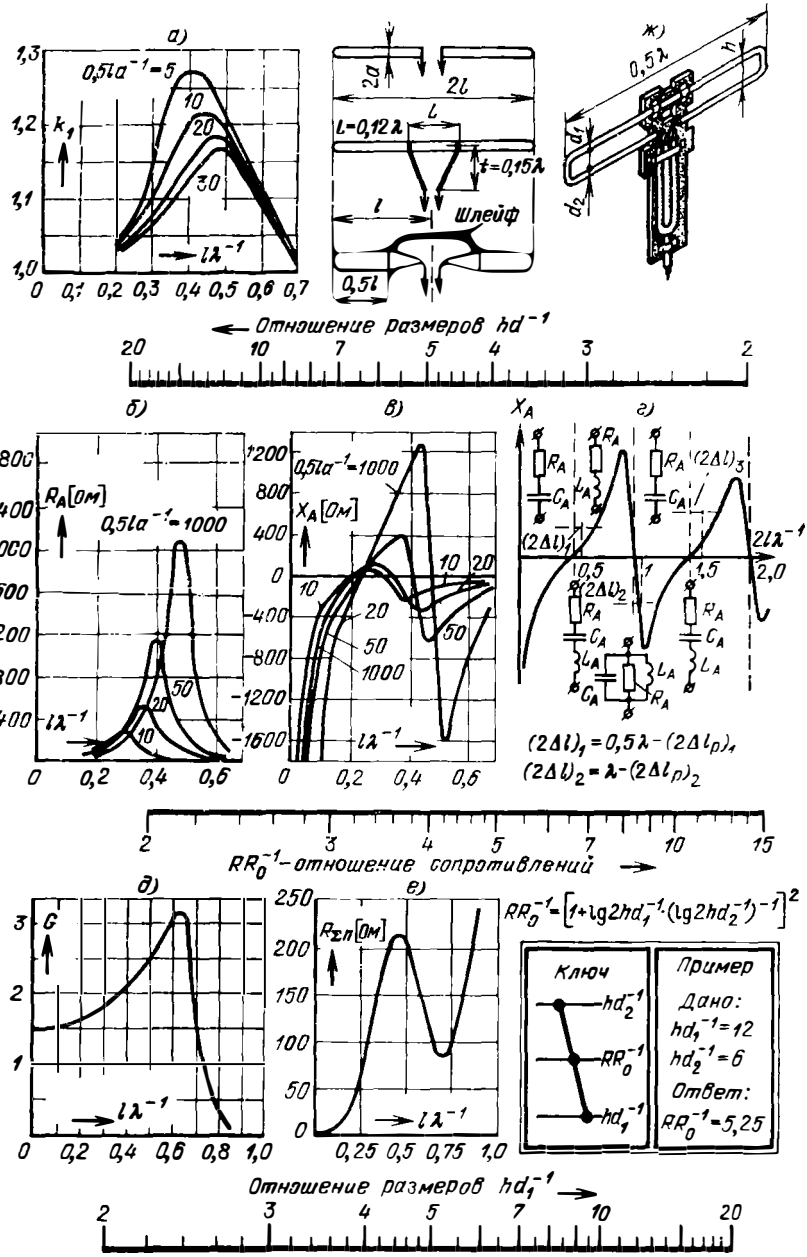


Рис. 7.116. Симметричный вибратор

Симметричный цилиндрический вибратор. ДН: $f(\theta) = \frac{1}{\sin \theta} \times [\cos(kl \cos \theta) - \cos kl]$; эквивалентное волновое число $\beta = k_1(2\pi/\lambda)$, где k_1 — поправочный коэффициент (рис. 7.116,а); зависимость КНД (G) от l/λ — на рис. 7.116,г, при $2l = 0,5\lambda$ (полуволновый вибратор) $G = 1,64$; экспериментальные кривые составляющих входного импеданса цилиндрического вибратора R_A и X_A — на рис. 7.116,б, в; зависимость сопротивления излучения $R_{\Sigma\Omega}$ — на рис. 7.116,д; расчет укорочения длины плеча вибратора Δl при резонансах ($X_A = 0$) и эквивалентные схемы вибраторной антенны — на рис. 7.116,е.

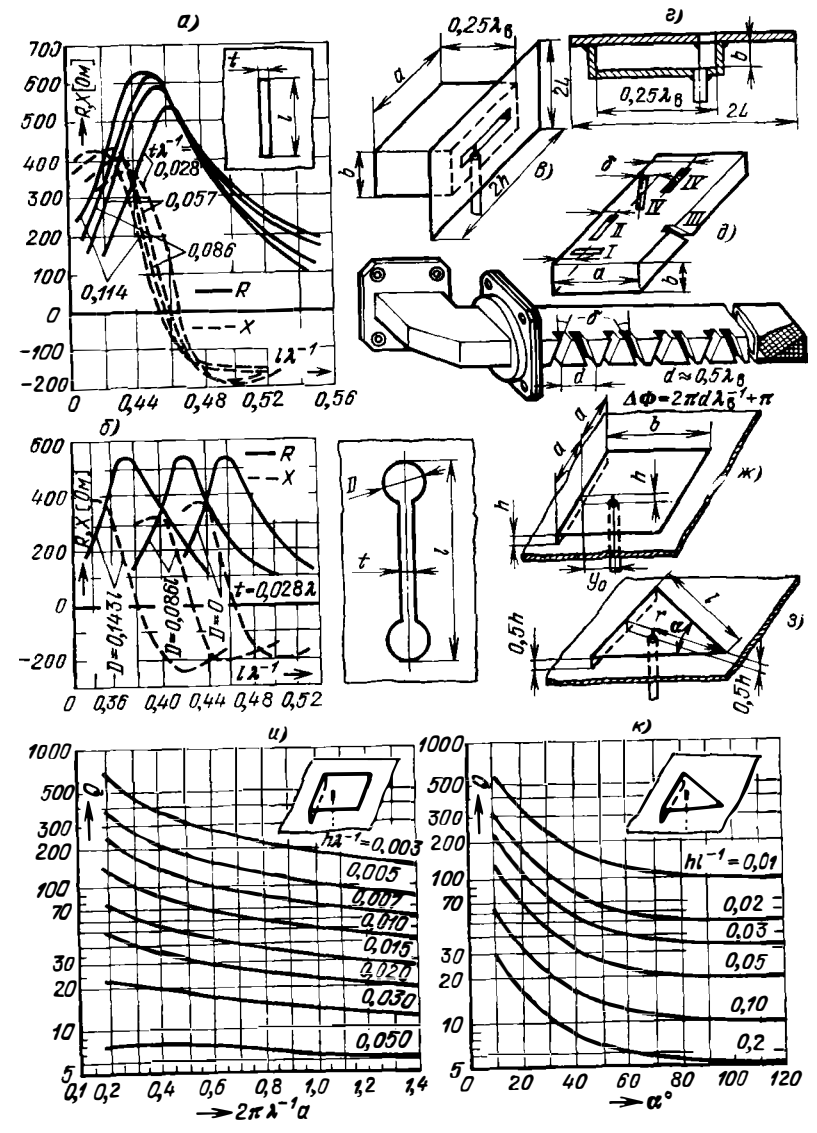


Рис. 7.117. Щелевые антенны

Шлейф-вибратор Пистолькорса (рис. 7.116,ж). Обладает повышенным входным сопротивлением R , расчет которого производится по номограмме рис. 7.116, где $R_0=73,1$ Ом — входное сопротивление полуволнового разомкнутого вибратора; при $d_1 \ll h$, $d_2 \ll h$ и $2l=0,5\lambda$: $Z_{вх} \approx (1 + a_{экс})^2 Z'_{вх}$; $a_{экс} = \lg(2h/a_1) \times [\lg 2h/a_2]^{-1}$; $Z'_{вх}$ — входной импеданс симметричного вибратора. Гео-

метрические размеры телевизионных антенн типа «волновой канал» — по табл. 7.33.

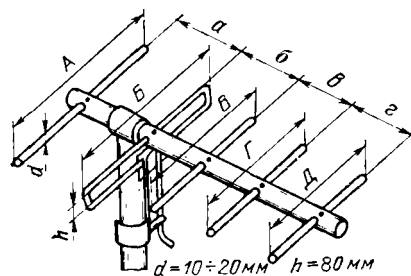
Щелевые антенны. Простейший тип — узкая прямоугольная щель в металлическом экране (рис. 7.117); экспериментальные кривые составляющих R_A , X_A входного импеданса показаны на рис. 7.117,а; для узких резонансных щелей $R_A \approx 500$ Ом; увеличение широкополосности достигается

использованием гантельных щелей (рис. 7.117,б); полуволновая щель в экране с резонатором на прямоугольном волноводе с волной H_{10} (рис. 7.117,в,г) возбуждается коаксиальной линией, подключенной на расстоянии l от края щели, $\sin^2(2\pi l/\lambda) = Z_\phi(1/R_{ш})$, где Z_ϕ — волновое сопротивление коаксиальной линии. Пример расположения щелей в широкой стенке прямоугольного волновода с волной H_{10} — на рис. 7.117,д;

эскиз конструкции решетки из наклонных щелей в узкой стенке прямоугольного волновода — на рис. 7.117,е (расчет ДН по известным α и $\Delta\Phi$ в [27]). В диапазоне метровых и дециметровых волн используются П-образные (рис. 7.117,ж) и V-образные (рис. 7.117,з) щелевые антенны, возбуждаемые полными резонаторами прямоугольной и треугольной формы [27]. Для П-образной щелевой антенны: $h \ll \lambda$, $b \approx 0,25\lambda$, $2a \approx 0,25\lambda$; сог-

Таблица 7.33

Геометрические размеры антенн типа «волновой канал», мм



Размер	Телевизионный канал											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Двухэлементная антенна												
<i>A</i>	3140	2680	2060	1870	1710	930	890	850	815	785	760	730
<i>B</i>	2560	2180	1700	1530	1400	760	730	700	670	640	620	595
<i>a</i>	900	760	590	535	490	270	255	240	230	225	220	215
Трехэлементная антенна												
<i>A</i>	3350	2840	2200	2000	1830	990	950	905	870	840	805	780
<i>B</i>	2760	2340	1790	1620	1510	815	780	745	720	690	665	640
<i>B</i>	2340	2000	1550	1400	1290	690	660	630	610	585	560	545
<i>a</i>	900	760	590	535	490	270	255	240	230	225	220	215
<i>б</i>	600	510	395	355	330	180	170	160	155	150	145	140
Пятиэлементная антенна												
<i>A</i>	3130	2650	2060	1870	1710	840	840	800	760	700	710	680
<i>B</i>	2760	2340	1790	1620	1510	730	690	680	660	605	580	550
<i>B</i>	2510	2130	1650	1500	1370	720	680	660	640	610	580	560
<i>Г</i>	2490	2100	1630	1485	1360	720	680	660	610	610	580	560
<i>Д</i>	2430	2060	1600	1450	1330	700	660	650	610	610	570	530
<i>a</i>	1200	1030	790	720	660	325	310	300	290	260	260	240
<i>б</i>	730	620	480	435	400	210	210	210	160	190	190	250
<i>в</i>	700	590	460	420	380	500	530	490	450	445	390	385
<i>з</i>	740	625	485	440	400	420	365	370	380	315	350	340

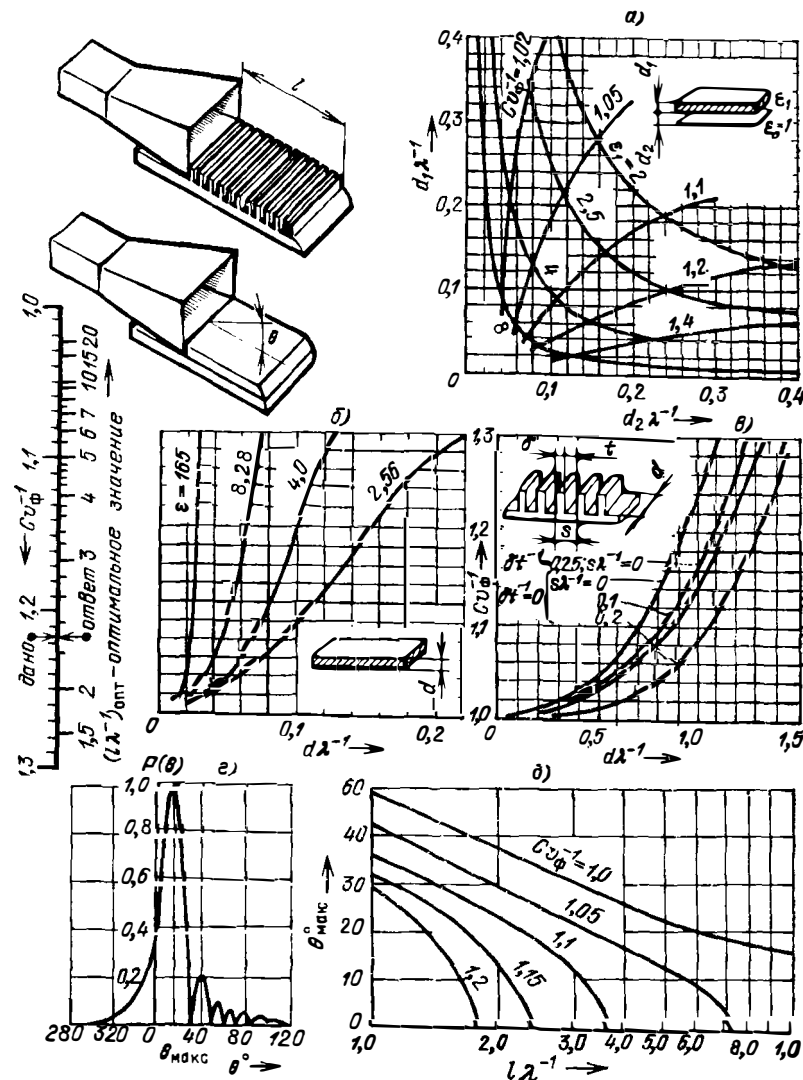


Рис. 7.118. Антенны поверхностных волн

ласование с фидером достигается изменением размеров b и y_0 при заданной величине добротности Q (рабочей полосе частот); по графикам и рис. 7.117, e — определяется минимальное значение h . Для V-образной щелевой антенны (рис. 7.113, $э$) резонансная частота определяется из условия $J_0(kl_0) = 0$, где $l_0 \approx 1 + 0,5h$; $J_0(x)$ — функция Бесселя нулевого порядка; величина Q определяется по рис. 7.117, $к$.

Антенны поверхностных волн относятся к классу антенн бегущей волны; примеры — диэлектрическая пластина над металлической плос-

костью, гофрированная металлическая структура (рис. 7.118). Направленные свойства определяются значениями l/λ , C/v_ϕ ; расчет C/v_ϕ — по графикам рис. 7.118, a — $в$; оптимальная длина антенны (l/λ) — по номограмме рис. 7.118; максимум ДН отклонен от оси на угол θ_{max} (рис. 7.118, $г$), величина которого определяется по рис. 7.118, $д$. Ширина ДН по уровню r и КНД вычисляются по номограмме рис. 7.118 [30].

Спиральные антенны выполняются в виде цилиндрической или конической спирали из металлического проводника с постоянным или перемен-

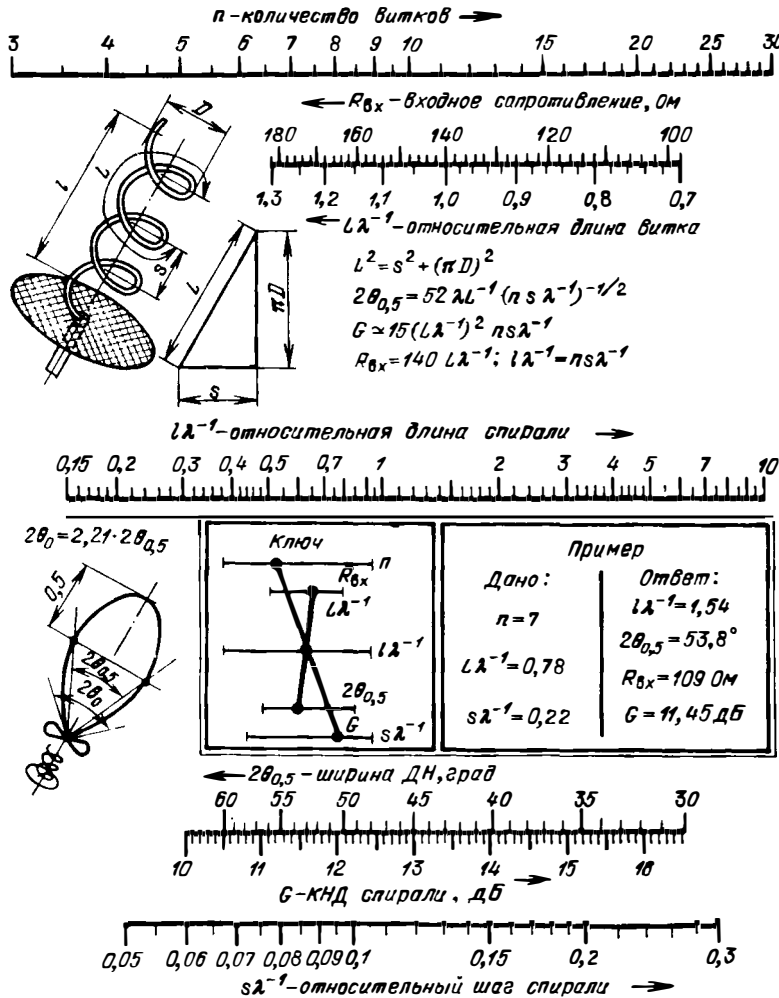


Рис. 7.119. Спиральная цилиндрическая антенна с плоским экраном

ным шагом намотки; возбуждаются коаксиальной линией. Режимы работы — ненаправленного ($nL/\lambda \ll 1$) и осевого ($l/\lambda \approx 1$) излучения. В режиме ненаправленного излучения ДН аналогична ДН вибраторной антенны; условие круговой поляризации $\tan \alpha = 0,5\pi(D/\lambda)$. Расчет электрических характеристик цилиндрических спиральных антенн в режиме осевого

излучения по заданным n , L/λ , s/λ при $n > 3,75 < L/\lambda < 1,3$, $12^\circ < \alpha < 16^\circ$ производится по номограмме и формулам рис. 7.119 [30].

Рупорные антенны представляют собой отрезок волновода с плавно увеличивающимся сечением. Рупоры с максимальным коэффициентом усиления при заданной длине и размерах раскрыва являются оптимальными.

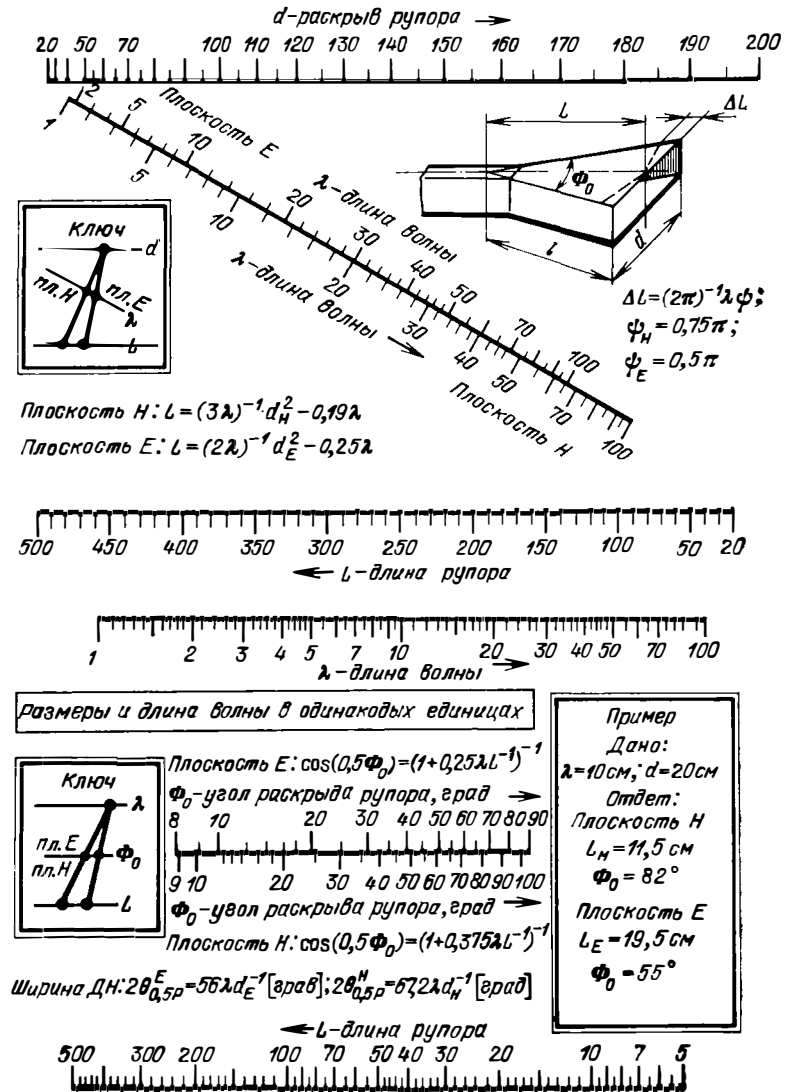


Рис. 7.120. Номограмма для расчета Е- и Н-плоскостных секториальных рупорных антенн

Условия оптимальности: фазовая ошибка на краях раскрыва рупора в плоскостях E и H для секториальных рупоров $\Psi_H = 0,75\pi$, $\Psi_E = 0,5\pi$, для конического рупора с волной H_{11} $\Psi = 0,6\pi$. Расчет электрических параметров и размеров оптимальных секториальных рупоров — по рис. 7.120; для конического рупора — по рис. 7.121 [30].

Зеркальные антенны представляют собой систему из облучателя (слабо-

направленная антенна) и металлического отражателя (зеркала), форма которого определяется требованиями к ДН. Основные типы зеркал: плоские, параболические, специальной формы.

Параболические антенны. Различают однозеркальные, двухзеркальные (рис. 7.122). Параболоид вращения. Параметры: D — диаметр раскрыва параболоида; F — фокусное расстояние; H — высота параболоида; Φ_0 —

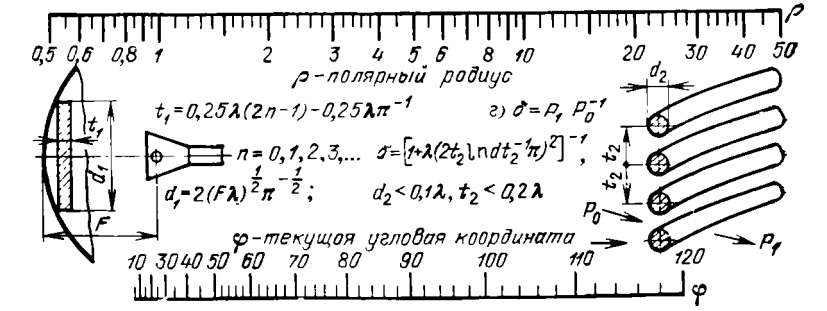
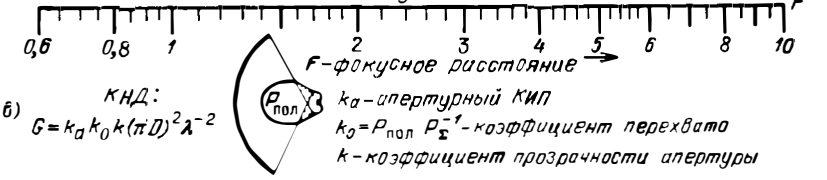
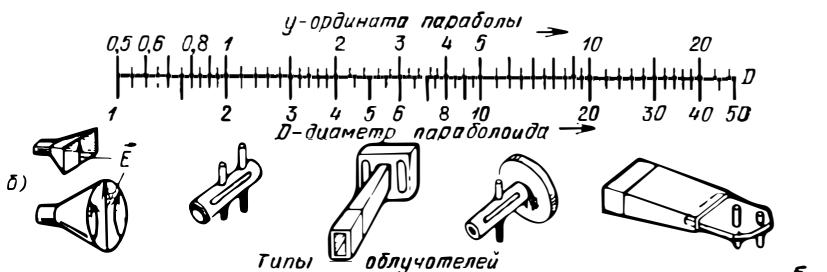
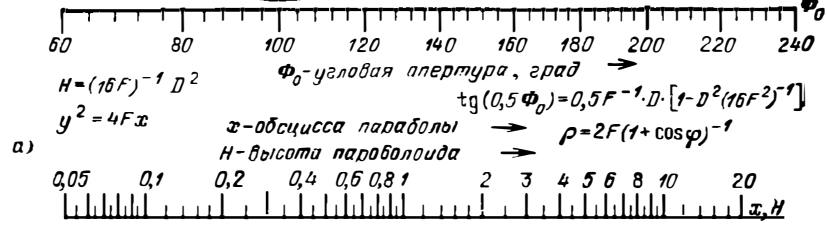
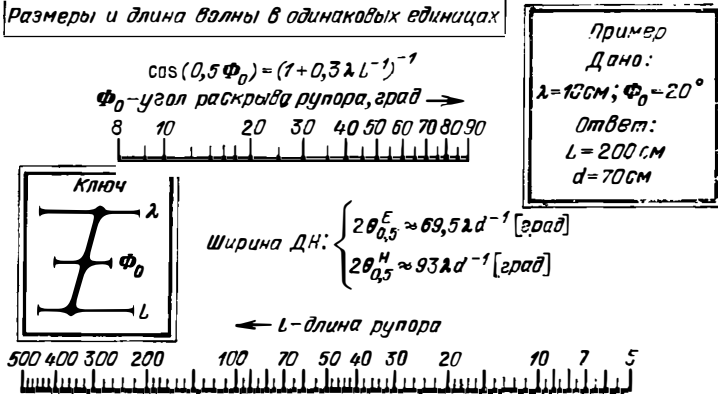
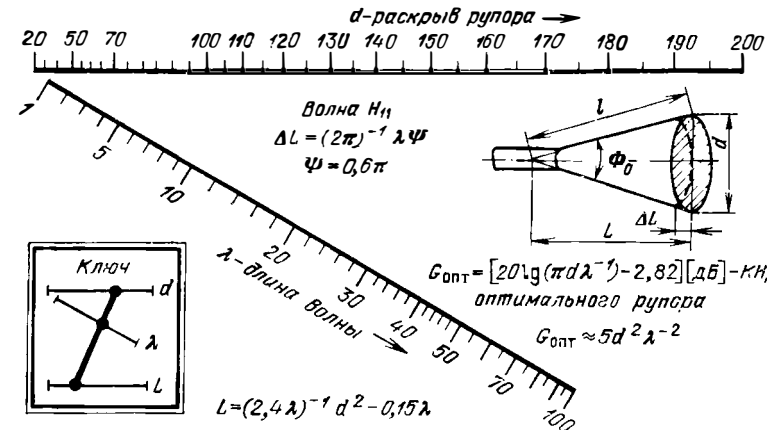
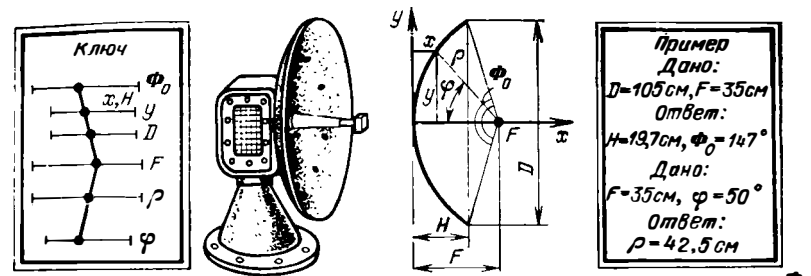


Рис. 7.123. Номограммы для расчета однозеркальной параболической антенны

Рис. 7.121. Номограмма для расчета конических рупорных антенн

угол раскрытия; зеркала — длиннофокусные ($\Phi_0 < 90^\circ$), короткофокусные ($\Phi_0 > 90^\circ$); расчет геометрии зеркала — по номограмме рис. 7.123,а [30]. Основные типы облучателей даны на рис. 7.123,б; реакция зеркала

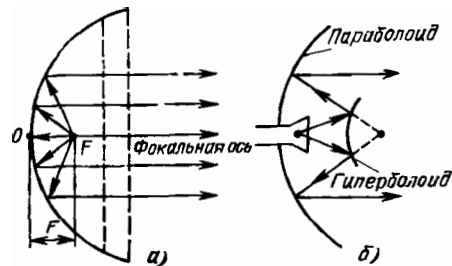


Рис. 7.122. Однозеркальная (а) и двухзеркальная (б) параболические антенны

ла — явление воздействия отраженной от зеркала волны на облучатель; простейшие методы устранения реакции зеркала — отверстие в центральной части; диск у вершины; вынос облучателя из области поля зеркала; поворот плоскости поляризации с помощью тонких параллельных металлических пластин шириной 0,25λ, расположенных под углом 45° к плоскости Е облучателя. При выполнении зеркала из металлических проводников коэффициент просачивания энергии определяется по рис. 7.123,в. ДН имеет игольчатую форму, ширина по половинной мощности $2\theta_{0,5P} \approx 70\lambda/D$, КНД $G = K(\pi D)^2/\lambda^2$, где $K = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6$ ($0 < K < 1$) — коэффициент использования поверхности, определяемый: K_1 — реакция зеркала (рассчитывается по КСВН облучателя, $K_1 = 1 - \left(\frac{КСВН - 1}{КСВН + 1}\right)^2$; K_2 —

активными потерями в тракте облучателя (КПД тракта и потерями при отражении от поверхности зеркала ($\leq 1\%$); K_3 — доля энергии облучателя, падающей на зеркало (при облучении края зеркала по уровню 10 дБ $K_3 = 0,834$; при 20 дБ $K_3 = 0,94$); K_4 — неточностью установки фазового центра облучателя в фокусе параболоида (для $F/D = 0,5$; 0,333; 0,25 и смещении вдоль фокальной оси на величину 0,1λ $K_4 = 0,996$; 0,98; 0,93; при смещении 0,2λ $K_4 = 0,98$; 0,9; 0,78); K_5 — ошибками основной поверхности зеркала (при

среднеквадратической ошибке поверхности 0,02; 0,1; 0,2; 0,4 среднеквадратическое значение $K_5 = 0,999$; 0,998; 0,99; 0,96); K_6 — затенением облучателя (при $d/D = 0,05$; 0,1; 0,2 $K_6 = 0,99$; 0,956; 0,835, где d — диаметр раскрытия облучателя).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красюк Н. П. Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Высшая школа, 1973.
2. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. — М.: Высшая школа, 1974.
3. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/Под редакцией Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1980.
4. Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ/Под ред. Д. М. Сазонова. — М.: Высшая школа, 1981.
5. Фельдштейн А. Л., Явич Л. А., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. — М.: Сов. радио, 1967.
6. Воробьев Е. А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. — Л.: Судостроение, 1980.
7. Воробьев Е. А. Экранирование СВЧ конструкций. — М.: Сов. радио, 1979.
8. Гроднев И. И. Направляющие системы передачи электромагнитных сигналов. — М.: Связь, 1975.
9. Белоруссов Н. И., Гроднев И. И. Радиочастотные кабели. — М.: Энергия, 1973.
10. Бергер М. Н., Капилевич Ю. Ю. Прямоугольные волноводы с диэлектриками. — М.: Сов. радио, 1973.
11. Краткий справочник конструктора РЭА/Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1972.
12. Волюновы дальней связи/Под ред. Н. П. Керженцевой. — М.: Связь, 1972.
13. Конструирование и расчет полосковых устройств/Под ред. И. С. Ковалева. — М.: Сов. радио, 1974.
14. Полосковые линии и устройства СВЧ/Под ред. В. М. Седых. — Харьков: Вища школа, 1974.
15. Малорацкий Л. Г. Микроинтеграция элементов и устройств СВЧ. — М.: Сов. радио, 1976.
16. Авдеев Е. В., Поталов В. И. Номограммы для связанных откры-

тых микрополосковых линий. — Радиотехника, 1968, т. 28, № 9.

17. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств/Под ред. В. И. Вольмана. — М.: Радио и связь, 1982.

18. Полосковые платы и узлы: Проектирование и изготовление/Под ред. Е. П. Котова и В. Д. Каплуна. — М.: Сов. радио, 1979.

19. Райцын Д. Г. Электрическая прочность СВЧ узлов. — М.: Сов. радио, 1977.

20. Инженерно-технический справочник по электросвязи: Радиорелейные линии. — М.: Связь, 1970.

21. Конструкции СВЧ устройств и экранов/Под ред. А. М. Чернушенко. — М.: Радио и связь, 1983.

22. Базарова Ф. Ф. Органические и неорганические полимеры в конструкциях РЭА. — М.: Сов. радио, 1974.

23. Черняк К. И. Неметаллические материалы в судовой электро- и ра-

диотехнической аппаратуре: Справочник. — Л.: Судостроение, 1970.

24. Воропаева В. Г. Расчет и конструирование вращающихся сочленений. — М.: МАИ, 1962.

25. Элштейн А. Г. Измерительная аппаратура сверхвысоких частот. — Л.: Судостроение, 1965.

26. Изюмова Т. И., Свиридов В. Т. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. — М.: Энергия, 1975.

27. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства. — М.: Сов. радио, 1974.

28. Joines W. T. A. A continuously variable dielectric phase shifter. — IEEE Tr., 1971, MTT-19, № 8, p. 729—734.

29. Вамберский М. В., Абрамов В. П., Казанцев В. И. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ. — М.: Радио и связь, 1982.

30. Родионов В. М. Линии передачи и антенны СВЧ: Сборник номограмм. — М.: Сов. радио, 1965.

8. ЭЛЕМЕНТЫ И РАБОЧИЕ ВЕЩЕСТВА СОТР

Основные аббревиатуры

АС	— аэродинамическое сопловентиление
БК	— бак компенсационный
ВН	— вентилятор
ВЧ, СВЧ	— высокочастотный, сверхвысокочастотный
ГС	— гидравлическое сопловентиление
ВФ, ЖФ	— воздушный и жидкофидельные фильтры
ДТС	— двухфазный термосифон
КПД	— коэффициент полезного действия
КР	— клапан разьема
НС	— насос
РВ, ОВ	— радиальный и осевой вентиляторы
СА	— соединительная арматура
СВО	— система воздушного охлаждения
СЖО	— система жидкостного охлаждения
СОТР	— система обеспечения теплового режима
СПВ, СПЖ	— сигнализаторы потока воздуха и жидкостной

СТ, СД	— сигнализаторы температуры и давления
СУЖ	— сигнализатор уровня жидкости
ТО ВВ, ВЖ, ЖЖ	— теплообменник воздухо-воздушный, воздухо-жидкостной, жидкостно-жидкостный
ТН	— теплоноситель
ТП	— трубопровод
ТТ	— тепловая труба
ТЭН	— трубчатый электронагреватель

ЦН, ЦНГ	— центробежный насос обычного и герметичного исполнения
ШН	— шестеренный насос
ЭД	— электродвигатель
ЭЛ	— элемент (часть системы)

Основные обозначения

G_g, G_p	— поток газа или жидкости (v — объемный, m^3/c , $m^3/ч$; ρ — массовый, $кг/с$, $кг/ч$)
g_g, g_p	— удельный поток газа

	или жидкости (ν — объемный $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{кВт})$; ρ — массовый, $\text{кг}/(\text{ч}\cdot\text{кВт})$)
$P_{\text{п}}, P_{\text{ст}}, P_{\text{дин}}$	— полное, статическое и динамическое давление вентилятора (избыточное по отношению к атмосферному давлению, $\text{кгс}/\text{м}^2$, Па)
$P_{\text{в.вх}}, P_{\text{в.вых}}$	— давление на входе в насос (подпор) и на выходе из него (напор), $\text{кгс}/\text{см}^2$, Па
ν	— скорость теплоносителя в магистралях СОРТ, $\text{м}/\text{с}$
L_p	— уровень акустической мощности машины, ДБ
d_y	— условный диаметр трубопровода, мм
M	— масса элемента СОРТ, кг
N, N_0	— мощность, потребляемая электроприводом из сети и на валу электропривода, Вт
$N_{\text{в}}, N_{\text{н}}$	— полезная мощность вентилятора и насоса, Вт
$N_{\text{ак}}$	— акустическая мощность машины, Вт
C_p	— удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$
Φ	— поток тепловой энергии или рассеиваемая РЭА мощность, отводимые СОРТ, Вт
$\eta_{\text{в}}, \eta_{\text{д}}$	— КПД вентилятора и насоса
η_{Σ}	— КПД машины с учетом потерь в электроприводе, %
$\theta_{\text{вх}}, \theta_{\text{вых}}$	— температура теплоносителя на входе и выходе элемента СОРТ или РЭА, К
$\theta_{\text{в.доп}}$	— предельно допустимая температура воздуха в РЭА, К
$\Delta\theta$	— перепад температур
φ	— эффективность пылеулавливания, $\text{г}/\text{м}^3$
τ	— время выхода в заданный температурный режим СОРТ (время готовности), с, мин
ΔP	— потери давления в магистралях и элементах

СОТР, $\text{кгс}/\text{м}^2$, $\text{кгс}/\text{см}^2$, Па
 $f, \Delta f$ — частота (диапазон частот), Гц
 ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
 λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$
 ν — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$
 β — коэффициент объемного расширения, $1/\text{К}$

Техническая атмосфера 1 (ат, $\text{кгс}/\text{м}^2$) = $9,81 \cdot 10^4$ Па; 1 Па = $1,02 \times 10^{-5}$ $\text{кгс}/\text{см}^2$; 1 $\text{кгс}/\text{м}^2$ = 9,81 Па; 1 Па = 0,102 $\text{кгс}/\text{м}^2$. 1 $\text{м}^3/\text{ч}$ = $2,78 \times 10^{-4}$ $\text{м}^3/\text{с}$; 1 $\text{м}^3/\text{с}$ = 3600 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Основные положения

Элементы, применяемые в СОРТ РЭА, должны иметь минимально возможные габариты и массу, быть устойчивыми к воздействиям окружающей среды при эксплуатации на объекте-носителе, обладать высокой надежностью и простотой в обслуживании.

Количество и тип ЭЛ, входящих в СОРТ, зависят в первую очередь от выбранного типа СОРТ, поэтому целесообразно рассматривать ЭЛ совместно с соответствующей системой охлаждения.

Различают следующие основные системы охлаждения (в зависимости от используемого в них теплоносителя — газа или жидкости): воздушные (СВО) и жидкостные (СЖО). СВО охлаждают РЭА принудительной вентиляцией, теплоноситель в этих системах — воздух (иногда азот или другой инертный газ). СЖО обеспечивают охлаждение и термостабилизацию РЭА за счет принудительной циркуляции жидкости в конструкциях с повышенным тепловыделением; ТН — антифризы, полиметилсилоксановые и фторсодержащие жидкости, вода. В некоторых случаях применяются локальные испарительные системы, снижающие температуру на отдельных тепловыделяющих поверхностях РЭА за счет испарения теплоносителя (спирты, вода, ацетон, фреоны).

В связи с тем, что в нормативных документах давление указано преимущественно в ат. ($\text{кгс}/\text{см}^2$), данные в таблицах и тексте приведены в такой же размерности.

8.1. СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Различают СВО приточные (рис. 8.1), вытяжные (рис. 8.2) и смешанные. В приточных СВО с протяженными магистралями применяют, как правило, высоконапорные РВ. В вытяжных, а также смешанных и де-

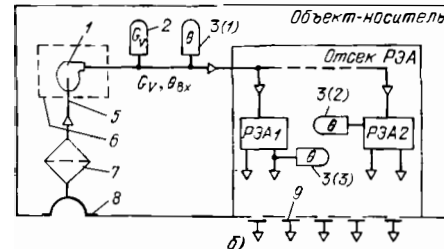
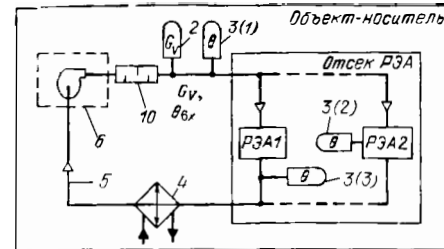


Рис. 8.1. Принципиальная схема централизованной приточной СВО: а — замкнутого типа; б — разомкнутого типа; 1 — радиальный вентилятор; 2 — сигнализатор потока воздуха; 3 — сигнализаторы температуры; 4 — теплообменник; 5 — воздухопод; 6 — звукопоглощающая камера; 7 — воздушный фильтр; 8 — воздухозаборник; 9 — отверстия для выброса нагретого воздуха; 10 — глушитель шума (устанавливается при необходимости)

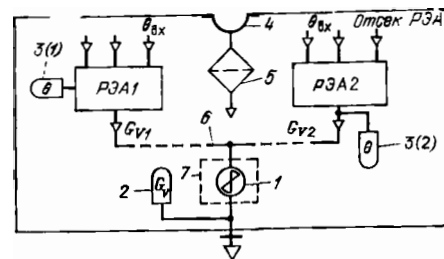


Рис. 8.2. Принципиальная схема вытяжной СВО: 1 — осевой вентилятор; 2 — сигнализатор потока воздуха; 3 — сигнализаторы температуры; 4 — воздухозаборник; 5 — воздушный фильтр; 6 — воздухопод; 7 — звукопоглощающая камера

централизованных СВО со сравнительно короткими распределителями воздуха чаще используют ОВ.

На выбор СВО влияет конструкция отсека для РЭА. Например, в герметичном отсеке небольших размеров целесообразно использовать СВО замкнутого типа с удалением выделяемой мощности через ТО. Если отсек велик и используется децентрализованная компоновка РЭА, то целесообразна децентрализованная СВО (рис. 8.3).

Контроль исправной работы СВО осуществляется с помощью СПВ и СТ.

Основные параметры СВО.
 1. Расход охлаждающего воздуха $G_{\text{в}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, при $\theta_{\text{вх}}$, необходимый для отведения от РЭА мощности Φ при условии $\theta_{\text{вых}} \leq \theta_{\text{в.доп}}$, приближенно определяется по графику (рис. 8.4) и формуле

$$G_{\text{в}} = 10^{-3} g_{\text{в}} \Phi$$

2. Давление напорных агрегатов СВО на входе в магистрали для распределения ТН.

3. Устойчивость к заданным дестабилизирующим воздействиям.

4. Масса и габариты отдельных ЭЛ и СВО в целом.

5. Срок службы и надежность СВО.

Вентиляторы — это гидравлические машины, подающие воздух или газ потребителям с повышением абсолютного полного давления не более чем на 20%. В качестве привода ВН, как правило, служит асинхронный ЭД, связь с которым может быть как непосредственной, так и через редукторную или ременную передачу. Получили распространение ВН, конструктивно объединенные с ЭД и называемые электровентиляторами.

ВН разделяют: по конструктивному признаку (радиальные, осевые и пропеллерные); по величине развиваемого давления (низкого до $100 \text{ кгс}/\text{м}^2$, среднего $100 \dots 300 \text{ кгс}/\text{м}^2$ и высокого, свыше $300 \text{ кгс}/\text{м}^2$); по типу электропривода (трехфазного переменного тока с $f=50$ Гц; $U_{\text{пит}}=115/220, 127/220$ В; трехфазного переменного тока с $f=50$ Гц; $U_{\text{пит}}=220/380, 127/220$ В и постоянного тока $U_{\text{пит}}=27$ В).

Основные параметры ВН [1].
 1. Производительность (объемный расход газа $G_{\text{в}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{м}^3/\text{с}$, при нор-

мальном давлении и температуре на входе в ВН).

2. Полное давление P_n , кгс/м², Па (напор или разность абсолютных полных давлений потока за ВН и перед ним). $P_n = P_{ст} + P_{дин}$, (где $P_{дин} =$

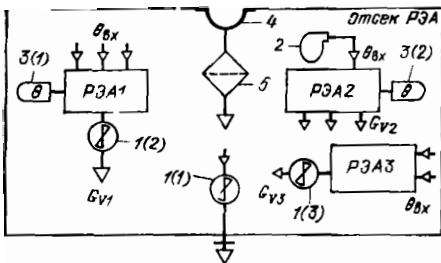


Рис. 8.3. Принципиальная схема децентрализованной приточно-вытяжной СВО: 1 — осевые вентиляторы; 2 — радиальный вентилятор; 3 — сигнализаторы температуры; 4 — воздухозаборник; 5 — воздушный фильтр

$= 0,5\rho v^2$; v — скорость потока на выходе из ВН; ρ — плотность газа; при работающем ВН с заглушкой на выходном отверстии $P_{дин} = 0$, $P_{ст} = P_n$.

3. Мощность, потребляемая элект-

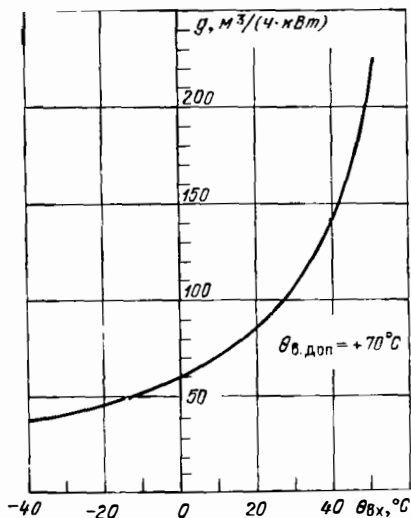


Рис. 8.4. Зависимость $g = f(\theta_{вх})$, используемая при оценке параметров СВО (g — удельный расход охлаждающего воздуха, приходящийся на 1 кВт рассеиваемой РЗА мощности)

роприводом от сети N , на валу электропривода N_n и полезная мощность ВН $N_p = G_v P_n$, Вт.

4. КПД ВН: $\eta_n = N_n/N_n$; с учетом потерь в электроприводе $\eta_{\Sigma} = N_p/N_n$.

5. Подогрев воздуха внутри самого ВН $\Delta\theta = \theta_{вых} - \theta_{вх}$, К, °С.

6. Уровень акустической мощности ВН $L_p = 10 \lg (N_{ак} 10^{12})$, где $N_{ак}$ — акустическая мощность ВН (без учета электропривода), Вт.

Взаимосвязь основных параметров, представленная графически, — аэродинамическая характеристика ВН, строится по результатам аэродинамических испытаний в соответствии с ГОСТ 10921—74.

Радиальный вентилятор (РВ) представляет собой лопаточное турбинное колесо, помещенное в спиральный корпус и имеющее электрический привод [2]. Количество подаваемого

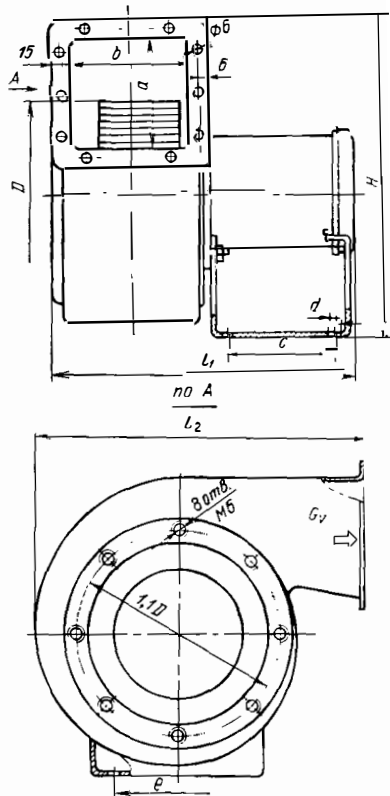


Рис. 8.5. Общий вид радиального вентилятора

воздуха и его давление определяют-ся размерами ВН, частотой вращения турбинного колеса и мощностью электропривода. РВ проектируются и изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 10616—73 и 5976—73.

Общий вид РВ показан на рис. 8.5. Как пример, на рис. 8.6 даны аэродинамические характеристики для РВ № 2 из табл. 8.1. Параметры N , P_n и G_v этой таблицы указаны для рабочей точки.

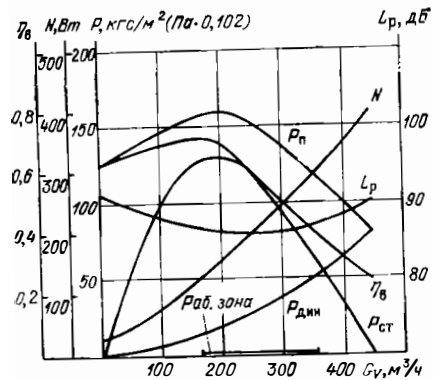


Рис. 8.6. Аэродинамические характеристики радиального вентилятора № 2 из табл. 8.1

Осевой вентилятор (ОВ) представляет собой лопаточное колесо пропеллерного типа, установленное в цилиндрический корпус и имеющее электропривод.

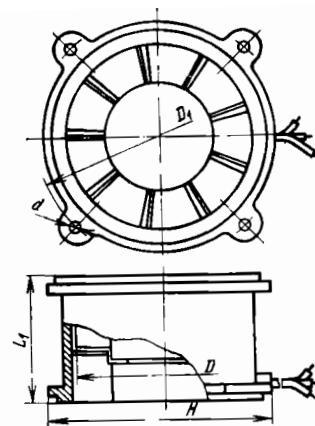


Рис. 8.7. Общий вид осевого вентилятора

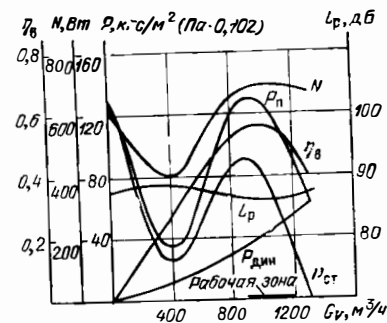


Рис. 8.8. Аэродинамические характеристики осевого вентилятора № 4 из табл. 8.2

Таблица 8.1

Технические параметры характерных РВ

Вариант	N, Вт	P _п , кгс/м ²	G _v , м ³ /ч	M, кг	L _p , дБ	D, мм	Размеры РВ, в % от D						d, мм	Электропривод	Соединение с РВ	
							H	L ₁	L ₂	a	b	c				e
1	60	90	120	1,9	80	82	173	164	172	43	43	60	100	7	На одном валу	
2	200	150	250	3,5	85	90	170	210	200	72	55	90	110	9	То же	
3	250	130	400	4,8	80	125	200	210	180	76	60	60	90	9	»	
4	350	180	320	5,8	85	110	170	180	185	75	58	70	80	9	»	
5	1000	220	1000	15,0	90	160	190	175	200	78	62	50	60	9	»	
6	1600	290	1400	19,0	90	180	190	170	180	78	62	60	90	11	»	

Примечания: 1. с, e и d — размеры крепления ВН.
2. Частота питания электропривода $f = 400$ Гц, напряжение 200, 220 В.

Таблица 8.2

Технические параметры характерных ОВ

Вариант	N, Вт	P _ц , кгс/м ²	G _v , м ³ /ч	M, кг	L _р , дБ	D, мм	Размеры ОВ, в % от D			Соединение электропривода с ОВ
							H	L ₁	D ₁	
1	30	35	120	0,3	75	62	120	70	—	Встроенный
2	50	50	180	0,45	75	70	120	65	—	»
3	100	55	500	2,5	80	112	130	110	135	На одном валу
4	700	130	1000	3,0	85	122	140	82	130	Встроенный
5	1000	140	2000	12,5	90	198	130	110	130	На одном валу

Примечания. 1. Для №№ 1 и 2 крепление к конструкции хомутом за корпус, для 3—5 болтами (размеры крепления D₁ и d).
2. Напряжение питания электропривода 220 В, частота 400 Гц.

Давление, создаваемое ОВ, ниже, чем у РВ (при одинаковой N), но производительность больше за счет пониженного внутреннего сопротивления потоку воздуха. Величина M/N у ОВ меньше, чем у РВ. ОВ проектируются и изготавливаются в соответ-

ствии с требованиями ГОСТ 10616—73 и 11442—74.

Общий вид ОВ показан на рис. 8.7. Как пример, на рис. 8.8 даны аэродинамические характеристики для ОВ № 4 из табл. 8.2.

Выбор ВН. При выборе принципиальной схемы СВО определяется тип ВН (РВ или ОВ), а также его электропитание.

На основании требований к охлаждению РЭА устанавливается расход и температура ТН. Затем из расчета или экспериментально находится аэродинамическая характеристика сети, состоящей из разводки воздушных магистралей СВО, включая воздухораспределители РЭА. Характеристика сети — зависимость потерь полного давления от расхода $\Delta P = f(G_v)$. При выборе ВН совмещают характеристику сети и характеристики ВН имеющихся типоразмеров (рис. 8.9). Значение расхода G_{v1} в точке пересечения этих характеристик соответствует расходу, создаваемому данным ВН при работе на сеть. Если $G_{v1} = (1 \dots 1,25) G_v^{РЭА}$, то ВН выбран правильно и пригоден для работы в СВО, если же нет, то необходимо подобрать другой типоразмер. В случае невозможности полу-

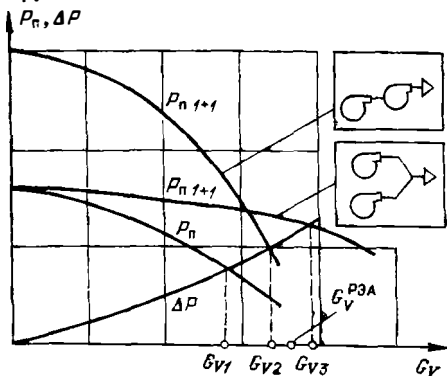


Рис. 8.9. К выбору вентилятора. $\Delta P = f(G_v)$ — характеристика сети; $P_n = f(G_v)$ — характеристика имеющегося вентилятора; $P_{n(1+1)} = f(G_v)$ — характеристика двух соединенных последовательно или параллельно вентиляторов; $G_v^{РЭА}$ — необходимый для охлаждения РЭА расход воздуха

чить требуемые G_v и P_n от одного из имеющихся ВН, используют две машины и более.

При последовательном соединении двух ВН $P_{\Sigma} \approx 2P_n$, а $G_{v\Sigma} \approx G_v$; при параллельном — $P_{\Sigma} \approx P_n$, а $G_{v\Sigma} \approx 2G_v$. На рис. 8.9 условие $G_{v1} = (1 \dots 1,25) G_v^{РЭА}$ выполняется для двух ВН, соединенных параллельно.

Шум ВН. Складывается из аэродинамического шума самого ВН и шума ЭД. Аэродинамический шум обусловлен пульсациями скорости и давления воздуха, возникающими при обтекании потоком рабочих лопаток и направляющих конструкций ВН, и характеризуется частотой звука 200...6000 Гц с наибольшей интенсивностью в диапазоне 700...1500 Гц [3]. Шум ЭД возникает из-за дисбаланса вращающихся частей, работы подшипников, щеток и крыльчатки охлаждения (400...4000 Гц).

Для количественной оценки шума ВН используются акустические характеристики по ГОСТ 12.2.028—77. Одна из них $L_p = f(G_v)$ — суммарный уровень звуковой мощности аэродинамического шума (рис. 8.6, 8.8), другая — спектры уровней звуковой мощности шума L_{pi} , определяемые отдельно на всасывании, нагнетании и вокруг ВН в октавных полосах с среднегеометрическими частотами от 66 до 8000 Гц, при постоянной частоте вращения ВН для разных значений G_v .

Суммарный уровень звуковой мощности шума для различных типов ВН 65...100 дБ; для одного и того же ВН уровень шума в рабочей зоне ниже, чем в остальных режимах.

Разрешенный уровень звуковой мощности при эксплуатации СВО составляет 65 дБ при частоте звука ≤ 400 Гц и 75 дБ при частоте звука ≥ 400 Гц.

Для уменьшения уровня шума ВН в СВО необходимо [4, 5]: использовать звукоизоляционные прокладки в точках крепления ВН и между фланцами воздухопроводов; устанавливать глушители шума на выходе ВН (рис. 8.10); оклеивать корпус ВН звукоизолирующим материалом, не нарушающим тепловой режим ЭД, или помещать ВН в специальную звукопоглощающую камеру.

К звукопоглощающим материалам относятся: органические, ($K_{звук} =$

$= 0,2 \dots 0,4$) — древесно-волоконные изделия, оргалит, фибролит; минеральные ($K_{звук} = 0,36 \dots 0,6$) — вата каменная, стеклянная, шлаковая, супертонкое стекловолокно, ультрасупертонкое базальтовое волокно, асбестовые и асбестоцементные изделия, вермикулит и др.; синтетические ($K_{звук} = 0,3 \dots 0,5$) — поропласт, пенополиуретан, губчатая резина и др. Эти материалы позволяют уменьшить уровень звуковой мощности в СВО до требуемого значения. Коэффициент звукопоглощения $K_{звук}$ — отношение поглощенной звуковой энергии ко всей падающей на единицу поверхности звуковой энергии.

Теплообменники

ТО обеспечивают передачу тепловой энергии от потока ТН с повышенной температурой к потоку ТН с пониженной температурой. Если между ТН имеется стенка, то такие ТО называются поверхностными, если стенки нет — смешительными. Если в процессе теплопередачи происходит испарение одного из ТН, ТО носит название испарительного [6]. В системах воздушного охлаждения применяются воздухо-воздушные (ВВ) и воздухо-жидкостные (ВЖ) теплообменники, в системах жидкостного охлаждения — жидкостно-жидкостные (ЖЖ) и воздухо-жидкостные ТО.

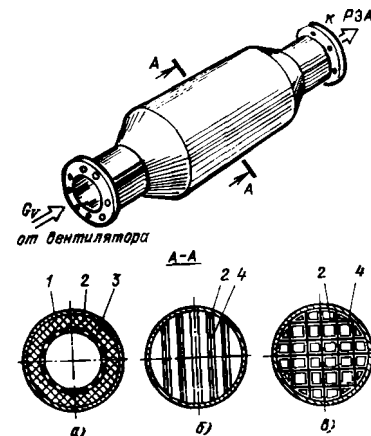


Рис. 8.10. Конструкция глушителя шума: а — трубчатого типа; б — пластинчатого типа; в — сотового типа; 1 — корпус глушителя; 2 — звукопоглощающий материал; 3 — сетка; 4 — разделительная перегородка

Основные параметры ТО.

1. Гидравлическая характеристика $\Delta P=f(G)$ жидкостных каналов ТО при выбранной температуре.

2. Аэродинамическая характеристика $\Delta P=f(G)$ воздушных магистралей ТО при выбранной температуре.

3. Предельно допустимые и рабочие величины P, G и θ .

4. Теплопередающая поверхность и коэффициент теплопередачи.

Через входной патрубок или штуцер ТН попадает в распределительную камеру ТО, а затем в каналы, где происходит теплообмен между горячим и холодным ТН через теплопередающую стенку. Движение ТН в ТО может быть навстречу, параллельно или перпендикулярно друг другу, в соответствии с чем различают ТО противоточные, прямоточные и с перекрестным током.

ВВ и ЖЖ ТО выполняются, как правило, с одинаковой поверхностью соприкосновения горячего и холодного ТН. ВЖ ТО имеют более развитую теплопередающую поверхность воздушных каналов, поскольку коэффициент теплообмена между стенкой и воздухом значительно ниже, чем между стенкой и жидкостью. Внешние воздушные магистрали соединяются с ТО с помощью фланцевого соединения, внешние жидкостные магистрали — с помощью соединения по наружному конусу (см. ГОСТ 13977—74). Материал конструкции — алюминиевые сплавы или нержавеющая сталь (рис. 8.11—8.13).

В табл. 8.3 приведены габаритные размеры и основные технические параметры характерных конструкций ВВ, ВЖ и ЖЖ ТО, используемых в системах охлаждения РЭА [7]. Величины АС и ГС приведены для указанного значения расхода ТН (воздуха и воды) при температуре 20°С;

масса ТО дана для конструкций из алюминиевых сплавов.

Выбор теплообменника. Решение о выборе типа ТО (ВВ, ЖЖ или ВЖ) принимается на ранних этапах проектирования СОТР и зависит от возможности создания контура вторичного ТН на объекте-носителе РЭА. Для выбора типоразмера ТО необходимо знать тип первичного и вторичного ТН в ТО; расходы ТН $G_{в1}, G_{в2}$; температуры на входе в ТО $\theta_{вх1}, \theta_{вх2}$ и потери давления в контурах ТО $\Delta P_{доп1}, \Delta P_{доп2}$; максимальную мощность тепловых потерь $\Phi_{РЭА}$.

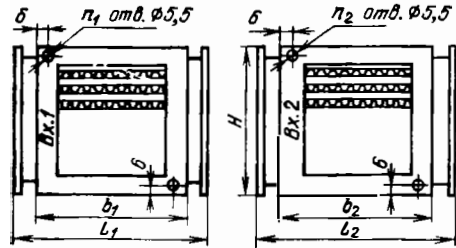


Рис. 8.11. Общий вид воздухо-воздушного теплообменника

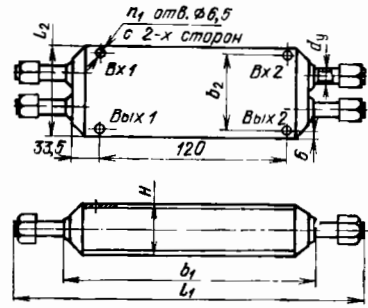


Рис. 8.12. Общий вид жидкостно-жидкостного теплообменника

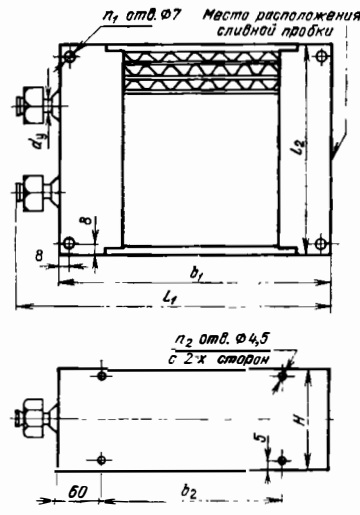


Рис. 8.13. Общий вид воздухо-жидкостного теплообменника

Таблица 8.3

Технические параметры характерных ТО

Тип ТО	Вариант	Поверхность теплопередачи $S, м^2$	Расход теплоносителя $G, м^3/ч$ для воздуха (для воды), не более	Коэффициент теплопередачи $K, Вт/м^2 \cdot ^\circ C$	Объем жидкостной полости, $\times 10^3 м^3$	М, кг	Каналы ТО (воздушные/жидкостные)		Размеры ТО, мм							
							давление, $кг/см^2$, не более	температура, $^\circ C$, не более	потери давления ΔP , $кг/см^2$, не более	L_1	L_2	b_1	b_2	n_1/n_2	d_y	
ВВ	1	1,0	400	85	—	3,0	2,0	0,005	0,005	165	175	165	130	12/10	—	8
	2	4,0	700	85	—	7,0	2,0	0,005	0,005	165	275	282	232	16/14	—	12
	3	7,5	1200	80	—	11	10	0,008	0,008	285	275	282	232	20/18	—	20
	4	12,0	1800	80	—	15	2,0	0,008	0,008	445	275	282	232	26/24	—	30
ЖЖ	1	0,06	(0,72)	1200	0,1	2	10	0,15	0,15	30	250	85	72	—	—	12
	2	0,24	(1,44)	850	0,25	3	2/10	0,2	0,2	40	280	125	187	10	—	20
	3	0,54	(3,0)	700	0,6	5	2/10	0,35	0,35	70	280	125	112	—	—	30
	4	1,32	(4,2)	600	1,2	10	2/10	0,5	0,5	150	360	125	—	—	—	30
ВЖ	1	0,8	400(0,6)	160	0,06	2	0,007/0,1	0,007/0,1	0,007/0,1	185	—	—	150	30	12/8	12
	2	1,2	600(1,2)	160	0,07	2,5	0,007/0,2	0,007/0,2	0,007/0,2	215	137	—	180	60	12/12	12
	3	2,4	1100(2,1)	170	0,2	4	0,007/0,35	0,007/0,35	0,007/0,35	370	—	—	330	210	12/32	18
	4	4,8	1800(3)	170	0,5	7	0,007/0,5	0,007/0,5	0,007/0,5	370	274	—	330	210	32/32	20

Примечания: 1. Значения указаны: для воздуха при $t_{вх} = +50^\circ C$; для дистиллированной воды при $t_{вх} = +60^\circ C$.

2. Для ТО ЖЖ указан суммарный объем жидкостных полостей горячего и холодного ТН.

3. Значения S, K и ΔP для ТО ЖЖ и ВЖ указаны для дистиллированной воды в качестве теплоносителя. Если используются другие жидкости, то $K=yK$ (вод), $\Delta P=V\Delta P$ (вод), где y и v из табл. 8.4.

Таблица 8.4

Значения поправочных коэффициентов γ и β

Тип ТО	Первичный ТН — вторичный ТН	γ	β	
			первичный ТН	вторичный ТН
ЖЖ	A65 — A65	0,2...0,35	1,6	1,6
	ПМС10 — ПМС10	0,07...0,15	1,8	1,8
	Вода — A65	0,3...0,5	1	1,6
	Вода — ПМС10	0,1...0,25	1	1,8
	A65 — ПМС10	0,08...0,2	1,6	1,8
ВЖ	Воздух — A65	0,8...0,95	1	1,6
	Воздух — ПМС10	0,6...0,8	1	1,8

Оценка типоразмера ТО производится в следующей последовательности:

1) вычисляем перепад температур первичного и вторичного ТН ($\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$) в ТО:

$$\Delta\theta = \Phi_{РЭА} / (\rho C_p G_D) \cdot$$

Плотность ρ и теплоемкость C_p находим из табл. 8.15 при температуре $\theta_{вх}$.

2. Определяем температуру первичного и вторичного ТН на выходе из ТО:

$$\theta_{вых1} = \theta_{вх1} + \Delta\theta_1;$$

$$\theta_{вых2} = \theta_{вх2} + \Delta\theta_2.$$

3. Рассчитываем среднелогарифмическую разность температур в ТО между первичным и вторичным ТН при противотоке:

$$\Delta\theta_{ТО} = \frac{(\theta_{вх1} - \theta_{вых2}) - (\theta_{вых1} - \theta_{вх2})}{2,31 \lg \left(\frac{\theta_{вх1} - \theta_{вых2}}{\theta_{вых1} - \theta_{вх2}} \right)}$$

4. Определяем мощность, которая может быть передана в ТО от одного ТН другому:

$$\Phi = k S \Delta\theta_{ТО}.$$

Коэффициент теплопередачи K и теплопередающая поверхность выбираются из табл. 8.3.

5. Полученное значение мощности Φ для нескольких типоразмеров ТО сравниваем с заданным $\Phi_{РЭА}$. Выбираем типоразмер, который при условии $\Phi_{РЭА} \leq \Phi$ и $\Delta P_{доп} > \Delta P$ обладает наименьшей массой. Если имею-

щиеся типоразмеры не удовлетворяют указанным условиям, то используем несколько ТО с последовательным или параллельным соединением их магистралей. Точный поправочный расчет СОТР производится на этапе конструирования.

Воздушные фильтры

ВФ обеспечивают очистку потока воздуха за счет задержки частиц пыли поверхностью фильтровального материала (поверхностные ВФ), задержки частиц пыли в объеме фильтровального материала (объемные ВФ) и за счет воздействия инерционных сил на частицы пыли (инерционные ВФ). По степени очистки различают ВФ трех классов: I (улавливают практически все частицы пыли), II (улавливают частицы ≥ 6 мкм) и III, которые применяют в СВО (улавливают частицы ≥ 50 мкм). Степень чистоты воздуха, подаваемого к РЭА, выбирается по ГОСТ 17433—80. Основные параметры поверхностных и объемных ВФ:

тонкость фильтрации (максимальный размер частиц, пропускаемых фильтром);

эффективность пылеулавливания $\phi = (z_1 - z_2) / 0,01 z_1$, %, (z_1, z_2 — запыленность воздуха перед и за ВФ при однократном пропускании через него воздуха, г/м³);

пылеемкость ВФ (масса пыли на единицу поверхности фильтровального материала, при достижении которой ВФ требует очистки или замены);

удельная воздушная нагрузка, м³/ч·м², и начальное АС при этой

нагрузке (в первоначальный момент эксплуатации при заданной температуре воздуха), кгс/м², Па.

Поверхностные ВФ [8] состоят из металлической рамки с несколькими слоями фильтровального материала, по типу которого различают: 1) сетчатые ВФ, с числом сеток от 5 до 15, из стали (ГОСТ 3826—66), латуни (ГОСТ 6613—73), винипласта (ГОСТ 15976—70) и др.; 2) волокнистые ВФ из стекловолокнистого материала ФСВУ; нетканого волокнистого материала из полиэтиловых или полипропиловых волокон ФРНК; материала из капроновых и лавсановых волокон ФНИ; материала из химических волокон на марлевой подложке ФП и др.

Объемные ВФ разнообразны по конструкции. В них используют фильтровальные материалы пористой структуры из полимеров (например, пенополиуретана) [9].

Инерционные ВФ в виде пылеуловителей и циклонов [8] используются в СВО редко, так как имеют повышенное аэродинамическое сопротивление.

На рис. 8.14 показана конструкция наиболее часто применяющегося в СВО поверхностного ВФ с гофрированной металлической сеткой, а в табл. 8.5 приведены технические па-

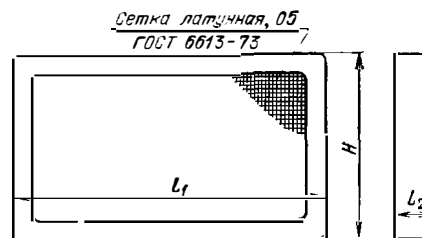


Рис. 8.14. Общий вид воздушного фильтра

раметры двух типоразмеров этой конструкции.

Для увеличения эффективности фильтровальный материал сетчатых ВФ смазывают висциновым (ГОСТ 7611—75) или приборным маслом МВП (ГОСТ 1805—76), толщина пленки которого должна быть не меньше размера наиболее крупных улавливаемых частиц пыли. Пропитанные маслом ВФ можно использовать только в случае, когда внутри РЭА допустимы следы масла.

В процессе эксплуатации поверхностные ВФ необходимо регулярно очищать. Для этого их демонтируют, чистят щеткой, промывают фильтровальный материал (в сетчатых — спирто-бензиновой смесью или 10% -ным содовым раствором при $\theta = +60^\circ\text{C}$; в волокнистых и губчатых ВФ — теплым мыльным раствором), сушат, пропитывают маслом и устанавливают ВФ в эксплуатационное положение.

Для удобства эксплуатации используют самоочищающиеся ВФ и фильтры с заменяющимся невосстанавливаемым фильтровальным материалом.

Сигнализаторы потока воздуха

Применяющиеся СПВ механического или магнитного типа (рис. 8.15) коммутируют электрическую цепь при изменении скорости воздуха в магистрали СВО [10].

При изменении положения флажка 1 под воздействием потока воздуха кулачок 2 перемещает шток 3 с электрическими контактами 4, которые коммутируют электрическую цепь (рис. 8.15,а, табл. 8.6).

В СПВ магнитного типа конструкции инж. С. Р. Рапопорта при наличии воздушного потока флажок 1 и постоянный магнит 5 повернуты вокруг своей оси (рис. 8.15,б), поле

Таблица 8.5

Технические параметры поверхностных ВФ

Вариант	Тонкость фильтрации, мкм	Эффективность, %	Пылеемкость, г/м ²	Удельная воздушная нагрузка, м ³ /ч·м ²	Начальное АС, кгс/м ²	Число слоев сеток	Габаритные размеры, мм			М, кг
							H	L ₁	L ₂	
1		70	2000	20 000	9	8	235	400	25	2,2
2	100	80	2000	20 000	12	10	470	400	32	4,8

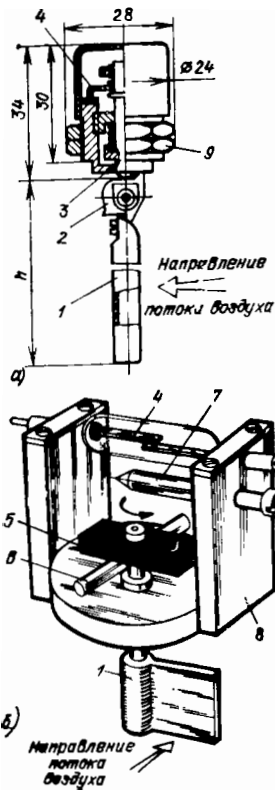


Рис. 8.15. Конструкция простейшего сигнализатора потока воздуха: а — механического типа; б — магнитного типа; 1 — флажок; 2 — кулачок; 3 — шток; 4 — электроконтакты; 5 — постоянный магнит; 6 — упор; 7 — магнитный шунт; 8 — магнитопровод; 9 — гайки для крепления (показано положение, когда электроконтакты замкнуты)

Таблица 8.6

Технические параметры механического СПВ (рис. 8.15, а)

Вариант	Скорость потока воздуха, м/с	Длина флажка Н, мм	Масса М, кг	Коммутируемый ток, А	Коммутируемое напряжение, В
1	10	73	0,06	≤ 0,06	27
2	15	55	0,056		
3	20	31	0,053		

магнита не проходит через магнитопровод 8 и магнитоуправляемые контакты 4 разомкнуты. При снижении потока воздуха флажок и магнит возвращаются в первоначальное положение и контакты геркона замыкаются. Регулировка срабатывания СПВ выполняется магнитным шунтом 7. При малых скоростях потоков воздуха (2...8 м/с) используются малогабаритные СПВ с датчиками в виде терморезисторов.

8.2. СИСТЕМЫ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Системы жидкостного охлаждения различного типа используются в РЭА со значительным тепловыделением (более 1 кВт) и с высокими удельными тепловыми потоками (10^4 ... 10^6 Вт/м² и выше). Их принципиальные схемы [11] показаны на рис. 8.16.

Герметичная СЖО (рис. 8.16, а). ТН поступает от насоса 1 через общий фильтр 3 (1) к устройствам РЭА1 и РЭА2. В случае, если одно из устройств требует более тонкой фильтрации ТН, на его входе устанавливается фильтр тонкой очистки 3(2). Поглощаемая ТН в РЭА мощность передается затем в ТО 9 вторичному ТН. Воздушные включения удаляются из жидкости воздухоотделителем 10. Пополнение утечек и компенсация температурных колебаний объема жидкости осуществляется за счет наличия в СЖО наполненного ТН бака 11, который имеет наддув воздухом или нейтральным газом постоянного давления. Величина этого давления является одновременно давлением подпора на входе насоса 1.

Контроль нормальной работы СЖО осуществляется сигнализаторами максимального давления 4, потока 6 и температуры 7. При повышении давления выше предельного допустимого значения срабатывает предохранительный клапан 2 и ТН попадает на вход насоса, минуя РЭА и ТО.

В местах возможной расстыковки жидкостных магистралей устанавливаются клапаны разъема 8, при разединении которых утечки ТН не происходит. Наличие этих клапанов позволяет избежать слива ТН из СЖО при замене вышедшей из строя РЭА.

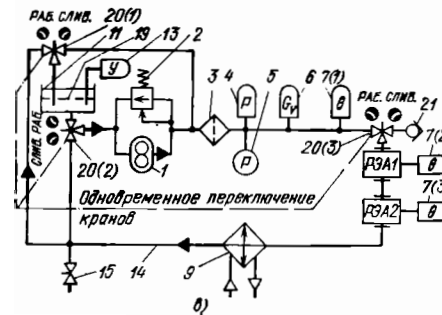
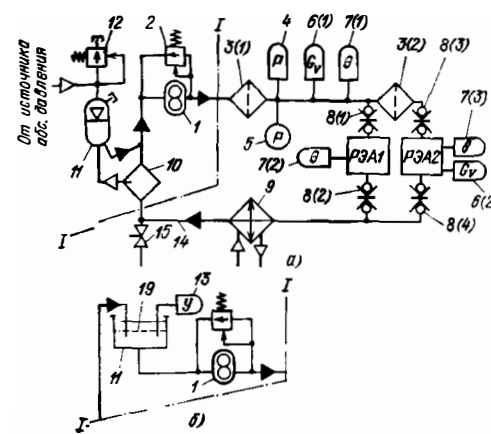
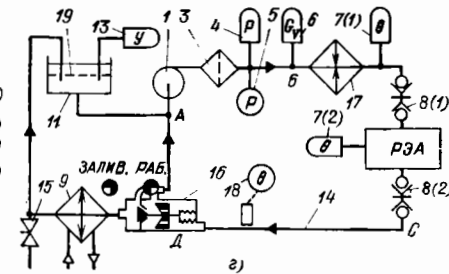


Рис. 8.16. Принципиальная гидравлическая схема: а — герметичной СЖО; б — негерметичной СЖО; в — с осушением жидкостных магистралей; г — с термостабилизацией в узком интервале температур; 1 — насос; 2 — перепускной клапан; 3 — жидкостные фильтры; 4 — сигнализатор максимального давления; 5 — указатель давления; 6 — сигнализатор потока жидкости; 7 — сигнализатор температуры; 8 — клапан разъема; 9 — теплообменник; 10 — воздухоотделитель; 11 — компенсационный бак; 12 — предохранительный клапан; 13 — указатель уровня жидкости; 14 — трубопровод; 15 — сливной кран; 16 — терморегулятор СЖО; 17 — генератор тепла; 18 — датчик и указатель температуры; 19 — пеногасящая сетка; 20 — двухпозиционный кран; 21 — обратный клапан

Слив ТН при его замене в СЖО производится самотеком при открытии сливного крана 15 и заливной горловины бака 11 (при этом давление наддува не подается). Сливной кран 15 располагается в самой нижней точке конструкции СЖО, бак 11 — в самой ее верхней точке.

Негерметичная СЖО (рис. 8.16, б). Бак 11 не имеет наддува и связан через фильтр с окружающей средой. Для предохранения от вспенивания ТН в баке монтируется пеногасящая сетка 19. Контроль за уровнем жидкости в баке осуществляется уровнемером 13.

В некоторых случаях применяют схемы СЖО без клапанов разъема. При этом перед расстыковкой магистралей производится их осушение, для чего используется НС (рис. 8.16, в). В этой схеме установлены дополнительно двухпозиционные краны 20, которые при осушении одновременно устанавливаются в положение «Слив». НС выкачивает ТН в бак 11, запол-



няя магистрали воздухом через обратный клапан 21. Нормальная работа такой схемы происходит тогда, когда РЭА1 и РЭА2 соединяются последовательно. Краны 20 могут иметь как ручной, так и электромагнитный привод.

СЖО с термостабилизацией в узком интервале температур (рис. 8.16, г). В момент выхода СЖО в заданный температурный режим НС 1 обеспечивает циркуляцию только по малому контуру АБСД, так как терморегулятор 16 в точке Д перекрывает полностью магистраль, ведущую к ТО 9. Генератор тепла 17 при этом включен. Для поддержания температуры жидкости на заданном уровне в малом контуре (после выхода в режим) в нее подмешивается охлажденная жидкость из большого контура за счет работы терморегулятора 16. ТН подогревается рассеиваемой в РЭА мощностью, генератор тепла отключен. Контроль заданного режима работы осуществляется сигнализато-

рами давления 4, расхода 6 и температуры 7. Визуальный контроль за стабилизацией температуры ведется по указателю температуры 18.

Важным этапом при настройке рассмотренных выше систем перед началом эксплуатации является удаление из ТН воздушных включений. Наличие пузырей в циркулирующей жидкости ведет к неустойчивой работе НС и пульсации давления в системе, что крайне нежелательно. Для удаления воздуха система включается в работу на длительное время (4...12 ч). При этом в герметичной СЖО воздушные включения удаляются воздухоотделителем 10 и собираются в баке 11. В негерметичной системе пузыри выделяются в баке 11 самопроизвольно. В некоторых сложных по конфигурации магистралях существуют полости, где во время работы СЖО воздух может скапливаться и откуда его нельзя удалить длительной прокачкой ТН. Такие точки в СЖО определяются практически, в них дополнительно устанавливаются воздушные клапаны для стравливания воздуха.

Основные параметры СЖО.

1. Тип ТН (устойчивость к высоким и низким температурам, коррозионное воздействие на конструкционные материалы магистралей СЖО и РЭА, теплофизические и электроизоляционные свойства).

2. Расход ТН G_v , давление $P_{вх}$ и температура $\theta_{вх}$.

3. Время готовности τ (только для СЖО с термостабилизацией в узком интервале температуры); τ — допустимое время прогрева ТН от минимально возможной температуры до температуры его стабилизации за счет мощности, рассеиваемой РЭА и специальными подогревающими устройствами.

4. Устойчивость к заданным дестабилизирующим воздействиям.

5. Масса и габариты ЭЛ и СЖО в целом.

6. Срок службы и надежность СЖО.

Насосы

НС — это гидравлические машины, предназначенные для перекачивания жидкости по трубопроводу к потребителям и повышающие с этой целью давление на входе в трубопровод до

требуемой величины. В качестве привода НС служит асинхронный двигатель, связанный с ним с помощью редуктора или непосредственно.

НС разделяют: по величине развиваемого давления (низкого — до 25 кгс/см², среднего — до 100 кгс/м² и высокого — свыше 100 кгс/см²); по типу электропривода (трехфазного переменного тока с $f=400$ Гц, $U_{пит} = 115/200, 127/220$ В и с $f=50$ Гц, $U_{пит} = 220/380, 127/220$ В); по конструктивному признаку (центробежные негерметичные и герметичные, шестеренные и др.).

Основные параметры НС [12].

1. Производительность (объемный расход жидкости G_v , м³/с, л/мин, при нормальном давлении и температуре окружающей среды).

2. Абсолютное давление жидкости на входе в насос (подпор) $P_{н.вх}$ и на выходе из него (напор) $P_{н.вых}$, кгс/см², Па.

3. Мощность, потребляемая электроприводом от сети N , на валу электропривода $N_э$ и полезная мощность НС $N_H = G_v(P_{н.вых} - P_{н.вх})$, Вт.

4. КПД НС $\eta_H = N_H/N_э$, с учетом потерь в электроприводе $\eta_{\Sigma} = N_H/N$.

Как и для ВН, взаимосвязь параметров насоса изображают в виде графической характеристики.

Шум, создаваемый НС, большей частью находится в пределах нормы, поэтому определение акустических характеристик НС проводится редко.

Центробежные насосы (ЦН) (рис. 8.17, табл. 8.7). Поток жидкости входит в осевом направлении в корпус насоса 1, захватывается лопатками рабочего колеса 2, движется радиально и под действием центробежных сил выталкивается в выходной патрубок 4, имея давление $P_{н.вых}$. Уплотнительные графитовые кольца 5 защищают входную полость от действия повышенного давления и вал 6 ЭД 3 от попадания на него рабочей жидкости. Слив рабочей жидкости (просочившейся через уплотнение) происходит через отверстие 7.

В ЦНГ (рис. 8.18) [13] передача вращения от электродвигателя 1 к рабочему колесу 2 осуществляется с помощью муфты с магнитами 3 через герметичную перегородку из немагнитного материала 4.

Шестеренные насосы ШН (рис. 8.19, табл. 8.7). Выполняются в виде пары одинаковых зубчатых колес с

эвольвентным зацеплением, помещенных в корпус 1 с незначительным зазором между корпусом и колесами, одно из которых связано с валом электродвигателя 3. При вращении колес каждый зубец захватывает жидкость из входной полости, перегоняют ее в выходную и выталкивают в выходной патрубок. ШН способны создавать высокие давления. При увеличении гидравлического сопротивления внешних магистралей расход

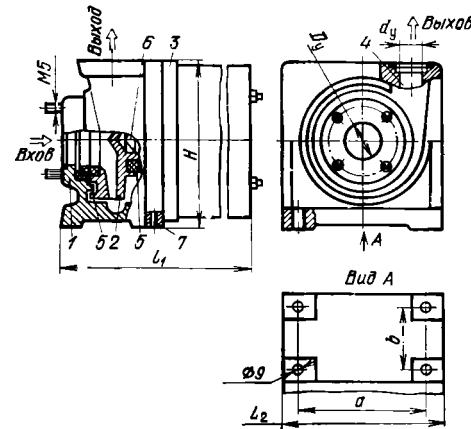


Рис. 8.17. Общий вид центробежного насоса

насоса меняется незначительно, но возрастает давление. Для исключения чрезмерного повышения давления используется перепускной клапан 5.

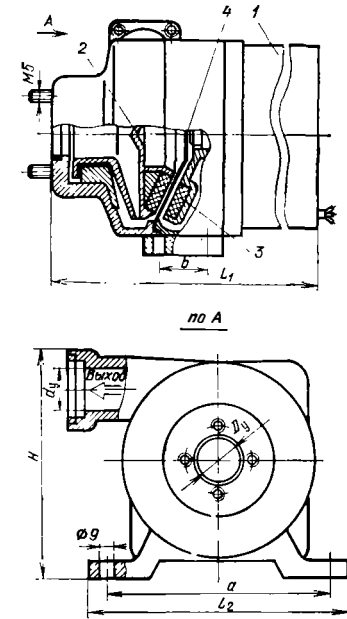


Рис. 8.18. Общий вид герметичного центробежного насоса

Таблица 8.7

Технические параметры характерных НС

Тип	Вариант	N, Вт	P _{н.вх} , кгс/см ²	P _{н.вых} , кгс/см ²	G _v , л/мин	M, кг	L _р , дБ	Габаритные размеры, мм						Соединение электропривода с насосом
								H	L ₁	L ₂	d ₄	D ₅	a	
ЦН	1	400	2,1	0,6...1,2	155,0	70	110	200	106	16	22	84	42	На одном валу
	2	1000	5,1	«	309,0	70	150	262	204	30	40	154	60	— » —
ЦНГ	1	450	2,8	«	256,0	70	110	225	106	16	22	84	42	Через магнитную муфту
	2	1400	4,7	«	511,0	70	152	250	200	30	40	154	60	— » —
ШН	1	1000	7,7	1,3±0,1	239,0	75	140	312	206	20	20	200	70	На одном валу

Примечания. 1. Электропривод 200/220 В (кроме ШН U=200 В) при f=400 Гц. 2. a и b — размеры крепления.

Нормальная работа ШН происходит при подаче подпора, который (для СЖО, работающих в условиях изменения давления окружающей среды) должен осуществляться от источника абсолютного давления через редукторный клапан, как показано на схеме рис. 8.16,а.

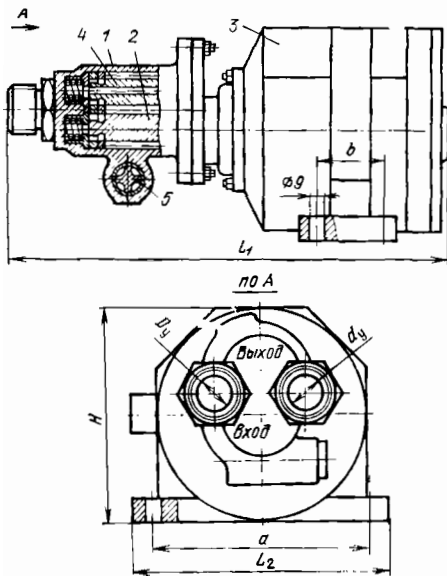


Рис. 8.19. Общий вид шестеренного насоса

Выбор насоса

Для выбора НС необходимо знать параметры СЖО (расход, давление и температуру ТН), тип электропривода, расчетную или экспериментальную гидравлическую характеристику сети и характеристики насосов.

Выбор НС проводится при графическом наложении на характеристику сети характеристик различных НС $P_H = f(G_v)$ (рис. 8.21). Значение G_{v1} в точке пересечения этих характеристик соответствует расходу, создаваемому НС при работе на сеть. Если $G_{v1} \geq 1,2 G_v^{РЭА}$ и $P_{H,вых}$ не превышает предельного давления для СЖО, то НС может быть применен. При несоответствии подбирают другой тип НС либо подключают два и более соединенных параллельно НС. При такой их работе увеличение расхода примерно кратно числу НС (на рис.

8.21 условие $G_{v2} \geq 1,2 G_v^{РЭА}$ выполняется для двух параллельно работающих на сеть НС).

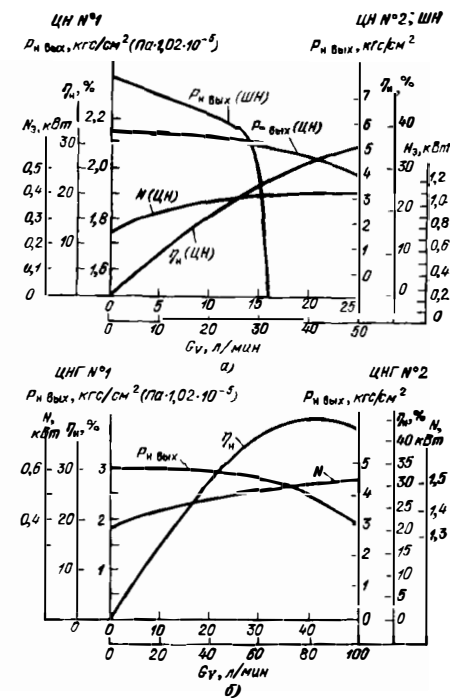


Рис. 8.20. Характеристики насосов: а — для ЦН и ШН; б — для ЦНГ (для Ш давление $P_{H,вых}$ является избыточным по отношению к абсолютному давлению подпора на входе: ТН — антифриз А65. $t = +20^\circ\text{C}$)

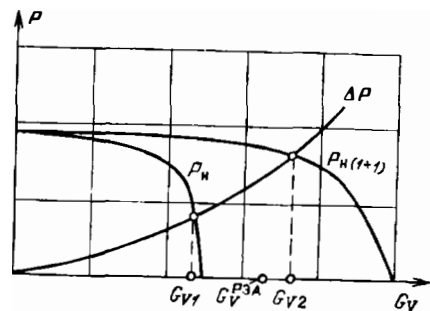


Рис. 8.21. К выбору насоса ($\Delta P = f(G_v)$ — характеристика сети; $P_H = f(G_v)$ — характеристика имеющегося насоса; $P_{H(1+)} = f(G_v)$ — характеристика двух параллельно работающих на сеть насосов; $G_v^{РЭА}$ — необходимый для охлаждения РЭА расход теплоносителя)

Жидкостные фильтры

По степени очистки ЖФ подразделяются [12] на: фильтры особо тонкой очистки (улавливаются все частицы с размером до 1 мкм), тонкой очистки (задерживаются частицы до 5 мкм), нормальной очистки (задерживаются частицы до 10 мкм) и грубой очистки (задерживаются частицы до 100 мкм). Требования к чистоте жидкости устанавливаются ГОСТ 17216—71.

Основные параметры ЖФ.

1. Тонкость фильтрации (максимальный размер частиц, пропускаемых ЖФ).
2. Коэффициент полноты фильтрации $\varphi = (M_{31} - M_{32}) / 0,01 M_{31}$, %, (M_{31}, M_{32} — масса загрязнений до и после ЖФ при однократном пропуске через него жидкости).
3. Пропускная способность (величина номинального расхода жидкости через ЖФ, $\text{м}^3/\text{с}$, л/мин).
4. Рабочее и предельное давление жидкости на входе ЖФ, кгс/см², Па.
5. Первоначальное и предельно допустимое ГС (при засорении), после достижения которого требуется регенерация или замена фильтровального материала, кгс/см², Па.

ЖФ могут быть поверхностными (очистка происходит при соприкосновении загрязнений с поверхностью) и глубинными (по всей глубине фильтровального материала).

В поверхностных ЖФ фильтроэлементы выполняют из никелевой или латунной сетки саржевого плетения, а также из ткани или бумаги. Тонкость фильтрации и коэффициент полноты фильтрации зависят от числа слоев сетки. Бумажные и тканевые фильтроэлементы обеспечивают

тонкую очистку (при температуре $T_H \leq 125^\circ\text{C}$).

В глубинных ЖФ пористый фильтроэлемент выполняют из металло-керамического спеченного порошка ФНС-5. Их используют для тонкой и особо тонкой очистки ТН и при допустимости высокого ГС.

На рис. 8.22 показана конструкция наиболее часто применяемых в СЖО поверхностных ЖФ [14], а в табл.

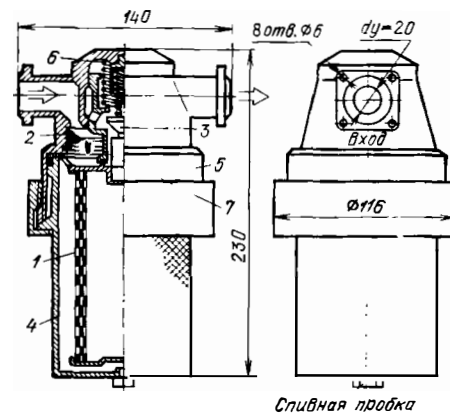


Рис. 8.22. Конструкция жидкостного фильтра (в рабочем положении)

8.8 технические параметры двух вариантов фильтров. Фильтруемая жидкость проходит через отверстие в седле 2 к фильтроэлементу 1; очистившись от загрязнений в его секте, через открытый клапан 3 поступает на выход ЖФ. При загрязнении фильтроэлемента и снятии его из фильтра для дальнейшей промывки стакан 4 вместе с фильтроэлементом

Таблица 8.8

Технические параметры ЖФ

Тип фильтра	Тонкость фильтрации, мкм	Коэффициент полноты фильтрации, %	Пропускная способность, л/мин	Начальное гидравлическое сопротивление, кгс/см ²	М, кв
Нормальной очистки	40	95	25	0,2	1,6
Тонкой очистки	8	99	25	0,5	1,8

Примечания. 1 Рабочее и предельное давления 10 и 15 кгс/см². 2. Ресурс ЖФ до промывки 50 г.

выкручивается из корпуса 5, при этом клапан 7 под воздействием пружины 6 опускается, открывая путь потоку жидкости помимо фильтроэлемента.

Иногда в системах СЖО используют магнитные, электростатические или центробежные очистители. Эффективны ионообменные фильтры, увеличивающие коррозионную стойкость магистралей СЖО. В некоторых случаях ЖФ выполняются с клапаном, открывающим путь ТН в обход загрязненного фильтроэлемента или с сигнализацией предельного загрязнения.

Чаще всего ЖФ устанавливаются в магистралях СЖО перед РЭА (см. рис. 8.16). Кроме того, ЖФ могут размещаться на линии всасывания перед НС, что предохраняет НС от попадания грязи и уменьшает их износ.

Процесс фильтрации в ЖФ сопровождается засорением фильтроэлемента, что увеличивает его ГС; косвенным показателем засорения является понижение давления за ЖФ.

Регенерация сетчатых и металлокерамических фильтроэлементов производится периодической промывкой их через каждые 25, 50 или 100 ч работы СЖО бензином, ацетоном, этиловым спиртом, четыреххлористым углеродом, АМГ-10 и др. Эффективно удаление частиц загрязнений потоком жидкости, противоположным по направлению рабочему потоку. Наиболее совершенна ультразвуковая промывка фильтроэлементов с очисткой их на 95...98% за счет явления кавитации [14]. Бумажные и тканевые фильтроэлементы не подвергаются регенерации, а по мере загрязнения заменяются на новые.

Баки компенсационные

БК предназначены для заправки СЖО ТН перед началом эксплуатации, для компенсации температурных колебаний объема жидкости и для пополнения СЖО ТН при возможных вынужденных утечках в процессе эксплуатации [12]. В СЖО с осушением БК используется как емкость, куда перегоняется насосом ТН из осушаемой магистрали.

В негерметичных конструкциях СЖО баки имеют связь с окружающей средой; в герметичных такая связь отсутствует, баки герметичны и

для поддержания в них заданного давления осуществляется специальный наддув сжатым газом. Контроль за наличием ТН в БК осуществляется визуально с помощью мерной линейки либо с помощью электрического указателя уровня жидкости.

Основные технические характеристики БК: максимальный объем (m^3 , л), рабочее (и предельное) давление залитого в бак ТН ($кгс/см^2$, Па).

Вариант конструкции негерметичного БК показан на рис. 8.23. Заправ-

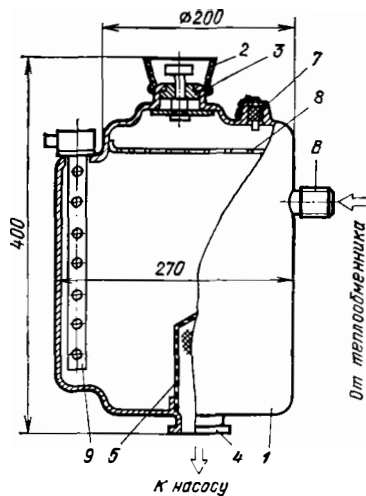


Рис. 8.23. Конструкция компенсационного бака СЖО

ка ТН в бак 1 осуществляется через заливную горловину 2, закрывающуюся пробкой 3. К НС ТН поступает через выходной патрубок 4 с фильтрующей сеткой 5; магистраль, идущая от ТО, подсоединяется к штуцеру 6. Связь БК с окружающей атмосферой осуществляется через фильтроэлемент 7. Внутри бака расположена пеногасящая сетка 8 и указатель уровня жидкости 9. Масса конструкции БК из алюминиевых сплавов 5 кг, максимальный объем ТН $12 \cdot 10^{-3} m^3$. Конструкции герметичных БК отличаются от рассмотренной высокой прочностью, отсутствием связи с атмосферой и наличием трех штуцеров для соединения с магистралями, ведущими к НС, к воздухоотделителю и к источнику абсолютного давления наддува.

Трубчатые электронагреватели

ТЭН изготавливаются по ГОСТ 13268—74 и рассчитаны на напряжение до 380 В; их номинальная мощность 0,25...2,5 кВт, длина (в развернутом виде) 0,3...1,2 м; номинальный диаметр 8, 10, 13, 16 мм. ТЭН состоят (рис. 8.24) из тонкостен-

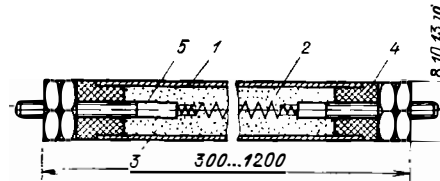


Рис. 8.24. Конструкция трубчатого электронагревателя

ной трубки 1 и спирали 2 из проволоки высокого омического сопротивления. Свободное пространство внутри трубки заполнено электроизоляционным материалом 3, хорошо проводящим тепло (периклаз). Концы трубки залиты влагонепроницаемым термостойким компаундом 4. Концы спирали припаяны к штырям 5, которые являются электрическими выводами. ТЭН допускают изгиб радиусом не менее трех диаметров трубки.

При использовании ТЭН в воздушных генераторах тепла для увеличения теплоотдачи на трубки устанавливаются с натягом пластины из ме-

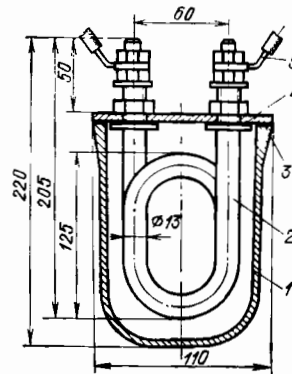


Рис. 8.25. Конструкция жидкостного генератора тепла с ТЭН на 1,2 кВт: 1 — корпус (патрубки входа и выхода теплоносителя не показаны); 2 — ТЭН; 3, 4 — герметизирующие прокладки; 5 — электрические выводы

талла с хорошей теплопроводностью. В жидкостных генераторах тепла ТЭН из нержавеющей стали или с антикоррозионным покрытием корпуса 1 помещаются в поток рабочей жидкости (рис. 8.25).

ТЭН могут быть прямой или изогнутой формы, последние не требуют температурных компенсаторов.

Терморегуляторы СЖО

Предназначены для поддержания температуры жидкости в заданных узких пределах в СЖО с термостабилизацией (см. рис. 8.16,з). Двухклапанный термостат (тип А), применяемый как терморегулятор, изготавливается по ГОСТ 3683—71 в виде гофрированного баллона 1, наполненного легкокипящей жидкостью (рис. 8.26). При омывании баллона ТН, имеющим температуру выше заданной, клапан 2, соединенный штоком 3 с баллоном, приоткрывается и тем самым открывает магистраль А, ведущую к ТО. Таким образом, при соблюдении постоянного расхода ТН осуществляется подмес охлажденной жидкости к горячей и температура этой смеси не выходит из заданных пределов. Кран

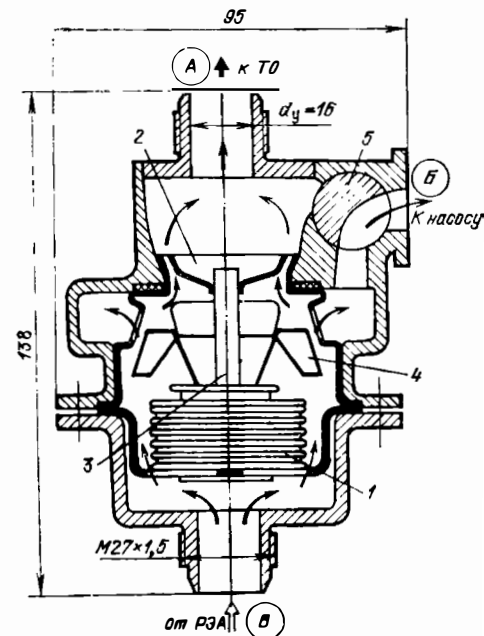


Рис. 8.26. Конструкция терморегулятора СЖО (термостат полуоткрыт)

в позволяет соединить магистрали А и В помимо термостата, что требуется при заправке СЖО ТН. Начало открытия клапана 2 — при температуре $70 \pm 2^\circ$, полное открытие — при $83 \pm 2^\circ$ С; ход клапана 9 мм. Масса терморегулятора 1,6 кг. Аналогичные термостаты разработаны с использованием в баллоне твердого наполнителя.

Сигнализаторы

Сигнализаторы температуры коммутируют электрическую цепь при повышении или понижении контролируемой температуры до заданной величины [15]. СТ могут быть мгновенного и плавного действия. У последних возможно подгорание контактов при частых колебаниях температуры объекта вблизи точки срабатывания, что требует снижения величины коммутируемого тока рабочей цепи и ввода в нее искрогасящих ЭЛ.

Основные технические параметры СТ.

1. Температура срабатывания, отпущения и их разность (зона нечувствительности) $^\circ$ С, К.

2. Коммутируемый ток, А, и допустимое напряжение на электрических контактах, В.

3. Показатель тепловой инерции (разность между действительной температурой объекта в момент срабатывания СТ и температурой срабатывания, на которую настроен СТ, при скорости изменения температуры 1 град/мин).

Конструкция СТ мгновенного (а) и плавного (б) действия показана на рис. 8.27, а их параметры в табл. 8.9. При достижении температуры объекта заданной величины биметаллическая пластина 1 меняет свою конфигурацию мгновенно (а) или плавно (б). Электрические контакты 4, связанные штоком 3 с биметаллической пластиной, коммутируют элек-

трическую цепь. Возврат контактов в первоначальное положение происходит при снижении температуры. В конструкции а пружина 2 помогает

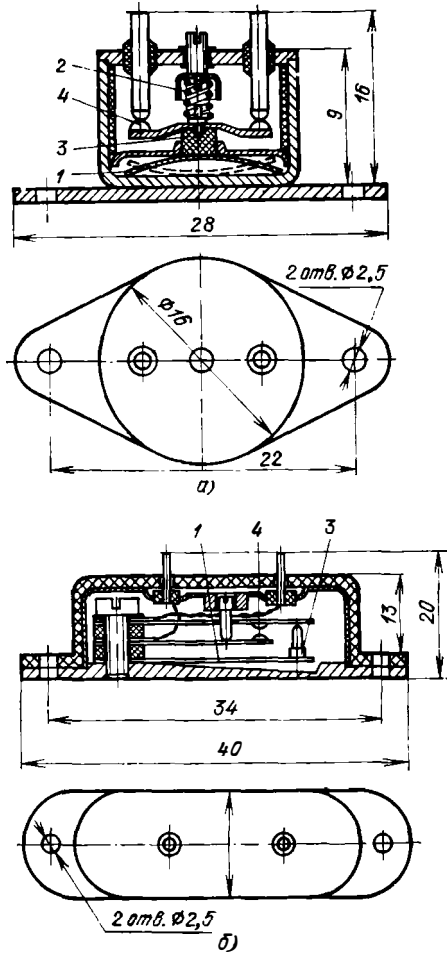


Рис. 8.27. Конструкция сигнализатора температуры мгновенного (а) и плавного (б) действия

Таблица 8.9

Технические параметры СТ

Тип действия СТ	Температура срабатывания, $^\circ$ С	Показатель тепловой инерции, град	Погрешность срабатывания, град	Зона нечувствительности, град	Допустимый ток, А	Напряжение коммутации, В	М. кг
Мгновенное	-60...150	15	± 4	10...15	3	6...36	0.01
Плавное	-60...150	15	± 2	5	0.15	27	0.015

мгновенному возврату контактов 4 при изменении положения пластины 1, а в б возврат осуществляется плавно, за счет пластины 1.

При использовании в СТ терморезисторов [16] применяют электронную схему для усиления сигнала термодатчика, что существенно усложняет их по сравнению с рассмотренными.

Сигнализаторы давления (рис. 8.28) коммутируют электрическую цепь при достижении в контролируемых жид-

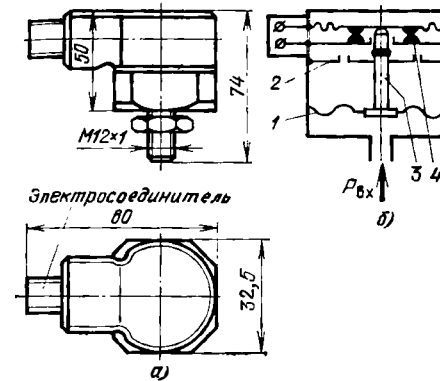


Рис. 8.28. Сигнализатор давления: а — общий вид; б — принципиальная схема

костных магистралях заданного значения давления. СД могут быть сигнализаторами избыточного или абсолютного давления (последние сложнее, но не подвержены влиянию изменения давления окружающей среды). При изменении давления в контролируемой магистрали до заданного предела мембрана 1 преодолевает усилие пружины 2 и толкает поршень 3, коммутирующий контакты 4.

Основные технические параметры СД:

1. Давление срабатывания и погрешность точки срабатывания, кгс/см², Па.

2. Рабочее давление в приемной камере СД, кгс/см², Па.

3. Предельный коммутируемый ток, А, и допустимое напряжение на электрических контактах, В (табл. 8.10).

Сигнализаторы потока жидкости коммутируют электрическую цепь при достижении заданного значения расхода жидкости. Конструкции СПЖ весьма разнообразны и основаны на различных принципах действия: ме-

Таблица 8.10
Технические параметры СД избыточного давления

Вариант	Давление срабатывания, кгс/см ²	Погрешность, кгс/см ²	Рабочее давление, кгс/см ²
1	2...6	$\pm 0,4$	10
2	6...15	$\pm 0,6$	20

Примечание. Допустимый ток через контакты 1,5 А, напряжение коммутации 27 В, масса 0,25 кг.

ханическом, магнитном, электрическом и др. [17]. В качестве СПЖ чаще применяют сигнализаторы перепада давления на диафрагме или участке

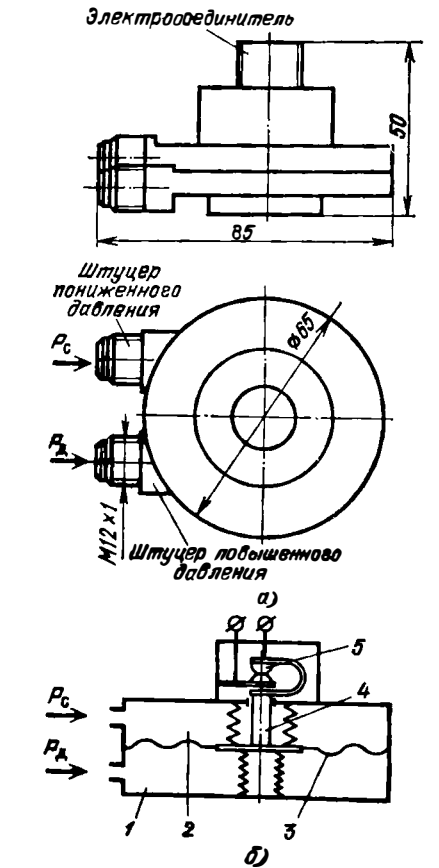


Рис. 8.29. Сигнализатор потока жидкости: а — общий вид; б — принципиальная схема

жидкостной магистрали; они обладают малой массой и габаритами, просты в обращении (рис. 8.29). Камера 1 связана с началом участка магистрали (давление более высокое), камера 2 — с окончанием этого участка (давление пониженное). Когда разница между этими давлениями достигает величины срабатывания сигнализатора, то мембрана 3 со штоком 4 и контактом 5 перемещается и происходит переключение электрической цепи.

Основные технические параметры СПЖ.

1. Перепад давления, при котором происходит коммутация электрической цепи, 0,1 кгс/см².

2. Предельно допустимое давление в камерах СПЖ 5 кгс/см².

3. Предельные значения тока и напряжения коммутации 0,2 А и 30 В; $M=0,3$ кг.

Сигнализаторы уровня жидкости коммутируют электрическую цепь при достижении заданного предела уровня рабочей жидкости в БК. Принцип действия конструкции СУЖ инженеров Э. В. Моисеева, Э. А. Сапожникова и Г. Е. Мачулы основан на свойстве магнитоуправляемых контактов коммутировать под действием

магнитного поля электрическую цепь (рис. 8.30). Магнитоуправляемые контакты 1 размещены в направляющей трубе 2, в которой перемещается чувствительный к изменению уровня рабочей жидкости поплавок 3 со встроенным в него постоянным магнитом 4. Магнитоуправляемые контакты электрически соединены с внешним разъемом 5. При достижении рабочей жидкостью уровня А поплавок поднимается вверх до упора и контакты 1 коммутируют электрическую цепь, сигнализируя о заполнении БК рабочей жидкостью; при снижении уровня жидкости до нижней отметки Б поплавок 7 опускается до упора 8 и нижние контакты сигнализируют о малом количестве рабочей жидкости в баке.

Напряжения на контактах не более 30 В, ток не более 0,07 А, масса СУЖ — в зависимости от размеров компенсационного бака.

Указатели

Указатель температуры. Применяется дистанционный термометр сопротивления (рис. 8.31), который состоит из датчика 1 и указателя температуры 2. Датчик температуры

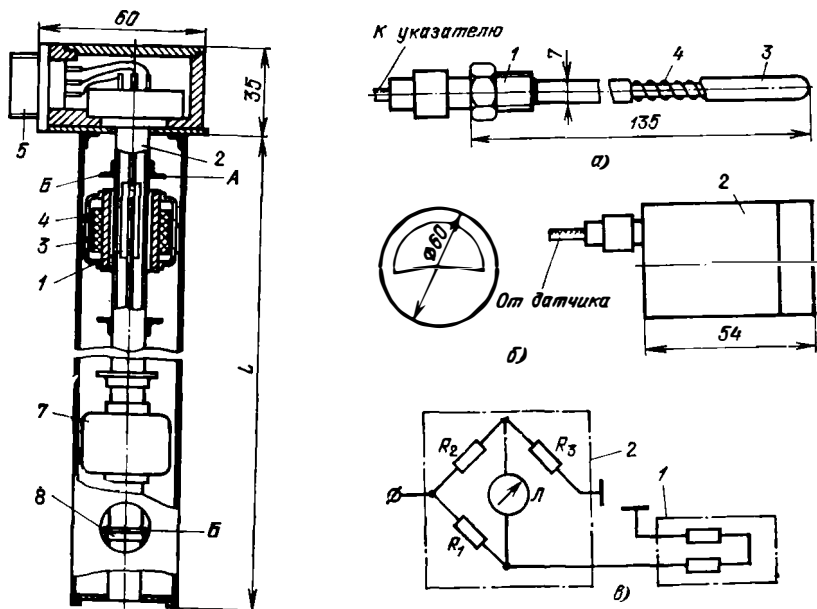


Рис. 8.31. Указатель температуры: а — датчик; б — индикатор; в — принципиальная электрическая схема

в виде спирали из высокоомной проволоки ($R=90$ Ом при $t=0^\circ\text{C}$) помещен в металлический патрон 3. При изменении температуры среды, в которую помещен патрон датчика, изменяется сопротивление обмотки и ток в катушке логометра Л. Параметры ТС: $U_{пит}=27$ В, $\theta -50 \dots +150^\circ\text{C}$, точность $\pm 3^\circ\text{C}$, масса указателя 0,25 кг, датчика — 0,08 кг.

Указатель давления. В СЖО используют манометры (рис. 8.32), изгото-

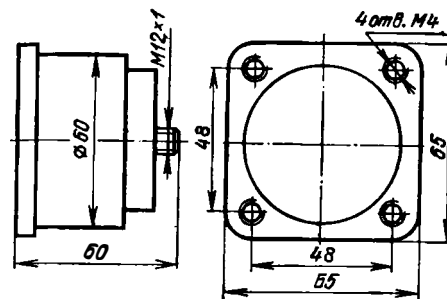


Рис. 8.32. Общий вид манометра

тавливаемые по ГОСТ 8625—77, которые измеряют избыточное давление в жидкостных магистралях СЖО верхний предел давления 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25 кгс/см². Масса $\leq 0,4$ кг, погрешность $\pm 4\%$.

Вентили и краны

Вентили предназначены для плавного регулирования потока жидкости (от нуля до максимума) в магистралях СЖО. Разнообразие их конструкций определяется параметрами протекающей через них жидкости.

На рис. 8.33 показан вентиль на давление до 15 кгс/см² и расход теплоносителя до 20 л/мин. Штуцеры для подсоединения жидкостных магистралей к вентилю выполнены по ГОСТ 13955—74. Материал вентилей — алюминиевый сплав, $M=0,15$ кг. Для дистанционного управления потоком жидкости к вентилю добавляется электропривод.

Краны предназначены для изменения направления или полного перекрытия потока ТН, могут быть одно-, двух- и многопозиционными. Конструкция кранов зависит от параметров протекающего через них ТН. При повороте рукоятки двухпози-

ционного крана на 90° (рис. 8.34) поток жидкости вместо канала А начинает поступать в канал В. Кран рассчитан на $P=15$ кгс/см², расход ТН до 20 л/мин; $M=0,45$ кг, материал — латунь.

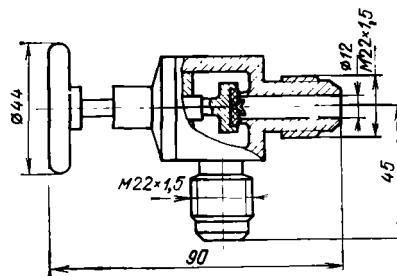


Рис. 8.33. Общий вид вентилей ($d_y=12$ мм)

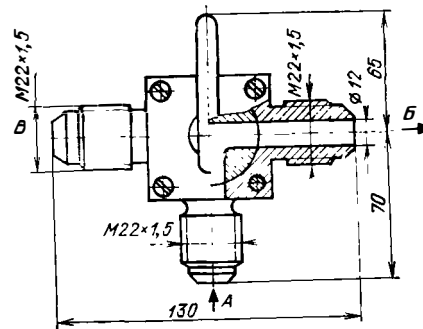


Рис. 8.34. Общий вид двухпозиционного крана ($d_y=12$ мм)

Трубопровод и соединительная арматура

Трубопровод осуществляет связь между всеми ЭЛ СЖО, по нему ТН поступает от агрегатов СЖО к охлаждаемой РЭА и обратно. ТП может быть жестким и гибким [12]. Жесткий ТП изготавливается из металлических (нержавеющая сталь, алюминиевые сплавы, медь, латунь) или пластмассовых (полиэтилен, винилпласт, фторопласт и др.) труб. Гибкий ТП изготавливается из резиновых рукавов с хлопчатобумажной (для $P \leq 25$ кгс/см²) или с проволочной оплеткой (для $P \geq 25$ кгс/см²). Применяется в магистралях СЖО с часто демонтируемыми уст-

ройствами или сложной конфигурацией.

Основными техническими характеристиками ТП являются: рабочее и предельное давление, геометрические размеры, коррозионная стойкость и теплоизоляция.

Геометрические размеры ТП: внутренний диаметр d_y и толщина стенки δ , $d_y = 1,3 \sqrt{G_0/v}$ [м] (G_0 — расход, м³/с; v — средняя скорость, м/с, ТН в данной магистрали). Для напорного ТП допускается $v = 2 \dots 3$ м/с; для сливного $v = 1,5 \dots 2$ м/с [12]. Толщина стенки δ определяется прочностью материала с учетом величины рабочего и максимального давления СЖО.

Коррозионная стойкость ТП должна быть не хуже 3 балла по ГОСТ 13819—68 при воздействии выбранного для СЖО ТН. Для ее повышения на поверхность ТП наносят химическое, гальваническое или органическое покрытие [18].

Теплоизоляция ТП необходима для защиты от высокой температуры среды (которая может существенно изменить параметры ТН) или в случае введения в СЖО специального подогрева. Толщина теплоизоляции выбирается на основании теплового расчета; материал — асбест, стекловата, стеклоткань, поропласты (пенополиуретаны) и др.

Соединительная арматура. Используется для сочленения между собой ЭЛ ТП, ЭЛ СЖО и с устройствами РЭА. СА может быть неразъемной и разъемной [12].

Неразъемная СА выполняется в виде муфт, в которые сваривают или спаивают концы ТП. Иногда вместо муфт применяется развальцовка одного из концов ТП на толщину стенки, а второй — сваривается или спаивается в развальцовку. Основное преимущество — незначительная масса и надежность.

Разъемная СА выполняется в виде штуцерных соединений (требуемых при их разъеме осушения жидкостных магистралей) или клапанов разъема (не требующих осушения магистралей).

Штуцерное соединение (табл. 8.11) применяется для труб, гибких рукавов и для смешанного соединения рукавов с трубами. Соединение для труб (рис. 8.35,а) состоит из шту-

цера 3 с резьбой, приваренного (возможна установка штуцера на конической резьбе с герметиком) к одному из концов соединяемого ТП. Угол наружного конуса штуцера 74°. Другой конец соединяемого ТП разваль-

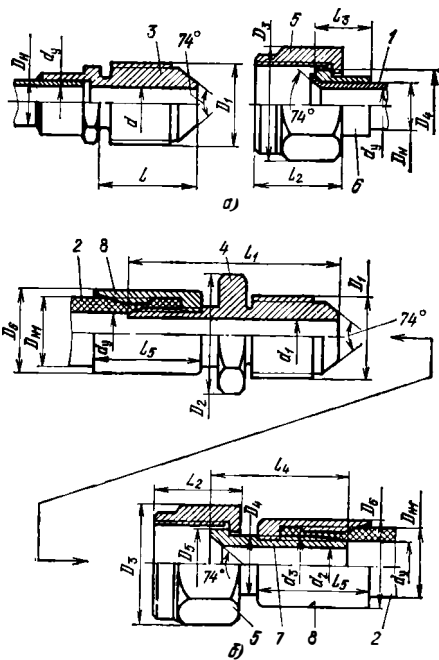


Рис. 8.35. Разъемное штуцерное соединение: а — для металлических труб; б — для гибких рукавов; 1 — труба металлическая; 2 — рукав резиноканевый; 3 — штуцер; 4 — штуцер для рукава; 5 — гайка накидная; 6 — ниппель; 7 — ниппель для рукава; 8 — муфта для рукава

цовывается в холодном состоянии на тот же угол. Предварительно на трубу надевается ниппель 6 и накидная гайка 5. При соединении ТП гайка 5 навинчивается на штуцер 3, стягивая развальцованную трубу с конусом штуцера 3 и создавая тем самым герметичное соединение. Такое соединение возможно при наличии на одной из труб изгиба вблизи СА (во избежание натяга в СА при соединении ТП).

На рис. 8.35,б показано соединение для гибких резиноканевых рукавов. Герметизация штуцера 4 и ниппеля 7

Таблица 8.11

Конструктивные размеры (рис. 8.35) штуцерных соединений, мм

Труба (рукав)	Штуцер				Гайка				Ниппель				Муфта			
	d^*_{y1}	D_{H1}	D_{H2}	L	L_1	D_3	S^{**}	L_2	d_2	d_3	D_4	D_5	L_3	L_4	D_6	L_5
4	6	10,5	16,2	14	51	19,6	17	17	3,0	M6	7,3	10,8	11	39	15,5	30
6	8	14,0	19,6	17	56	19,6	17	17	5,0	M8×1	9,3	12,8	12	43	18,0	34
8	10	16,0	19,6	17	61	21,9	19	18	7,0	M12×1	11,7	14,8	13	47	20,0	38
10	12	18,0	22	22	68	27,7	24	21	8,0	M14×1	14,0	18,2	14	50	22,0	41
12	14	20,0	24	24	69	31,2	27	21	10,0	M16×1	16,0	20,2	15	51	24,0	42
16	18	26,5	30	30	76	34,6	30	22	14,0	M20×1	20,0	25,2	17	57	29,5	48
20	22	29,5	36	36	86	41,6	36	26	18,0	M24×1,5	24,0	30,6	20	63	34,0	51
25	28	34,5	41	41	93	53,1	46	29	23,0	M28×1,5	30,0	36,6	22	70	39,0	57
28	30	38,5	41	41	94	53,1	46	30	26,0	M30×1,5	32,0	36,6	22	72	43,0	58

* Условный внутренний диаметр.
** Размер под гаечный ключ.

в руках 2 осуществляется муфтами 8.

При необходимости разъединения магистралей СЖО во время эксплуатации их осушают с помощью НС либо сливают весь ТН из СЖО.

Клапаны разъема (табл. 8.12) предназначаются для неоднократной расстыковки и стыковки магистралей

Таблица 8.12

Конструктивные размеры КР (рис. 8.36), мм, (масса М, кг, для алюминиевых сплавов)

d_y	8	10	12	16
L	92	97	97	106
D	36	40	40	46
D_1	M16 × 1	M20 × 1,5	M22 × 1,5	M27 × 1,5
M	0,16	0,18	0,2	0,26

в процессе эксплуатации без предварительного слива ТН из системы. При расстыковке клапан автоматически срабатывает и перекрывает трубопровод, обеспечивая тем самым отсутствие утечки ТН из магистрали [11].

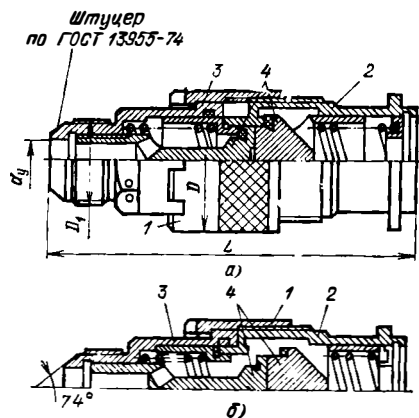


Рис. 8.36. Конструкция клапана разъема: а — в момент расстыковки; б — в момент полной стыковки

Как правило, КР устанавливаются в устройствах РЭА, подвергающихся демонтажу при эксплуатации. Клапан разъема (рис. 8.36) состоит из блочной части 2 (установлена на РЭА) и шланговой части 3 (установлена на гибком трубопроводе). При соединении обеих половин КР и закручивании накидной гайки 1 эти половины сдвигаются, а их штоки 4 при этом упираются друг в друга и открывают проходные отверстия для потока жидкости. Материал КР — алюминиевые сплавы и нержавеющая сталь.

Тепловые трубы и двухфазные термосифоны

ТТ и ДТС предназначены для переноса тепла из нагретой зоны в холодную при малом градиенте температур.

ТТ [19] представляют собой герметичную тонкостенную камеру, обычно круглого или прямоугольного поперечного сечения, внутренняя поверхность которой выложена капиллярно-пористым материалом (фитилем). Фитиль насыщен жидкой, а остальной объем ТТ заполнен паровой фазой ТН. К части поверхности ТТ, испарителю, подводится тепло, от другой части, конденсатора, тепло отводится (рис. 8.37).

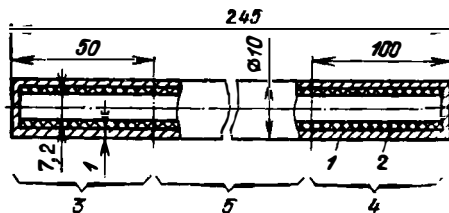


Рис. 8.37. Конструкция тепловой трубы с однородным фитилем: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — испаритель; 4 — конденсатор; 5 — транспортная зона

При подводе тепла за счет образования пара уменьшается количество жидкости в фитиле испарителя и поверхность раздела жидкость — пар сдвигается внутрь фитиля, что приводит к возникновению капиллярного давления и движению жидкости по фитилю к испарителю. При отводе тепла от конденсатора возникает разность давлений пара между испарителем и конденсатором, которая по-

буждает пар двигаться к конденсатору и конденсироваться там, отдавая скрытую теплоту испарения. Таким образом, в ТТ происходит непрерывный перенос скрытой теплоты испарения ТН при постоянно насыщенном жидкостью фитиле. Количество тепла, переносимого в виде скрытой теплоты испарения обычно на несколько порядков выше количества теплоты, переносимой однофазной жидкостью при конвекции. Для движения пара и передачи тепла через тонкие оболочки и фитиль ТТ требуется малый температурный напор. Большое количество переносимого тепла при малом температурном напоре дает возможность разработать ТТ, имеющие тепловые характеристики на порядок лучше любых известных твердых тел. Однако в отличие от твердых проводников тепла характеристики ТТ зависят не только от размеров, формы и материала, но также от конструкции, свойств ТН и особенностей подвода и отвода тепла. Для достижения максимальной интенсивности передачи тепла ТТ требуется максимально возможная интенсивность циркуляции ТН. Она ограничивается: предельной перекачивающей способностью капиллярной структуры, запиранием парового канала при достижении паром скорости звука, уносом жидкости с межфазной границы раздела фитиля движущимся вдоль нее с большой скоростью паром, разрушением потока жидкости пузырьками при кипении. Влияет также плохой контакт между корпусом ТТ и внешними источниками и стоками тепла, а также малая совместимость ТН с материалами фитиля и корпуса ТТ. Эти отрицательные влияния устраняются различными конструктивными мерами.

Наиболее эффективны ТТ в температурных диапазонах, соответствующих окрестностям нормальных температур кипения ТН. Поэтому для работающих в области умеренных температур СОР РЭА наиболее широкое применение в качестве ТН ТТ находят: хладон-12, аммиак, этанол, метанол, вода, имеющие нормальные температуры кипения 243, 306, 351, 338 и 373 К соответственно.

Основную роль в работе ТТ играет фитиль, который создает каналы для возврата конденсата в испаритель, поверхностные поры на границе раздела жидкость — пар в испарителе

для получения необходимого капиллярного давления, достаточную тепловую проводимость между внутренней стенкой трубы и поверхностью раздела пар — жидкость. Наибольшее распространение получили однородные фитили из металлической сетки, металловолокна или прорезанных в стенках корпуса ТТ узких канавок.

ТТ могут быть регулируемы и нерегулируемы. Нерегулируемые ТТ просты по конструкции, при полностью, но не чрезмерно смоченном фитиле они имеют малый температурный напор. Однако рабочая температура таких ТТ зависит от температурных уровней источника и стока тепла и может меняться в широких пределах. Регулируемые ТТ могут: поддерживать часть ТТ в узком температурном интервале при изменении теплового режима источника или стока тепла (ТТ переменной проводимости), играть роль термовыключателя, срабатывающего при заданной температуре, или термодиода, меняющего резко величину тепловой проводимости в зависимости от направления градиента температуры. Регулирование осуществляется путем изменения поверхности конденсатора за счет ввода в ТТ неконденсирующегося газа (газорегулируемые ТТ) или создания в конденсаторе избытка жидкости (затопленные ТТ), а также изменением расходов пара или жидкости (модулируемые по газу или жидкости ТТ).

В РЭА ТТ используются для охлаждения генераторных ламп, ламп бегущей волны, блоков и ячеек бортовой аппаратуры, головок акустических систем. Известно использование ТТ для регулирования температуры космических аппаратов, их приборных отсеков, космических скафандров.

Наиболее распространены в настоящее время нерегулируемые ТТ круглого (диаметром 6...20 мм) или прямоугольного (2,5×20...4,0×40 мм) сечений, длиной 250...500 мм, изготовленные из нержавеющей стали или меди и заправленные дистиллированной водой. Фитилем обычно служит многослойная прессованная металлическая сетка или металловолокно. Такие ТТ имеют полное тепловое сопротивление порядка 0,1...0,3 К/Вт, передают тепловой поток от 30 до 200 Вт при различных положениях относительно направле-

ния действия силы тяжести и устойчиво запускаются после пребывания при отрицательных температурах.

ДТС [20] представляют собой герметичную, частично заполненную ТН оболочку, во внутренней полости которой тепло передается от источника тепла (испарителя) к стоку тепла (конденсатору) в замкнутом испарительно-конденсационном цикле с возвратом конденсата к испарителю за счет гравитационных или центробежных сил (рис. 8.38).

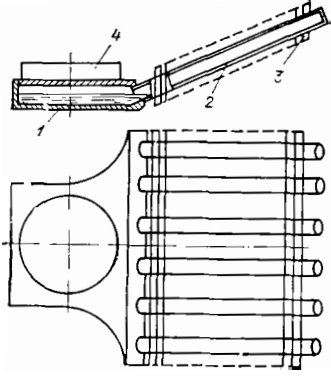


Рис. 8.38. Конструкция двухфазного термосифона: 1 — камера (испаритель); 2 — конденсатор; 3 — оребрение; 4 — тиристор

В ДТС, так же как и в ТТ, для передачи тепла используется перенос скрытой теплоты испарения, но в отличие от ТТ возврат конденсата осуществляется без фитиля, за счет внешних сил. Отсутствие фитиля значительно упрощает конструкцию ДТС по сравнению с ТТ, но не позволяет ДТС работать в отсутствие внешнего силового поля или навстречу ему.

ДТС обычно имеют круглое (диаметром 2...20 мм) или прямоугольное (4,0×20...10×50 мм) сечение и длину 0,03...3 м; изготавливаются из нержавеющей стали, меди или ее сплавов и для области умеренных температур заправляются, как и ТТ, хладоном, аммиаком, этанолом, водой. Для получения максимальной эффективной теплопроводности ДТС заправляются ТН в количестве 30...40% от внутреннего объема. Они имеют те же ограничения при достижении эффективной теплопроводности, что и ТТ, кроме капиллярного, в связи с отсутствием фитиля. Для

получения максимальной эффективной теплопроводности при проектировании ДТС принимаются различные конструктивные меры.

Заполненные дистиллированной водой, выполненные из меди и латуни ДТС с обдуваемым воздухом оребренным конденсатором и мощным тиристором в качестве источника тепла имели полное тепловое сопротивление 0,03...0,15 К/Вт, передавали тепловой поток 400...2000 Вт. Охлажденные ДТС до 258 К не приводило к нарушению работоспособности.

Выбор и обеспечение элементов СОТР

Приведенные выше конструктивные и технические параметры ЭЛ СОТР соответствуют наиболее часто применяемым типам элементов, разработанных и выпускаемых различными отраслями промышленности. При создании новых СОТР и выборе для них ЭЛ из числа существующих или вновь разрабатываемых проектировщик должен пользоваться информационными и нормативными изданиями технической литературы, промышленными каталогами (например, [21]) государственными и отраслевыми стандартами и другой справочно-нормативной литературой.

Для применения конкретного типа ЭЛ СОТР необходимо иметь:

а) согласованный с разработчиком протокол применения этого ЭЛ, если условия эксплуатации его в СОТР отличаются от условий, на которые он был рассчитан;

б) согласованный с предприятием-изготовителем и с головной организацией протокол о возможности поставки образцов ЭЛ с учетом их количества и сроков поставки.

8.3. РАБОЧИЕ ВЕЩЕСТВА СОТР

Одной из основных составляющих СОТР является рабочее вещество (теплоноситель) — циркулирующее в системе жидкость или газ. Свойства ТН оказывают значительное влияние на эффективность, массу, габариты и эксплуатационные характеристики СОТР.

Требования к ТН многочисленны и разносторонни. Поэтому в каждом конкретном случае выбирают жидкости и газы, обладающие необходимыми сочетаниями теплофизических (плотность, теплоемкость, теплопро-

Таблица 8.13

Основные параметры характерных ТН СОТР

Вещество	Химическая формула	Обозначение	Моренуэриная масса	θ кипения, К	θ замерзания, К	θ вспышки, К	Критическая θ, К	Критическое давление, МПа	Электрическое сопротивление, Ом·м	Пробное напряжение, кВ/м	Диэлектрическая постоянная
Вода	H ₂ O	—	18,016	373	273	—	647	22,16	*	*	25,0
Антифриз	Раствор C ₂ H ₄ (OH) ₂ в воде с добавками	A-65	~48,8	373 начало разложения	208... ...210	—	—	—	*	*	—
Полиметилсилоксановая жидкость	(CH ₃) ₃ SiO— —[Si(CH ₃)O] _n — —Si(CH ₃) ₃	ПМС-10	—	474 не ниже	210 не выше	448 не ниже	—	—	1,0×10 ¹⁶	6,0	2,6
Трифтортрихлорэтан	CF ₃ —CCl ₃	Ф-113	187,39	321	236	—	487	3,42	—	7,0	2,5
Дихлорметан	CH ₂ Cl ₂	Ф-30	84,94	315	177	—	508	5,97	—	—	—
Воздух (сухой)	Смесь N ₂ +O ₂ (в основном)	—	28,96	80	—	—	133	37,7	—	—	1,0

* Значительно изменяется при изменении содержания примесей.

Таблица 8.14

Совместимость ТН с конструкционными материалами при температуре 295 К

Вещество(конструкционный материал)	Углеродистая сталь	Медь	Алюминий	Нержавеющая сталь	Никель	Титан
Вода водопроводная	У	ОХ	Х	ОХ	ОХ	ОХ
Вода морская	У	Х	Х	Х	Х	ОХ
А-65	Х	Х	Х	Х	Х	ОХ
ПМС-10	ОХ	ОХ	ОХ	ОХ	ОХ	ОХ
Ф-113	Х	Х	ОХ	ОХ	Х	ОХ
Ф-30	ОХ	ОХ	ОХ	ОХ	Х	ОХ
Воздух сухой	Х	ОХ	ОХ	ОХ	ОХ	ОХ

Примечание. Совместимость: У — удовлетворительная, Х — хорошая, ОХ — очень хорошая.

водность, вязкость, объемное расширение, теплота испарения, поверхностное натяжение), химических (малая коррозионная активность к конструкционным материалам, стабильность состава), электрофизических (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, пробивное напряжение) и эксплуатационных (температуры кипения и замерзания, пожаро- и взрывобезопасность, нетоксичность, неспениваемость и др.) свойств. ТН должны иметь широкую отечественную сырьевую и производственную базы, низкую стоимость [11].

В СОТР РЭА наиболее часто в качестве ТН применяются: дистиллированная вода, воздух, антифризы, кремнийорганические, фторированные и хлорированные жидкости. Типичными представителями антифризов является А-65 (ГОСТ 159—52), кремнийорганики — полиметилсилоксановая жидкость ПМС-10 (ГОСТ 13032—77), фторхлорорганики — трифтортрихлорэтан и дихлорметан [22]. Основные сведения об этих ТН представлены в табл. 8.13, сведения о совместимости ТН с конструкционными материалами — в табл. 8.14.

Изменение теплофизических свойств ТН при изменении температуры с достаточной для инженерных приложений точностью можно описать уравнениями двух типов:

$$1) x = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3,$$

$$2) x = (a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3)^{-1},$$

где x — значение одного из теплофизических свойств (ρ , C_p , λ , ν , β); a ,

b , c , d — размерные коэффициенты. В табл. 8.15 представлены полученные методом наименьших квадратов коэффициенты уравнений типа 1 и 2, охватывающие изменение теплофизических свойств ТН в диапазоне температур 213...373 К на линии насыщения жидкостей. При расчете коэффициентов для воды и воздуха использованы данные [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинушкин М. П. Вентиляторные установки. — М.: Высшая школа, 1979.
2. Соломахова Т. С., Чебышева К. В. Центробежные вентиляторы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1980.
3. Аптекарь М. В., Фонберштейн И. М. Судовые вентиляторы. — Л.: Судостроение, 1971.
4. Алексеев С. П., Казаков А. М., Колотилов Н. Н. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1970.
5. Володин Ю. Г., Малюков Г. В. Конструирование систем терморегулирования подвижных радиоэлектронных комплексов. — М.: Сов. радио, 1977.
6. Воронин Г. И. Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования. — М.: Машиностроение, 1978.
7. Базелев Б. П., Ефремов В. И., Качилина Н. В. и др. Теплообменники жидкостно-жидкостные для систем охлаждения РЭА. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 3, 1979.

Таблица 8.15

Уравнения теплофизических свойств теплоносителя

Свойство	Уравнение	Диапазон температур (θ ... θ_0), К	Ошибка, %	Вещество
Плотность ρ	$755,36 + 2,06\theta - 4,78 \cdot 10^{-3}\theta^2 + 1,9 \cdot 10^{-6}\theta^3$	273...373	$\pm 0,3$	Вода
	$1320 - 0,96\theta + 1,05 \cdot 10^{-3}\theta^2 - 1,3 \cdot 10^{-6}\theta^3$	213...273	$\pm 0,7$	А-65
	$1200,7 - 0,9\theta$	213...273	$\pm 0,1$	ПМС-10
	$2312,5 - 2,5\theta$	213...273	$\pm 1,0$	Ф-113
	$2898 - 14,7\theta + 4,98 \cdot 10^{-2}\theta^2 - 6,25 \cdot 10^{-5}\theta^3$	213...343	$\pm 1,0$	Ф-30
	$3,6652 - 1,262 \cdot 10^{-2}\theta + 1,42 \cdot 10^{-5}\theta^2$	223...373	$\pm 2,0$	Воздух
Удельная теплоемкость при постоянном давлении C_p	$14,24 - 0,091\theta + 2,73 \cdot 10^{-4}\theta^2 - 2,713 \cdot 10^{-7}\theta^3$	273...373	$\pm 0,9$	Вода
	$1,133 + 5 \cdot 10^{-3}\theta + 4 \cdot 10^{-6}\theta^2$	213...373	$\pm 0,7$	А-65
	$1,74 - 7,511 \cdot 10^{-3}\theta + 3,51 \cdot 10^{-5}\theta^2 - 3,906 \cdot 10^{-8}\theta^3$	213...373	$\pm 0,9$	ПМС-10
	$-1,723 + 0,022\theta - 6,17 \cdot 10^{-5}\theta^2 + 6,25 \cdot 10^{-8}\theta^3$	253...373	$\pm 1,5$	Ф-113
	$0,716 + 2,572 \cdot 10^{-3}\theta - 6,5 \cdot 10^{-6}\theta^2 + 1,04 \cdot 10^{-9}\theta^3$	213...343	$\pm 1,5$	Ф-30
	$1,0248 - 5,7 \cdot 10^{-5}\theta$	223...273	$\pm 1,5$	Воздух
$0,948 + 2,093 \cdot 10^{-4}\theta - 3,11 \cdot 10^{-6}\theta^2$	273...373	$\pm 1,5$	— » —	
Коэффициент теплопроводности λ	$0,197 - 5,95 \cdot 10^{-4}\theta + 1,3 \cdot 10^{-6}\theta^2 + 2,125 \cdot 10^{-9}\theta^3$	273...373	$\pm 0,5$	Вода
	$1,05 - 8,23 \cdot 10^{-3}\theta + 2,97 \cdot 10^{-5}\theta^2 - 3,38 \cdot 10^{-8}\theta^3$	213...373	$\pm 1,5$	А-65
	$0,237 - 5,518 \cdot 10^{-4}\theta + 1,131 \cdot 10^{-6}\theta^2 - 1,297 \cdot 10^{-9}\theta^3$	213...373	$\pm 0,2$	ПМС-10
	$0,128 - 1,767 \cdot 10^{-4}\theta - 5 \cdot 10^{-8}\theta^2$	253...373	$\pm 0,6$	Ф-113
	$0,185 + 6,22 \cdot 10^{-5}\theta - 8,574 \cdot 10^{-7}\theta^2 + 1,041 \cdot 10^{-9}\theta^3$	213...343	$\pm 1,0$	Ф-30
	$2,4 \cdot 10^{-3}\theta + 7,8 \cdot 10^{-5}\theta^2$	213...373	5,0	Воздух

Свойство	Уравнение	Диапазон температур (θ, ... θ), К	Ошибка, %	Вещество
Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$	$134,249 - 1,1760 + 3,462 \cdot 10^{-3} \theta^2 + 3,413 \cdot 10^{-6} \theta^3$ $(-2,664 + 3,763 \cdot 10^{-2} \theta - 1,773 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 2,787 \cdot 10^{-7} \theta^3) - 1$ $(1,624 - 1,135 \cdot 10^{-2} \theta + 6,3 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 5,258 \cdot 10^{-9} \theta^3) - 1$ $(0,072 - 4 \cdot 10^{-4} \theta - 2,6 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 1,46 \cdot 10^{-9} \theta^3) - 1$ $(-18,18 + 0,155 \theta - 4,328 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 4,875 \cdot 10^{-7} \theta^3) - 1$ $(0,724 - 1,098 \cdot 10^{-2} \theta + 6,35 \cdot 10^{-5} \theta^2) - 1$ $- 1,554 + 2,175 \cdot 10^{-2} \theta + 1,196 \cdot 10^{-4} \theta^2$	283...353 213...293 298...373 213...373 273...373 213...343 213...373	$\pm 6,0$ $\pm 8,0$ $\pm 8,0$ $\pm 2,5$ $\pm 3,0$ $\pm 1,0$ $\pm 5,0$	Вода А-65 А-65 ПМС-10 Ф-113 Ф-30 Воздух
Коэффициент объемного расширения $\beta \cdot 10^4$	$-320,117 + 2,749 \theta - 7,9 \cdot 10^{-3} \theta^2 + 7,738 \cdot 10^{-6} \theta^3$ $3,765 + 2,04 \cdot 10^{-2} \theta - 5,72 \cdot 10^{-5} \theta^2 + 6,508 \cdot 10^{-8} \theta^3$ $7,93 + 7,534 \cdot 10^{-3} \theta - 1,10 \cdot 10^{-5} \theta^2 + 1,3 \cdot 10^{-8} \theta^3$ $- 1470,344 + 13,924 \theta - 4,356 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 4,55 \cdot 10^{-5} \theta^3$ $10,851 - 1,556 \cdot 10^{-2} \theta + 9,63 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 1,04 \cdot 10^{-7} \theta^3$ 36,61	283...373 213...373 213...373 298...373 213...343 213...373	$\pm 2,5$ $\pm 0,5$ $\pm 4,5$ $\pm 3,5$ $\pm 1,0$ $\pm 2,5$	Вода А-65 ПМС-10 Ф-113 Ф-30 Воздух

Примечание. Уравнения тепловых свойств для воздуха справедливы при давлении 102 кПа (760 мм рт. ст.) и отсутствии влажности.

8. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. — М.: Стройиздат, 1981.

9. Булатов Г. А. Полиуретаны в современной технике. — М.: Машиностроение, 1983.

10. Киселев В. И., Чукин В. Ф., Орлов В. Н. Сигнализаторы потока воздуха на герконах. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 2, 1983.

11. Волохов В. А., Хрычиков Э. Е., Киселев В. И. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. — М.: Сов. радио, 1975.

12. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. — М.: Машиностроение, 1971.

13. Мозолевич А. Н., Наумов В. В., Вицинский М. П., Арсеньев В. В. Высокооборотный герметичный центробежный насос с магнитной муфтой. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 3, 1981.

14. Рыбаков К. Ф., Дмитриев Ю. И., Поляков А. С. Авиационные фильтры для топлив, масел, гидравлических жидкостей и воздуха. — М.: Машиностроение, 1982.

15. Ступаренко А. В., Буянов Б. В. Биметаллические термореле для систем охлаждения РЭА. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 1, 1979.

16. Буяльский К. Е., Маланин В. Г., Михайловский В. В. Сиг-

нализаторы температуры для систем охлаждения РЭА. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 3, 1974.

17. Гладковский Ю. Н., Ефремчик В. В., Семенов В. А. Турбинные расходомеры — сигнализаторы. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 3, 1974.

18. Гильгур Д. С., Никулина Л. Я., Гейн З. Ю. Защитные свойства некоторых органических покрытий в потоке водных растворов этиленгликоля. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 3, 1982.

19. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика. — М.: Машиностроение, 1981.

20. Исакеев А. И. и др. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов. — Л.: Энергоиздат, 1982.

21. ЦНИИТЭИ приборостроения. Приборы, средства автоматики и системы управления. — Каталог, М., 1978.

22. Богданов С. Н. и др. Холодильная техника: Свойства веществ: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1976.

23. Майоров В. В., Горячев А. А. Формулы для определения основных теплофизических свойств воды и воздуха. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 3, 1981.

9. УЗЛЫ И ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Основные аббревиатуры

- АГ — абонетский громкоговоритель
 АС — акустическая система
 БАМЗ — бытовая аппаратура магнитной записи
 Г — головка громкоговорителя
 ГЗ — головка звукоснимателя
 ГР — громкоговоритель рупорный
 ГТ — головные телефоны
 Д — двигатель
 Л — ларингофон
 ЛПМ — лентопротяжный механизм
 М — микрофон
 МГ — магнитная головка
 НД — носитель дисковый
 НП — носитель пленочный
 НПР — носитель проволочный
 Т — тонарь
 ЭПУ — электропронгравующее устройство

9.1. КЛАССИФИКАЦИЯ

К электроакустическим устройствам относятся микрофоны, головки громкоговорителей, акустические системы, головные телефоны, узлам — магнитные головки записи и воспроизведения, головки звукоснимателей, носители и двигатели. Все они являются преобразователями и, как правило, используются при конструировании РЭА в виде готовых покупных изделий.

Микрофоны преобразуют механические колебания мембраны в электрические сигналы; Г, АС и ГТ — электрические сигналы в механические колебания диффузора или мембраны; а МГ преобразуют изменение намагниченности носителя в электрические сигналы (или наоборот). Пос-

ледные могут быть трех видов: записывающими, воспроизводящими и универсальными. Особую группу представляют стирающие МГ, которые используются для снятия (размагничивания) старых записей и для подготовки пленки к повторной записи.

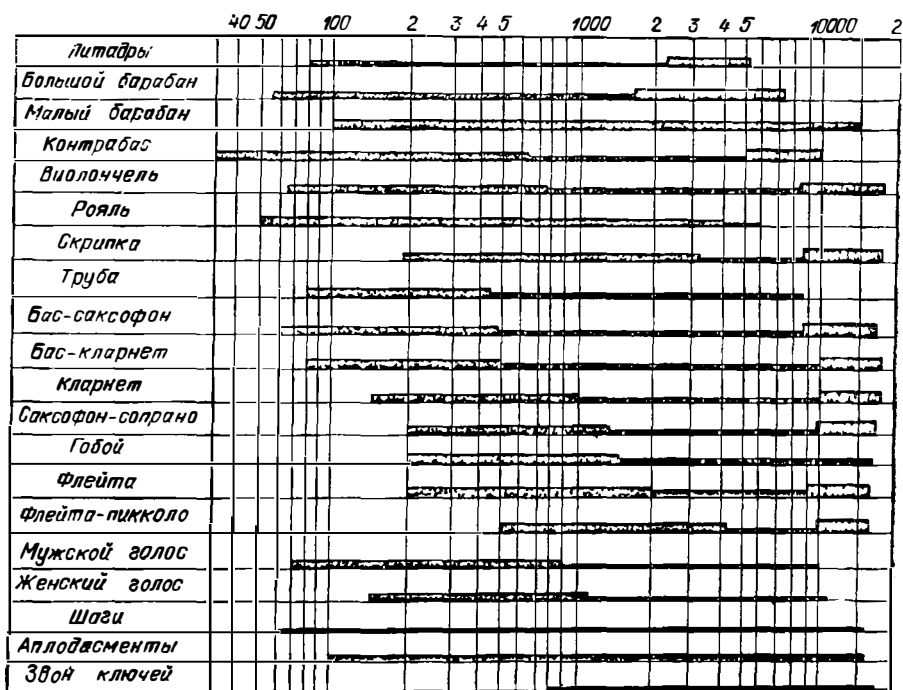
Головки звукоснимателя преобразуют механические колебания иглы звукоснимателя в электрические сигналы с помощью электродинамических или пьезоэлектрических элементов.

В качестве носителей информации используют материалы, способные «запоминать» записываемую на них информацию за счет изменения в ос-

новном механических (НД) или магнитных (НП и НПр) свойств.

Сопутствующими электроакустическим устройствам являются разнообразные приводные двигатели, используемые в электропроигрывающих устройствах и леитопротяжных механизмах, и тонармы для крепления ГЗ. При выборе электроакустических устройств необходимо учитывать то, что речь, музыка и сопровождающие их шумы представляют собой сочетание различных по частоте и силе звуков, непрерывно меняющихся в процессе звучания (рис. 9.1).

Основные частоты звуков, воспроизводимых музыкальными инструментами, от 30 (16) до 4000 Гц. Однако для сохранения тембровой ок-



Основной тон
 Основной тон и гармоники
 Частотный спектр сопровождающих исполнение шумов

Рис. 9.1. Частотные диапазоны музыкальных инструментов, голосов и шумов

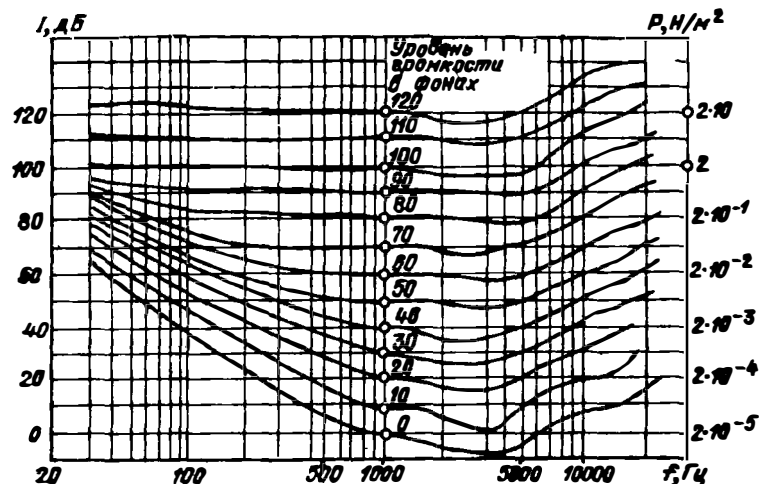


Рис. 9.2. Кривые равной громкости

раски верхнюю границу расширяют до 16...20 кГц. Помимо частотных свойств звучание различных инструментов и голосов характеризуется динамическим диапазоном, который для симфонического оркестра достигает 70...75 дБ.

Кроме этого, следует учитывать нелинейные свойства слухового аппарата человека, который для кажущейся равномерности звучания требует увеличения уровня сигнала на высоких и низких частотах, особенно при пониженном уровне воспроизведения (рис. 9.2).

9.2. МИКРОФОНЫ. ГОЛОВКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ, АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ГОЛОВНЫЕ ТЕЛЕФОНЫ

Микрофоны и ларингофоны

Микрофоны применяются в радиовещании, телевидении, кинотехнике для звукозаписи, звукоусиления, диспетчерской и служебной связи, а также в измерительной и специальной аппаратуре. Имеют следующие основные параметры: нормальное сопротивление нагрузки (динамическое и статическое сопротивление постоянному току) $Z_{нп}$, Ом; чувствительность S_m , мВ/Па; отдачу a_m , мВ; частотные и амплитудные характе-

ристики чувствительности и отдачи; эквивалент затухания передачи; ЭДС (напряжение) собственного шума; разборчивость в заданном разговорном тракте; характеристику направленности; номинальный диапазон частот; назначение (студийный, трансляционный, измерительный, речевой, репортажный, универсальный, специальный, любительский).

Микрофоны классифицируют: по способу преобразования акустических (звуковых) колебаний в электрические (динамические катушечные и ленточные, конденсаторные или электростатические, пьезоэлектрические и электромагнитные, угольные); по способу воздействия звуковых колебаний на диафрагму (давления, градиента и комбинированные); по классам: высший, I, II и III (группы А и Б).

На рис. 9.3 показаны основные виды диаграмм направленности М и схемы их разновидностей. Основные параметры М и рекомендуемые области применения даны в табл. 9.1 и 9.2.

Профессиональные студийные М работоспособны в диапазоне температур 10...35°C, относительной влажности до 80% при 25°C. Профессиональные вестудийные и микрофоны для бытовой аппаратуры магнитной записи работоспособны при -10...+50°C (-20...+50°C), влажности 85...93% при 20...25°C (80...93% при 20...25°C). Гарантийный

срок службы М по ТУ не менее 1,5—2,5 лет.

В комплект поставки М (не встроенных в РЭА) дополнительно входят: кабели, противветровые экраны, блоки питания и ряд других устройств, комплектуемых в соответствии с ТУ.

Условные обозначения М состоят из букв, указывающих тип микрофо-

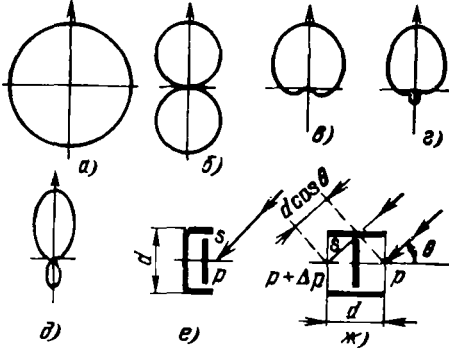


Рис. 9.3. Характеристики направленности микрофонов (в полярных координатах) и схемы воздействия на диафрагму: а — круг; б — косинусоида («восьмерка»); в — кардиоида; г — суперкардиоида; д — гиперкардиоида; е — приемник давления; ж — приемник градиента давления

на, порядкового номера разработки, класса и номера ГОСТ или ТУ. Например: МД-77-1-ГОСТ 6495—79 — микрофон динамический, 77-й разработки, I класса, ГОСТ 6495—79).

Динамические М выпускаются катушечные и ленточные (рис. 9.4). Катушечные бывают неаправленного действия с круговой диаграммой направленности (приемники давления) и однонаправленной диаграммой — кардиоидной, суперкардиоидной или гиперкардиоидной характеристикой (комбинированные приемники давления и градиента давления). Их достоинствами являются удовлетворительные электроакустические параметры, небольшие габариты и малая масса, относительная простота устройства и малая стоимость. Электроакустические качества М, их размеры и конструкция во многом определяются свойствами примененных магнитных материалов.

Приняты следующие буквенные обозначения схемы, выхода и выходного сопротивления микрофона: N — симметричный низкоомный выход с сопротивлением не более 600 Ом; L — несимметричный низкоомный выход; M — несимметричный выход со

Таблица 9.1

Области применения и параметры микрофонов по классам (ГОСТ 6595—79)

Классы	Параметры	Область применения
Высший	Диапазон частот 31,5...16 000 Гц при неравномерности 5±2 дБ, чувствительности 1,2 мВ/Па и ее разницы (фронт—тыл) не менее 12 дБ	Для профессиональной передачи и записи, а также звукоусиления музыки и художественной речи в студиях, концертных залах и театрах
I	Диапазон частот 50...14 000 Гц при неравномерности 8±2,5 дБ, чувствительности 1,5 мВ/Па и ее разницы (фронт—тыл) не менее 8 дБ	Для передачи и записи (в том числе с бытовой аппаратурой магнитной записи), а также звукоусиления музыки и художественной речи в студиях, залах и театрах
II	Диапазон частот 80...10 000 Гц при неравномерности 12±2,5 дБ, чувствительности 1,5 мВ/Па и ее разницы (фронт—тыл) не менее 6 дБ	Для передачи и записи (в том числе с бытовой аппаратурой магнитной записи), а также звукоусиления речи в любых помещениях
III (группы А и Б)	Диапазон частот 100...8000 Гц при неравномерности 20±2,5 дБ, чувствительности 2 мВ/Па и ее разницы (фронт—тыл) не менее 6 дБ	Для передачи и записи (в том числе с бытовой аппаратурой магнитной записи), звукоусиления речи в любых помещениях и вне помещения, а также для местного радиовещания, диспетчерской и служебной связи

Таблица 9.2

Тип	Назначение	Номинальный диапазон частот, Гц	Чувствительность, мВ/Па	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Перепад чувствительности фронт—тыл, дБ, не менее	Уровень звукового давления, дБ, не выше	Модуль полного сопротивления, Ом	Габариты, мм	Масса, г	Тип					
										Конденсаторный с переключаемыми характеристиками	Конденсаторный электретный	Динамический, остроуправленный, «ручной»	Конденсаторный, электретный	То же	— » —
МК-18	Запись и передача музыки и речи в теле- и радиостудиях, концертных залах, театрах	50...16 000	16	6; 8; 10	15	13	200	46×35×187	270	Конденсаторный с переключаемыми характеристиками	Конденсаторный электретный	Динамический, остроуправленный, «ручной»	Конденсаторный, электретный	То же	— » —
МКЭ-5	То же	50...16 000	3	12	—	32	200	15×15×29	13	Конденсаторный электретный	Конденсаторный электретный	Динамический, остроуправленный, «ручной»	Конденсаторный, электретный	То же	— » —
МД-78	— » —	50...15 000	2	20—12	12	15	200	∅ 52×192	220	Динамический, остроуправленный, «ручной»	Конденсаторный, электретный	Конденсаторный, электретный	Динамический, остроуправленный, «ручной»	То же	— » —
МКЭ-4М	Запись, передача и звукоусиление музыки и речи в студиях, театрах и концертных залах	50...15 000	18	9	20	18	200	∅ 21×157	80	Конденсаторный, электретный	Конденсаторный, электретный	Динамический, остроуправленный, «ручной»	Конденсаторный, электретный	То же	— » —
МКЭ-7	То же	50...15 000	8	12±2	10	25	200	∅ 58×66	170	Конденсаторный, электретный	Конденсаторный, электретный	Динамический, остроуправленный, «ручной»	Конденсаторный, электретный	То же	— » —
МКЭ-12	Запись и передача музыки и речи в радио- и телестудиях и вне их при закреплении М на «удочке»	50...12 500	2	15	13	26	200	∅ 21×59	30	Конденсаторный, электретный	Конденсаторный, электретный	Динамический, остроуправленный, «ручной»	Конденсаторный, электретный	То же	— » —

Основные параметры микрофонов

Тип	Назначение	Номинальный диапазон частот, Гц	Чувствительность, мВ/Па	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Перепад чувствительности фронт — тыл, дБ, не менее	Уровень звукового давления собственного шума, дБ, не выше	Модуль полного электрического сопротивления, Ом	Габариты, мм	Масса, г	Тип
МД-80 (80А)	Запись, передача и звукоусиление речи в любых помещениях и открытом пространстве	80...10 000	2	17±2,5	12	15	200	∅ 41×85	170 (230)	Динамический, односторонне направленный
МД-81А	Запись, передача и звукоусиление музыки и речи в условиях повышенного шума	50...12 000	50	22±2,5	13	22	200	∅ 44×734	750	Динамический, остронаправленный
МЛ-20	Высококачественная передача и запись речи в условиях повышенного шума (стадионы и т. п.)	80...10 000	0,1	28±2,5	15	—	200	180×90×50	200	Ленточный, двусторонне направленный, шумостойкий
МКЭ-2 (2А)	Звукозапись, звукоусиление и передача музыки и речи (в том числе и в БАМЗ)	50...15 000	2,5	12±2,5	16	24	200	∅ 21×150	140	Конденсаторный, электретный, односторонне направленный
МКЭ-3	Звукозапись в БАМЗ	50...15 000	4	5±2,5	—	37	3000	∅ 13×21	8	Конденсаторный, электретный, ненаправленный, встроенный в БАМЗ
МКЭ-10	Звукозапись в БАМЗ	50...16 000	2	8±2,5	—	26	200	∅ 21×139	120	Конденсаторный, электретный, не-
МКЭ-11СН	Запись музыки и речи на стереофоническую БАМЗ в жилых помещениях	50...16 000	2,5	12±2,5	15	24	200	∅ 46×160	300	Конденсаторный, электретный, стереофонический
МД-52Б-СН	То же	80...10 000	1,35	12±2,5	12	30	200	216×190	500	Динамический, стереофонический (2 шт. МД-52Б)
МД-64М	Запись музыки и речи в комплекте с БАМЗ	80...10 000	1,3	14±2,5	12	30	200	∅ 33×121	180	Динамический, односторонне направленный
МД-52Б	То же	80...10 000	1,35	12±2,5	12	30	200	∅ 36×114	160	То же
МД-201	— » —	80...10 000	1,3	14±2,5	—	20	200	56×43×35	100	Динамический, ненаправленный
МД-82	Запись музыки и речи в комплекте с магнитофонами I и II классов	50...16 000	1,3	13±2,5	12	15	100	∅ 37×178	250	Динамический, односторонне направленный
ДЭМШ-1А	Запись и передача речи	300...3000	0,4	12	—	—	600	∅ 23×11	14	Электромагнитный, ненаправленный
МЭМ-60	То же	250...3000	0,2	12	—	—	600	176×60×60	400	Электромагнитный, односторонне направленный
МРУ-60	Аппаратура связи	300...3000	60	15	—	—	180	176×60×60	350	Угольный, односторонне направленный

средней величиной сопротивления от 0,8 до 2 кОм; Н — несимметричный выход с большой величиной сопротивления (от 20 до 100 кОм). Схемы присоединения микрофонов указанных видов к стандартному соединителю СГ-3 или СГ-5 (ГОСТ 12368—78) показаны на рис. 9.5.

Ленточные М имеют лучшую час-

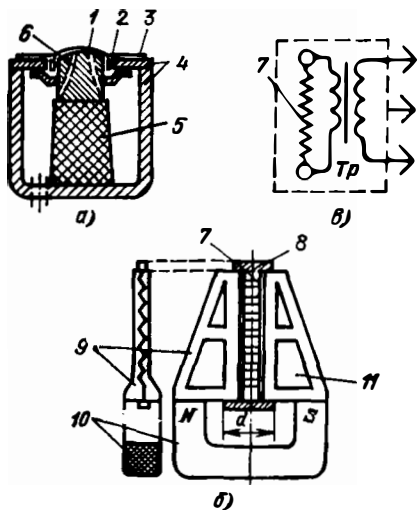


Рис. 9.4. Схематическое устройство электродинамического катушечного микрофона — приемника давления (а), конструктивная (б) и электрическая (а) схемы точного микрофона: 1 — диафрагма; 2 — звуковая катушка; 3 — гофрированный воротник; 4 — магнитопровод; 5 — сердечный магнит; 6 — полюсный наконечник; 7 — гофрированная ленточка; 8 — изолирующие перемычки; 9 — полюсные наконечники; 10 — магнит; 11 — сквозные отверстия в полюсных наконечниках; Тр — выходной трансформатор ($n = 30 \dots 50$)

тотную характеристику, однако они более чувствительны к толчкам и вибрациям, имеют меньшую механическую надежность. Широко применяются в студиях и концертных залах.

Конденсаторные М (рис. 9.6) по акустическим показателям превосходят динамические, но они более сложны и дороги. Используются преимущественно для профессиональных целей из-за высокой чувствительности, равномерной частотной и хорошей переходной характеристик. Требуют специального промежуточного преобразующего устройства для подключения к входу усилителя.

Конденсаторные М делятся на

электретные и измерительные. Главное отличие электретных М заключается в капсуле, основными элементами которого являются мембрана из

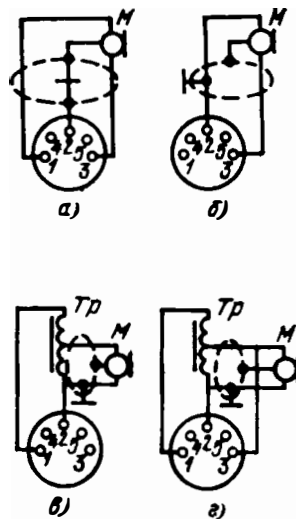


Рис. 9.5. Схемы соединения микрофона с кабелем и пятиштырьковым стандартным соединителем типа СГ-5: а — симметричная низкоомная; б — асимметричная низкоомная; в — с выходным автотрансформатором; г — комбинированная (1—2 — для высокоомного выхода; 2—3 — для низкоомного)

электретной пленки (обычно используется фторопласт толщиной в 15 мкм, металлизированный с одной стороны) и база из термоэлектрета — титаната кальция. Главное требование к измерительному М — стабильность параметров во времени. Это легче обеспечить, если выполнить М по принципу приемника давления.

Малогабаритные М (пьезоэлектрические, электромагнитные и пьезокерамические) применяются в слуховых аппаратах для плохо слышащих, для репортажа, при переводе речей и в

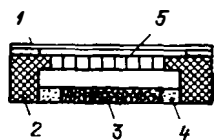


Рис. 9.6. Схематический разрез капсулы конденсаторного микрофона: 1 — мембрана из инвара; 2 — корпус из керамики; 3 — металлокерамический фильтр; 4 — изолирующее кольцо; 5 — слой золота

других подобных случаях. Основное требование, предъявляемое к ним, — обеспечение хорошей артикуляции в полосе частот от 200 (300) Гц и до 4 (5) кГц. Средняя чувствительность колеблется от 5 (50) до 100 мВ·м²/Н.

Ларингофоны (контактные М) используются для восприятия речи в условиях окружающего шума высокой интенсивности. В отличие от М, воспринимающего звуковые колебания по воздуху, Л предназначен для приема колебаний голосовых хрящей, вызываемых вибрациями голосовых связок. Л могут быть угольными, электромагнитными и пьезоэлектрическими. Угольные обладают большой чувствительностью, но имеют повышенный уровень собственных помех, значительные нелинейные искажения сигнала и нуждаются в источнике постоянного напряжения 3...6 В. Более совершенными и с лучшими электрическими и акустическими характеристиками являются электромагнитные и пьезоэлектрические Л.

Громкоговорители, акустические системы и головные телефоны

Являются выходными акустическими устройствами, преобразующими энергию электрических сигналов звуковых частот в механические колебания диффузора или мембраны. Выполняются в виде головок динамических прямого излучения (головок громкоговорителей, абонентских и рупорных громкоговорителей), акустических систем (колонок) и головных телефонов.

Выходные преобразующие устройства имеют следующие основные параметры: номинальную мощность, Вт; основную резонансную частоту (частота механического резонанса) подвижной системы, Гц; полное электрическое сопротивление, Ом; частотную характеристику громкоговорителя по звуковому давлению и ее неравномерность; среднее стандартное звуковое давление; коэффициент гармоник; КПД.

Головки громкоговорителей прямого излучения бывают с простыми и сложными подвижными системами и предназначены для применения в бытовой и специальной РЭА (радиовещательных и телевизионных приемниках, магнитофонах, электрофонах и т. п.). Для них устанавливается ряд номинальных мощностей: 0,1;

0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 15; 20; 25; 30; 50 и 100 Вт и полных сопротивлений: 2, 4, 8, 15, 25, 50, 100, 400 и 800 Ом. Основные характеристики отдельных типов Г приведены в табл. 9.3, а их конструкции, формы крепежных ушек и размеры показаны на рис. 9.7. Паспортная мощность Г в 1,5—2 раза выше номинальной, указанной в табл. 9.3, или может быть равной ей (в зависимости от методов измерения), а неравномерность частотной характеристики в номинальном диапазоне частот 15 ± 3 дБ. Пример записи в конструкторской документации: головка 1ГД 3—100 (динамическая головка громкоговорителя прямого излучения с номинальной мощностью 1 Вт, порядковый номер 3, частота основного резонанса 100 Гц).

Абонентские громкоговорители используются в сетях проводного вещания с номинальным напряжением 30 В. Выпускаются в виде одно- и трехпрограммных громкоговорителей трех классов по ГОСТ 5961—76: I класс — номинальный диапазон частот 63...10 000 Гц с неравномерностью 12 дБ, стандартное звуковое давление 0,4 Па; II класс — 100...10 000 Гц, 15 дБ, 0,25 Па; III класс — 160...6300 Гц, 15 дБ, 0,23 Па. Их объем 4...6 дм³ при массе 1...4 кг.

По новой терминологии вместо «трехпрограммный громкоговоритель» говорят «приемник трехпрограммный», а вместо класса указывают группу сложности (высшая группа сложности для приемников трехпрограммных — II), что следует учитывать при анализе новой продукции. Основные модели АГ следующие: «Маяк» (I класс, три программы); «Лотос» и «Юность-201» (II класс, одна программа); «Прометей 201», «Русь» и «Электроника 202» (II класс, три программы); «Зенит-301», «Обь-301», «Сфера-301», «Тайга-304», «Черемшина-306» (III класс, одна программа).

Громкоговорители рупорные динамические используются для озвучивания больших помещений, площадей и спортивных сооружений. Промышленность выпускает ГР четырех классов на номинальную входную мощность 10; 25; 50 и 100 Вт по ГОСТ 12089—80: I класс — номинальный диапазон частот 80...10 000 Гц с неравномерностью 15 дБ; II класс — 100...6300 Гц, 15 дБ; III — 200...

Таблица 9.3

Основные параметры головок динамических

Тип	Номинальный диапазон частот, Гц	Среднее стандартное звуковое давление, Па	Полное сопротивление, Ом	Габариты, мм	Масса, кг
0,1ГД-6	450...3000	0,23	10	∅ 60	0,06
0,1ГД-13	450...3000	0,2	10	∅ 60	0,06
0,1ГД-17	450...3150	0,2	50	∅ 50×18	0,03
0,25ГД-1	315...3500	0,25	10	∅ 70×36	0,115
0,25ГД-2	315...7100	0,27	10	∅ 70×36	0,12
0,25ГД-10	315...5000	0,2	8	∅ 63×30	0,07
0,5ГД-30	125...10 000	0,32	16	125×80×47	0,19
0,5ГД-31	200...10 000	0,23	16	125×80×47	0,19
0,5ГД-36	1000...16 000	0,15	10	∅ 80×35	0,085
0,5ГД-37	315...7100	0,3	8	∅ 80×38	0,135
1ГД-3	5000...18 000	0,3	12,5	∅ 70×33	0,08
1ГД-36	100...12 500	0,2	8	100×160×58	0,27
1ГД-37	140...10 000	0,25	8	100×160×64	0,42
1ГД-40	100...10 000	0,28	8	100×160×45	0,31
1ГД-48	100...10 000	0,3	8	100×160×63	0,33
1ГД-50	180...18 000	0,2	8	∅ 100×36	0,2
1ГД-52	100...10 000	0,23	4	∅ 160×55	0,37
1ГД-54	125...10 000	0,27	8	80×125×47	0,19
1ГД-55	200...10 000	0,2	4	20×125×37	0,19
1ГД-56	6300...16 000	0,15	8	40×40×29	0,1
2ГД-22	100...10 000	0,2	12,5	82×280×77	0,45
2ГД-36	3000...20 000	0,2	8	50×80×40	0,09
2ГД-38	100...12 500	0,2	8	100×160×58	0,25
2ГД-40	100...12 500	0,25	4	100×160×47	0,32
3ГД-1	200...5000	0,3	8	∅ 150×54	0,3
3ГД-2	5000...18 000	0,25	16	63×63×31	0,2
3ГД-31	3000...20 000	0,2	8	∅ 100×48	0,34
3ГД-32	80...12 500	0,26	4	125×160×77	0,48
3ГД-38Е	80...12 500	0,2	4	∅ 160×55	0,3
3ГД-40	80...12 500	0,2	4	∅ 160×58	0,4
4ГД-8Е	125...7100	0,3	4	∅ 125×49	0,62
4ГД-35	63...12 500	0,25	4	∅ 200×76	0,88
4ГД-36	125...12 500	0,25	4	∅ 200×76	0,88
4ГД-53	100...12 500	0,25	4	∅ 125×50	0,62
6ГД-2	40...5000	0,27	6(3)	∅ 252×135	1,56
6ГД-3	100...10 000	0,4	4	160×240×87	1,2
6ГД-6	63...5000	0,1	4(8)	∅ 125×80	1,5
6ГД-11	3000...20 000	0,3	8	100×100×45	0,9
8ГД-1	40...1000	0,2	8	∅ 252×135	1,8
10ГД-30	63...5000	0,15	8	240×240×125	2,5
10ГД-34	63...5000	0,1	4	∅ 125×76	1,3
10ГД-35	5000...25 000	0,25	16	100×100×50	1,0
10ГД-36Е	63...20 000	0,15	4	∅ 200×80	1,2
15ГД-11 (11А)	200...5000	0,2	4(8)	∅ 125×74	1,3
15ГД-12	40...16 000	0,25 (0,2)	4; 15(8)	∅ 250×93	1,2
25ГД-26Б	40...5000	0,12	4	∅ 200×97	2,1
30ГД-2 (2А)	30...1000	0,15	4	∅ 250×124	6,0
ЛГ 001	2500...25 000	0,15	8	200×130×40	1,2

Примечания. 1. Номинальная мощность, Вт, дается первой группой цифр в обозначении типа.

2. ЛГ 001 — ленточный высокочастотный громкоговоритель с $P_{\text{ном}}=15$ Вт.

...4000 Гц, 15 дБ; IV — 500...3500 Гц, 15 дБ. ГР обязаны иметь две ступени переключения мощности в сторону уменьшения по 3 дБ каждая и должны быть рассчитаны на подключение через трансформатор к питающей сети напряжением 30; 120 и 240 В. Конструкция ГР позволяет изменять направление оси рупора в одной плоскости (в горизонтальной или вертикальной). Пример записи в конструкторской документации: 50 ГРД II-3 ГОСТ 12089—80 (громкоговоритель рупорный динамический

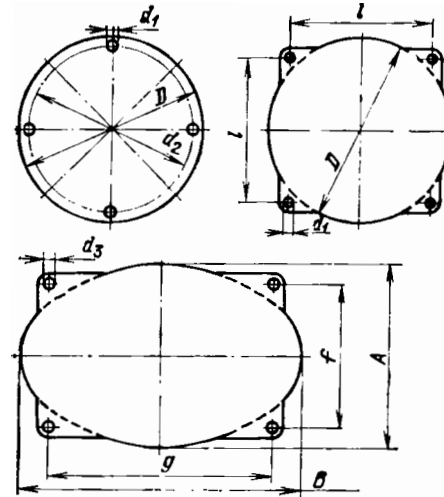


Рис. 9.7. Габаритные чертежи фланцев громкоговорителя

D	d ₁	d ₂	l	A	B	d ₃	i	g
25	3,2	23	20	20	31,5	3,2	16	25
31,5	3,2	29	25	25	40	3,2	20	31
40	3,2	37	31,5	35,5	50	3,2	25	40
50	3,2	46	40	40	63	3,2	31,5	50
63	4,3	58	50	50	80	4,3	40	63
80	4,3	74	63	63	100	4,3	50	80
100	5	92	80	80	125	5	63	100
125	5	114	100	100	160	5	80	125
160	5	148	125	125	200	5	100	160
200	5,5	184	160	160	250	5,5	125	200
250	5,5	233	200	200	315	5,5	160	250
315	6,5	295	250	250	400	6,5	200	315
400	9	380	320					
500	9	480	400					

Примечание. Все размеры указаны в мм.

с номинальной потребляемой из сети электрической мощностью 50 Вт, II класса, 3-й разработки).

Акустические системы — современные широкополосные акустические агрегаты с малыми частотными и нелинейными искажениями, выполненные в виде самостоятельных конструкций. Наиболее распространенной формой АС является параллелепипед. Используются шарообразные и пирамидальные формы. Различают одно-, двух-, трех- и многополосные АС, в которых используются одна, две, три или несколько Г; АС с фазоинвертором и компрессионного типа (они меньше по размерам, но обладают худшими электроакустическими параметрами); пассивные и активные (со встроенным усилительным устройством) АС.

Сводные данные основных типов отечественных АС приведены в табл. 9.4. Паспортная мощность АС в 2—3 раза выше номинальной, указанной в таблице; неравномерность частотной характеристики в номинальном диапазоне частот 18 ± 2 дБ; полное сопротивление большинства АС 4 Ом [хотя некоторые имеют 2 (8АС-3), 8 (50АС-Д, 10МАС-1М) и 16 (20АС1 и 20АС2) Ом]; среднее стандартное звуковое давление АС 0,1...0,25 Па. При конструировании АС основное внимание уделяется плотности и жесткости стенок футляра (который склеивают из ДСП или формируют из плотных пенопластов), взаимному расположению Г (для уменьшения фазовых искажений) и фазоинверто-

Таблица 9.4

Основные параметры отечественных акустических систем

Тип	Номинальная мощность, Вт	Номинальный диапазон частот, Гц	Габаритные размеры, см	Масса, кг
Орбита 001	100	20...30 000	48×45×105	60
Дойна (50АС-Д)	50	63...18 000	55×29×99	35
50АС-5	50	20...20 000	90×48×30	42
Амфитон 001	35	30...20 000	72×38×28	27
35АС-1 (1)	35	30...20 000	36×26×71	27
35АС-2 (2)	35	40...20 000	63×35×22	25
35АС-208	35	30...20 000	71×40×36	36
35АС-212 (S-90)	35	30...20 000	71×36×29	30
35АС-213 (S-70) (3)	35	30...20 000	33×58×25	25
25АС-2	25	40...20 000	48×29×25	12
25АС-16 (4)	25	63...25 000	21×14×14	—
25АС-309	25	40...20 000	48×29×26	12
25АС-416 (5)	25	63...20 000	21×15×14	4
20АС-1	20	63...18 000	31×25×44	10
20АС-2	20	40...18 000	63×34×24	30
15АС-1	15	63...20 000	44×24×16	7,6
15АС-6 (4)	15	100...20 000	18×12×11	2
10АС-3	10	63...20 000	27×43×27	10
10АС-403	10	63...18 000	43×27×31	10
10АС-413 (6)	10	63...18 000	∅ 22	3,8
10МАС-1М	10	63...18 000	43×23×27	8,5
8АС-2	8	40...18 000	62×36×27	20
8АС-3	8	100...10 000	47×27×17	5
6АС-2	6	63...18 000	16×16×30	3,5
6АСЛ-1	6	63...18 000	43×29×17	7
6АСШ-2 (6)	6	100...12 500	∅ 19	2,6
6МАС-4	6	63...20 000	18×28×19	4,5
4АС-2	4	125...16 000	18×27×10	2,5
3АС-3	3	125...10 000	21×28×15	4,5

Примечание. АС конструктивно выполняются с фазоинвертором (1), компрессионного типа (2), активными (3), с нетрадиционной подвижной системой (4), малогабаритными в металлическом прямоугольном корпусе (5) и в виде шара (6).

ру, который может быть выполнен с отверстием, со специальным проходом или пассивным излучателем (радиатором).

Головные телефоны могут быть электромагнитными, электродинамическими, пьезоэлектрическими и специальными (измерительными, для слуховых аппаратов и др.).

Наибольшее распространение получили электромагнитные ГТ, выполняемые двух типов: нормальные (для работы при $t = -10 \dots +45^\circ \text{C}$ и относительной влажности до $90 \pm 3\%$) и устойчивые ($t = +50^\circ \text{C}$, влажность $90 \pm 3\%$); диапазон воспроизводимых частот 300...3000 Гц, модуль полного сопротивления 260 ± 52 Ом. Кон-

структивно выпускаются в виде капсул для телефонных, слуховых аппаратов и головных телефонов.

Динамические ГТ имеют более широкий диапазон воспроизводимых частот (50...6000 Гц и выше) и относительно меньшие нелинейные искажения (не более 1,5...3%). Широко используются для прослушивания радиовещательных программ, в том числе стерео- и квадрофонических. Усовершенствование конструкции динамических ГТ заключается в уменьшении геометрических размеров и использовании новых компоновочных схем в виде орто- и изодинамических систем. Например, в изодинамических используется плоская магнитная сис-

Таблица 9.5

Основные параметры головных телефонов

Тип	Полоса воспроизводимых частот, Гц	Модуль полного сопротивления, Ом	Система	Масса, г
ДЭМ-4М	300...3000	600	ЭД	160
ТА-4	300...3000	300 (10 000)*	ЭМ	60
ТА-56М	300...3000	50 (600; 1600)**	ЭМ	35
ТГ-7М	300...3000	150	ЭМ	150
ТГ-9	200...6000	5000	ЭМ	170
ТД-6	100...5000	140	ЭД	110
ТДК	100...5000	160	ЭД	115
ТК-67Н	300...3400	260	ЭМ	60
ТКЭД	300...3400	260	ЭМ	60
ТМ-2	300...3000	450	ЭММ	20
ТМ-3	300...3000	450	ЭММ	20
ТМ-4	300...3000	50	ЭММ	10
ТОН-2	300...3000	12 000	ЭМ	170
ТДС-1	40...16 000	8—16	ЭДС	500
ТДС-3	20...20 000	8—16	ЭДС	450
ТДС-5	20...20 000	100	ОДС	350
ТДС-7	20...20 000	8	ИДС	390
ТПС-1	20...20 000	4—16	ПС	340

* Низко- и высокоомного типа.

** Низко-, средне- и высокоомного типа.

тема и легкая гибкая мембрана с плоской печатной катушкой; используются и пьезоэлектрические системы.

В табл. 9.5 приведены данные по основным моделям отечественных ГТ. Системы телефонов обозначены следующими аббревиатурами: ЭД — электродинамическая, ЭМ — электромагнитная, ЭММ — электромагнитная малогабаритная (эти ГТ вставляются в ушную раковину), ЭДС —

электродинамические стереофонические, ОДС — ортодинамические стереофонические, ИДС — изодинамические стереофонические и ПС — пьезоэлектрические стереофонические.

Номинальные мощности обычных монофонических ГТ не превышают единиц мВт. Стереофонические ГТ допускают кратковременную работу при уровнях долей и единиц Вт. Отдача ГТ лежит в пределах 2...25 Па/В.

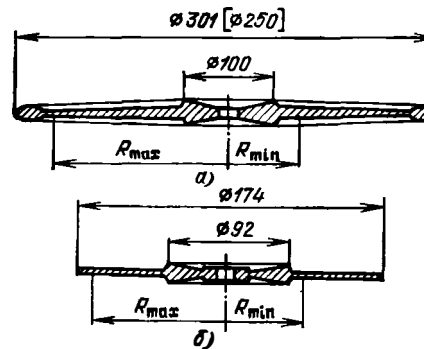


Рис. 9.8. Поперечное сечение грампластинок: а — формат $\varnothing 30$ и $\varnothing 25$; б — формат $\varnothing 17$

9.3. ДИСКОВЫЕ НОСИТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ИМ УСТРОЙСТВА

Носители информации

Выполняются в виде дисков из специальной гранулированной пластмассы или пленки, на которых звук записан механическим способом. Последовательность получения фонограммы НД следующая: студийная запись на магнитную пленку, перезапись фонограммы на лаковый диск, получение с помощью гальванотехники металлических копий в виде оригиналов и матриц, прессование пластинок

с матриц. Возможности НД весьма большие, разработаны видеодиски стандартного диаметра 301 мм, которые обеспечивают часовое воспроизведение (2×30 мин) цветной видеозаписи.

Кроме частоты вращения (в основном 33 1/3 мин⁻¹) определяющими параметрами НД являются геометрические размеры и характер записи. Основные размеры и параметры НД даны на рис. 9.8—9.10 и в табл. 9.6. Отечественные грампластинки должны удовлетворять требованиям ГОСТ 7893—79. Диапазон воспроизводимых ими частот 31,5...16000 Гц.

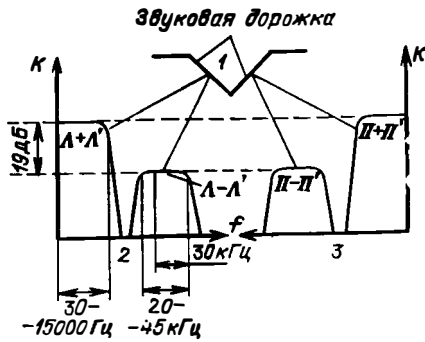


Рис. 9.10. Условная схема разделения каналов полной стереофонии СД-4 при записи на грампластинку: 1 — звуковая канавка; 2 — график, изображающий частотное разделение каналов на левой звуковой дорожке; 3 — то же, на правой звуковой дорожке (зеркальное отражение)

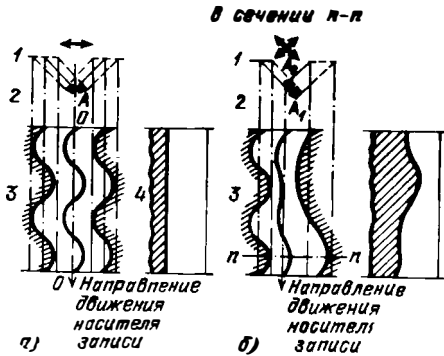


Рис. 9.9. Образование монофонической (а) и стереофонической (б) канавки: 1 — направление составляющих колебаний реза; 2 — поперечный разрез канавки; 3 — вид канавки в плане; 4 — продольный разрез по дну канавки

Головки звукоснимателей

Наиболее распространенными являются ГЗ магнитного и пьезоэлектрического принципов преобразования колебаний иглы в электрические сигналы. Такие ГЗ состоят из иглодержателя с алмазной или корундовой иглой (иногда используют поворотный иглодержатель с двумя разными иглами для пластинок разных типов), собственно преобразователя и колодки с выводами. Схематически конструкция ГЗ, соответствующая ГОСТ 18631—73, рекомендациям МЭК и стандарту ФРГ DIN 45339, показана

Таблица 9.6

Грампластинки моно- и стереофонические с узкой канавкой

Частота вращения, мин ⁻¹	Наружный диаметр, мм	Радиус канавки R _{max} , мм	Радиус канавки R _{min} , мм	Диаметр центрального отверстия, мм	Масса, г, не более
33 1/3	301	144	60	7,24 ^{+0,09}	184
	230	119	60		
	174	84	53		
45,11	174	84	53	7,24 ^{+0,09}	50
				или 38,5 ^{+0,1}	

Примечания. 1. Грампластинки гибкие диаметром 174 мм изготавливают из пленки 0,15...0,12 мм с массой ~6 г. Их допускается воспроизводить только на ЭПУ, в которых используются облегченные ГЗ.

2. Грампластинки стереофонические (с четырехканальной записью) пока серийно не выпускаются.

3. Ширина канавки: монозапись 70 (немой) и 50...70 мкм (модулированной), стереозапись — 50 и 35...120 мкм. Радиус дна канавки не более 0,8 мкм.

Таблица 9.7
Основные параметры отечественных головок звукоснимателей

Тип	Полоса воспроизводимых частот, Гц	Приведенная масса иглы, г	Форма конца иглы
ГЗМ-003	20...20 000	1,5	Конус
ГЗМ-005	20...20 000	1,5	—>—
ГЗМ-008	20...20 000	1,0	Эллипс
ГЗМ-103	31,5...16 000	1,5	Конус
ГЗМ-105	30...18 000	2,0	—>—
ГЗКУ-631Р	80...10 000	—	—>—
ГЗК-208	80...12 000	—	—>—

Примечания: 1. Неравномерность в полосе воспроизводимых частот ±(2...6) дБ.
2. Масса ГЗ 5...8 г.
3. Разделение каналов 15...25 дБ.
4. Гибкость подвижной системы (6...20)·10⁻³ мН.

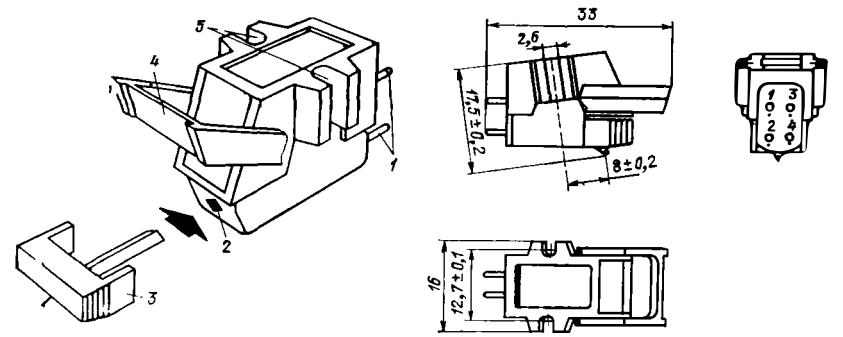


Рис. 9.11. Основные геометрические размеры головки звукоснимателя (ГЗМ-003 и ГЗМ-103): 1 — контактные выводы; 2 — гнездо для вставки; 3 — вставка; 4 — предохранительная скоба; 5 — пазы под винты

на рис. 9.11, основные параметры ГЗ приведены в табл. 9.7.

Для различия ГЗ используют символические и цветовые характеристики. Головка звукоснимателя может иметь три (белый, черный, красный) или четыре (белый, синий, красный, зеленый) вывода следующего назначения: 1 — левый канал, 2 — общий (земля), 3 — правый канал или 1 — левый канал, 2 — земля левого канала, 3 — правый канал, 4 — земля правого канала.

Иглы для головок звукоснимателей

Игла является важным элементом ГЗ, от которого зависят все ее параметры. В настоящее время используют встроенные в ГЗ алмазные или

корундовые иглы, строго фиксированные относительно тонарма и грампластинки. Различают иглы по сечению (цилиндрическое или эллиптическое) и профилю конца. Наиболее просты в изготовлении иглы с цилиндрическим сечением и заточкой конца на конус; более сложные, но и более качественные — с эллиптическим сечением и эллиптическим конусом на конце. Наилучшими параметрами в настоящее время обладают иглы с шестигранным сечением и радиусом закругления острия около 8 мкм (иглы Шибата), которые позволяют воспроизводить высокие частоты до 45 кГц.

В соответствии с ГОСТ 7765—70 выпускаются алмазные и корундовые иглы (табл. 9.8 и рис. 9.12). В пос-

Параметры игл для звукоснимателей

Алмазные иглы	Корундовые иглы	R, мм	L, мм	Область применения
A18/0,8	K18/0,8	0,018 _{-0,005}	0,8±0,1	Для воспроизведения стереофонической и монофонической записи с узкой канавкой при нагрузке на иглу не более 30 мН
A18/1,2	K18/1,2	0,018 ^{+0,001} _{-0,004}	1,2±0,1	То же, но при нагрузке на иглу не более 70 мН
A18/1,5	K18/1,5	0,070 ^{+0,006} _{-0,019}	1,5±0,1	
	K70/1,2		1,2±0,1	Для воспроизведения монофонической записи с широкой канавкой при нагрузке на иглу не более 100 мН
	K70/1,5	1,5±0,1		

Примечание. Оптимальная масса иглы 0,015 ... 0,02 карата.

ледние годы в высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуре используются эллиптические иглы, позволяющие осуществить лучший контакт иглы со звуковой канавкой и уменьшать искажения за счет огибания.

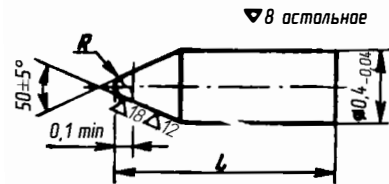


Рис. 9.12. Основные размеры игл для головки звукоснимателя

Тонармы

Так как при записи резец рекордера движется по радиусу пластинки, а игла ГЗ по кривой, то конструкцию Т выполняют таким образом, чтобы разница в траекториях движения резца рекордера и иглы была бы минимальной, а скатывающая и прижимная силы легко бы регулировались. Для компенсации скатывающей силы чаще всего используют противовесы, «тянущие» ГЗ в сторону, противоположную действию скатывающей силы. Для регулировки прижимной силы используют противовес на коротком плече Т. При этом тщательно конструируют опору Т, сводя в ней тре-

ние к минимуму. На рис. 9.13 представлены конструкции современных Т.

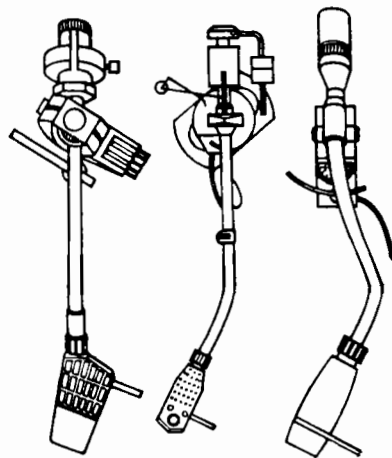


Рис. 9.13. Прямой (фирма Торенс), изогнутый (фирма SME) и S-образный (фирма Ортофон) тонармы

Наиболее простая и распространенная схема установки Т на одну опору показана на рис. 9.14. Значения установочной базы R, длины тонарма L (от точки поворота до кончика иглы) и корректирующего угла β можно определить по значениям радиуса промежуточной канавки r_п, максимального и минимального ра-

диусов (r₁ и r₂) пластинки, зная любые две величины из трех (R, L, β):

$$r_{п} = \sqrt{0,25(r_1 + r_2)^2 + 3r_1r_2} - 0,5(r_1 + r_2);$$

$$R = \sqrt{L^2 - r_{п}^2}; \quad L = \sqrt{R^2 + r_{п}^2};$$

$$\beta = \arcsin [(r_{п}^3 + 3r_2^2 r_{п}) \div$$

$$(2Lr_2^2 + 2Lr_2r_{п})].$$

По углу φ для данного r_п φ = arcsin[(L² - R² + r₂²) ÷ 2Lr₂] можно вычислить угол погрешности α = φ - β и коэффициент второй гармоники (в процентах) K₂ при номинальном уровне записи 10 см/с: K₂ = 83,5αu⁻¹r_п, где α, град и, мин⁻¹; r_п, см.

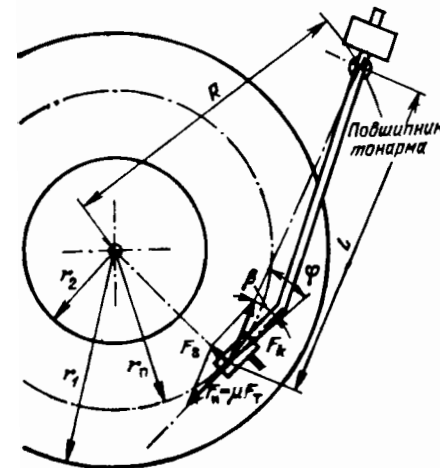


Рис. 9.14. Схема действующих на иглу сил и параметры, определяющие установку тонарма и головки звукоснимателя (F_н — сила тяги; F_с — скатывающая сила)

Значительное уменьшение приведенной массы иглы потребовало разработки таких конструкций тонармов, в которых не только уменьшен угол погрешности α, но и имеются прецизионно регулируемые балансирующие грузы и устройства компенсации скатывающей силы F_с. Так как тонарм с одной точкой опоры при самой рациональной конструкции все равно имеет определенное значение угла погрешности, то для его дальнейшего уменьшения применяют квазитангенциальные и тангенциальные

(рис. 9.15) тонармы. В квазитангенциальных Т используют прецизионный четырехшарнирный узел установки, позволяющий в 100 раз уменьшить погрешности. Такие Т сложны в расчете и изготовлении. Тангенциальные Т принципиально позволяют свести к нулю угол погрешности, но требуют сложного следящего устройства, «ведущего» Т и иглу по канавке. Такие Т использованы в отечественных ЭПУ «Каравелла 203-стерео», и «Электроника Б1-04-стерео».

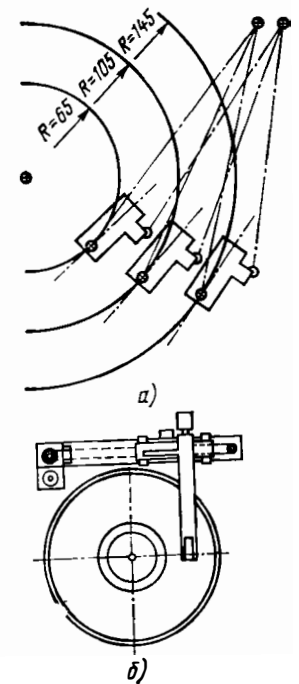


Рис. 9.15. Схемы квазитангенциального (а) и тангенциального (б) тонармов

9.4. ЛЕНТОЧНЫЕ И ПРОВОЛОЧНЫЕ НОСИТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ИМ УСТРОЙСТВА

Носители информации, кассеты

В магнитной записи используются порошковые и металлизированные носители, металлическая пленка (в специальной аппаратуре) и магнитная

Таблица 9.9

Электроакустические и физико-механические свойства пленочных носителей для бытовой аппаратуры магнитной записи

Параметр	A4402-6	A4407-6B	A4409-6B	A4407-6B	A4309-6B	A4203-3	A4205-3	A4212-3
Относительная величина тока оптимального высокочастотного подмагничивания, дБ	2	0±1	0±1	0±1	0±1	0±1	0±1	4
Относительная средняя чувствительность, дБ, не менее	1,5	2	3	2	3	-1	0	-3
Неравномерность чувствительности в пределах рулона, дБ, не более:								
400 Гц	±1,5	±1	±0,5	±1	±0,5	±1	±0,5	±0,4
10 000 (12 500) Гц	±3	±3	±1,5	±3	±1,5	±4	±1,5	±1,3
Относительная частотная характеристика, дБ, не более	+2	+4	+6	+4	+6	0	+1	+5
Нелинейные искажения, %, не более, при намагниченности, нВб/м:								
256	3	2	—	2	—	2,5	1,2	—
320	—	—	2	—	2	5	3	2
Относительный уровень шума намагниченной ленты, дБ, не более	-36	-42	-42	-42	-42	-38	-40	-42
Относительный уровень шума паузы, дБ, не более	-50	-54	-56	-54	-57	-46	-48	-52
Относительный уровень стирания, дБ, не более	-70	-70	-77	-70	-77	—	—	—
Нагрузка, соответствующая пределу текучести, Н, не менее	12	17	17	13	13	5	6	6
Остаточное удлинение после снятия нагрузки, %	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,15	0,05	0,05
Относительное удлинение под нагрузкой, 10 Н, %, не более	1,5	1,4	1,4	1,8	1,8	1,3	0,7	0,6
Абразивность, мкм/м, не более	0,5	0,5	0,05	0,2	0,05	0,1	0,05	—
Толщина ленты, мкм	37	37	37	27	27	17	17	17
Ширина ленты, мм	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	3,81	3,81	3,81

проволока. В БАМЗ используют двухслойные НП, в которых на основу из полиэтилентерефталата наносят рабочие слои из порошка железа (металлические ленты), гамма-оксида железа или двуоксида хрома. В диктофонах, репортажных и специальных магнитофонах применяются НП из железоникельхромовых сплавов (диаметр проволоки 50... 100 мкм); их электроакустические свойства мало отличаются от НП.

В табл. 9.9 приведены сведения по отечественным НП (ГОСТ 21402.0—75 и рекомендации СЭВ по стандартизации РС 2116—82). Размеры НП по ГОСТ 8303—78; для БАМЗ НП выпускаются шириной 3,81_{-0,05} мм (ГОСТ 21402.1—75); 6,25±0,05 мм (ГОСТ 21402.2—75).

Толщина НП для катушечных магнитофонов 55; 34±4 и 27 мкм для кассетных 18₋₂ мкм. Схемы расположения фонограмм показаны на рис.

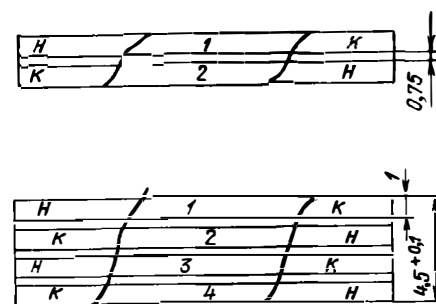


Рис. 9.16. Схемы расположения двух- и четырехдорожечных фонограмм

9.16: при двухдорожечной записи монофонической 1, стереофонической 1 и 2; при четырехдорожечной: монофонической 1, 4, 3, 2 и стереофонической 1 и 3, 4 и 2.

Параметры звучания НП даны в табл. 9.10, а размеры катушек для них — на рис. 9.17. По действующим правилам технической эксплуатации начальные ракорды должны иметь цвета: для скорости 76,2 см/с — белый; 38,1 см/с — зеленый; 19,05 см/с — желтый; 9,53 см/с — синий. Конечные ракорды при всех скоростях красного цвета.

Для кассетных магнитофонов НП заряжается в стандартные кассеты типа МК. Время звучания кассеты М-60 2×30 мин. Число прогонов НП

должно быть не менее 300, габаритные размеры даны на рис. 9.18. Дисковые носители должны сохранять работоспособность после воздействия климатических условий: $t = -20^{\circ}\text{C}$ и $+50^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч; относительной

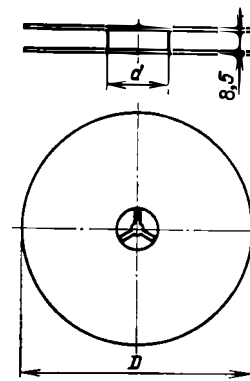


Рис. 9.17. Основные размеры катушек для катушечных магнитофонов

влажности 93% при $t = +25^{\circ}\text{C}$ в течение 48 ч; механических нагрузок: ударных (ускорение 98 м/с², число ударов 20) и вибрационных (ускорение 29,4 м/с², частота 10...70 Гц в течение 2 ч).

Особую группу составляют рабочие измерительные ленты (ЛИР), которые применяются для проверки настройки магнитофонов. Выпускаются для четырех скоростей движения НП (76,2; 38,1; 19,05 и 9,53 см/с) и комплектуются из трех самостоятельных частей: «У» — для проверки усиления канала воспроизведения на частоте 400 Гц, «Ч» — для проверки частотной характеристики канала вос-

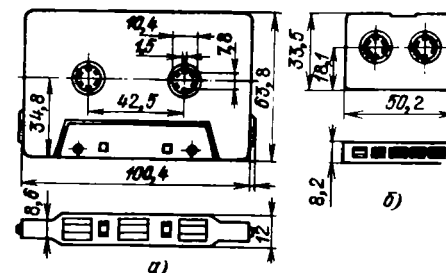


Рис. 9.18. Чертеж компактной кассеты (а) и микрокассеты (б)

Таблица 9.10

Длительность звучания пленочных носителей катушечных магнитофонов

Обозначение катушки по ГОСТ 13278-77	D, мм	d, мм	Скорость М.Л. см/с	М.Л. 27 мкм		М.Л. 37 мкм		М.Л. 55 мкм	
				Время звучания одной дорожки, мин	Длина М.Л., м	Время звучания одной дорожки, мин	Длина М.Л., м	Время звучания одной дорожки, мин	Длина М.Л., м
7,5	76	35	9,53	—	—	16	70	—	—
10	102	35	9,53	—	—	35	150	—	—
13	127	45	19,05 9,53 4,76	31 62 124	360	23 46 92	250	15,5 31 62	180
15	146	50	19,05 9,53 4,76	45 90 180	500	33 67 134	350	22,5 45 90	250
18	178	60	19,05 9,53 4,76	93 186 372	705	62 130 260	520	32,5 65 130	350

Примечание: Масса катушек 20...85 г.

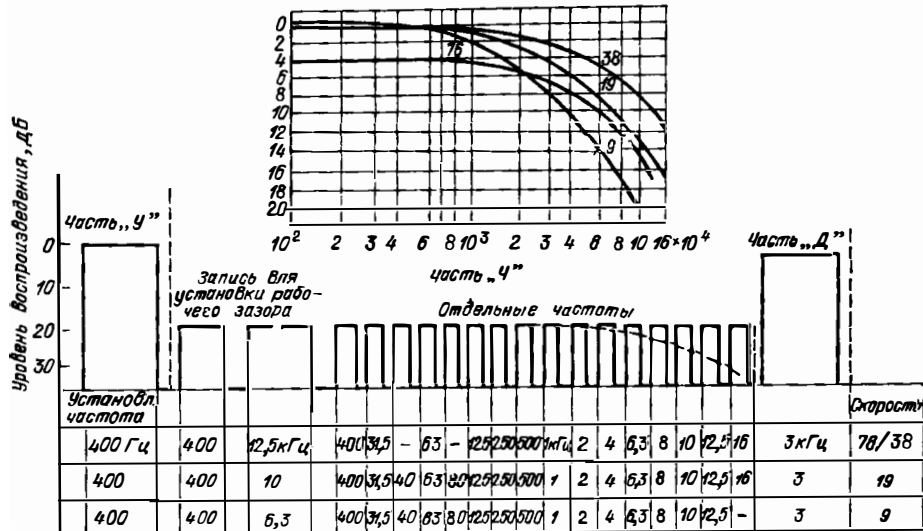


Рис. 9.19. Параметры рабочих измерительных лент (тип ЛИР)

произведения на частоте 12 500 Гц и установкой положения рабочих зазоров МГ; «Д» — для измерения коэффициента детонации ЛПМ (на частоте 3150 Гц). Частотные характеристики ЛИР приведены на рис. 9.19.

Магнитные головки

Преобразуют электрические сигналы звуковой частоты в магнитное поле, под действием которого происходит намагничивание (перемагничивание) носителя информации. По ГОСТ 19775—81 МГ подразделяются на следующие: записи, воспроизведения, универсальные, стирающие и блоки. В табл. 9.11—9.13 приведены параметры МГ; на рис. 9.20 даны их габаритные и присоединительные размеры.

В настоящее время созданы ферритовые МГ записи, воспроизведения и универсальные, обладающие повышенными электрическими и механическими характеристиками (срок

службы ферритовой головки 10...15 тыс. ч непрерывной работы, ширина рабочего зазора 1 мкм).

Магнитные головки должны сохранять номинальные параметры после воздействия климатических условий: $t = +70^\circ\text{C}$ (-20°C) в течение 4 ч, влажности $93 \pm 2\%$ при $t = +30 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 48 ч; механических нагрузок: ударных (ускорение 15g, длительность ударного импульса 5...10 мс, частота 40...80 ударов/мин, число ударов не менее 5000) и вибрационных (ускорение 3g, частота 10...70 Гц в течение 4 ч). Вероятность безотказной работы МГ в течение 1000 ч не менее 0,9.

Условные обозначения МГ: первая цифра — ширина НП (3 для ленты шириной 3,81 мм, 6 — для 6,25 мм); первая буква — назначение (А — записи, В — воспроизведения, С — стирания, Д — универсальная); вторая цифра — максимальное число одновременно воспроизводимых, записываемых или стираемых дорожек

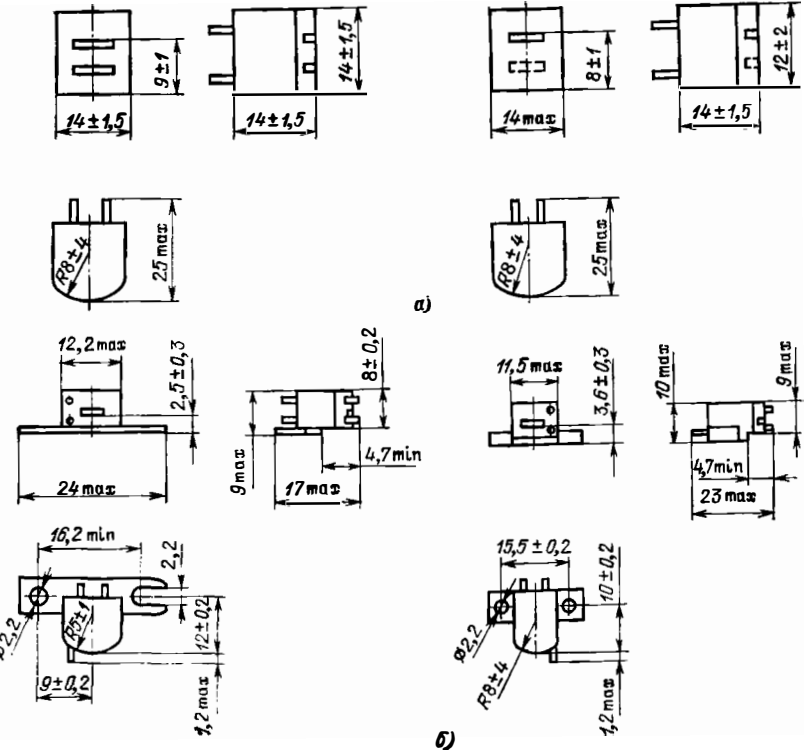


Рис. 9.20. Основные размеры стерео- (а) и моно- (б) магнитных головок

Таблица 9.11

Электрические параметры магнитных головок

Наименование параметра МГ	Тип МГ на ширину МЛ 6,25 мм			Тип МГ на ширину МЛ 3,81 мм
	Д	А	В	Д
Коэффициент эффективности, не менее	$4,0(3,5) \cdot 10^{-3}$	—	$4,8(4,5) \cdot 10^{-3}$	$4,5(4) \cdot 10^{-3}$
Частотные потери на верхней частоте рабочего диапазона головки, дБ, не более	3(4)	—	1(2)	2(3)
Щелевые потери при минимальной рабочей длине волны, дБ, не более	6(8)	—	5(7)	3(7)
Неравномерность частотной характеристики в области низших частот при максимальной рабочей скорости, дБ, не более	2(4)	—	2(4)	—
Коэффициент гармоник в скорректированном тракте, %, не более	3	2,5(3)	—	3(4)
Спад частотной характеристики записи на верхней частоте рабочего диапазона относительно частоты 400 Гц, дБ, не более	—12	—12	—	—
Потери на верхней частоте рабочего диапазона из-за перекося рабочих зазоров головок в блоке, дБ, не более	2(3)	2(3)	2(3)	2
Относительный уровень проникновения из одной головки блока в другую, дБ, не хуже	—38 (—35)	—43 (—38)	—42 (—40)	—30 (—25)
Уровень помех от внешних магнитных полей, дБ, не более	0	—	0	0
Относительный уровень проникновения с соседней дорожки записи, дБ, не хуже	—30 (—26)	—	—30 (—26)	—

Примечание. Без скобок указана улучшенная категория МГ, в скобках — обычная.

фонограммы; третья цифра — максимальное число дорожек фонограммы на ленте; вторая буква — особенность МГ (Н — с низким полным сопротивлением, П — с высоким полным сопротивлением); цифры после точки — номер модификации; третья буква — категория МГ (У — улучшенная, О — обычная) и номер ГОСТ. Например: головка магнитная 6Д24Н.1У ГОСТ 19775—81.

9.5. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ЗВУКОНОСИТЕЛЕЙ

К ним относятся: электропроигрывающие устройства для электрического воспроизведения механической звукозаписи с граммофонных пластинок и лентопротяжные механизмы для равномерного перемещения НП вдоль МГ.

Таблица 9.12

Усредненные параметры магнитных головок

Назначение МГ	Индуктивность, мГн	Зазор, мкм	ЭДС при воспроизведении, мВ	Ток записи, мА	Ток подмагничивания, мА	Ток стирания, мА
НП шириной 6,25 мм						
Запись	20	7	—	0,4	3	—
Воспроизведение	50...100	3...8	0,3	—	—	—
Универсальная	500...1000	4	2,2	0,1	0,6	—
	60...100	3	0,35	0,3	2,0	—
Стирающая	0,5...5	100...250	—	—	—	60...80
НП шириной 3,81 мм						
Универсальная	45...100	1,5...1,8	0,15...0,36	0,15...0,3	0,5...2,2	—
Стирающая	0,2...0,8	100...200	—	—	—	80...100

Примечание. 1. Приведены усредненные данные по унифицированным МГ и МГ индивидуального производства для отдельных моделей («Айда», «Дайна», «Яуза» и т. п.).

2. Универсальные МГ могут быть с высоким и низким полным сопротивлением.

Таблица 9.13

Параметры магнитных головок, используемые для определения рабочих свойств НП

Вид МГ	Ширина рабочего зазора, мкм		Ширина дополнительного зазора, мкм	Длина дуги контакта с лентой, мм
	эффективная	измеренная под микроскопом		
С	—	100 ± 5 (2 зазора)	—	4 ± 5
З	—	20 ± 1 (1) 4 ± 1 (2)	100 ± 5	$2,5 \pm 0,5$
В	$4 \pm 0,5$ (1) $2 \pm 0,5$ (2)	—	—	$2,5 \pm 0,5$

Примечания. 1. Зазоры указаны для НП шириной 6,25 (1) и 3,81 мм (2).
2. Радиус рабочей поверхности 11 мм.

Электропроигрывающие устройства

ЭПУ состоит из двигателя, движущегося механизма с изменяющейся редукцией, массивного диска и звукоснимателя. Кроме того, в зависимости от класса ЭПУ могут иметь ряд вспомогательных устройств, автостоп, микролифт, приспособление для подстройки частоты вращения, механизм возврата звукоснимателя в исходное положение и др. ЭПУ устанавливается в электропроигрывателях,

электрофонах, радиоллах и другой комбинированной радиоаппаратуре бытового назначения. По ГОСТ 18631—73 ЭПУ делятся на четыре класса: высший, I, II и III. Стандартные номинальные частоты вращения ЭПУ: 92; 78; 45; $33 \frac{1}{3}$; $16 \frac{2}{3}$ и 11 мин⁻¹. По механическим и климатическим требованиям ЭПУ должны соответствовать ГОСТ 11478—75.

Оптимальные условия работы ЭПУ: $t = +25 \pm 10^\circ \text{C}$; относительная влажность $65 \pm 15\%$, атмосферное давле-

Таблица 9.14

Электромеханические и электрические параметры электроприводящих устройств

Параметры	Нормы по классам			
	Высший (Головка ГЗМ-003, стерео)	I (Головка ГЗМ-103, стерео)	II (Головка ГЗКУ-631Р, ГЗК-661, стерео или моно)	III (Головка ГЗК-38Н, моно)
Прижимная сила звукоснимателя, мН, не более:	10^{+5}	20^{+10}	30^{+10} 60^{+10}	— 60^{+10}
магнитного пьезоэлектрического	—	—	—	—
Допускаемые отклонения от номинального значения частоты вращения, %, не ниже	$\pm 0,55$	$\pm 1,20$	$\pm 1,80$	$\pm 2,10$
Коэффициент детонации для стереофонических (монофонических) ЭПУ, %	$0,1^{+0,05}$	$0,1^{+0,05}$	$0,15^{+0,05}$ $(0,2^{+0,05})$	$(0,25^{+0,05})$
Относительный уровень помех от вибраций, дБ, не ниже	-60	-46	-31	-28
Горизонтальная гибкость подвижной системы магнитного (пьезоэлектрического) звукоснимателя, мН, не менее	$10 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$(1,1 \cdot 10^{-3})$	$(1,1 \cdot 10^{-3})$
Частотная характеристика (номинальный диапазон воспроизводимых частот), Гц	20...20 000	31,5...16 000	50...12 500	50...10 000
Чувствительность для стереофонических ЭПУ с магнитным (пьезоэлектрическим) звукоснимателем, мВ/см/с	$0,7^{+1,0}$	$0,7^{+1,0}$	$0,7^{+1,0}$ (50)	(50)
Разбаланс звукоснимателя по чувствительности и по частотной характеристике в диапазоне частот 315—5000 Гц, дБ, не более	2	2	3	—
Разделение между стереоканалами, дБ, не ниже:				
на частоте 315 Гц	-20	-15	-10	—
» » 1000 Гц	-20	-20	-15	—
» » 5000 Гц	-20	-15	-10	—
» » 10 000 Гц	-15	-6	0	—
Уровень электрического фона (для ЭПУ с магнитным звукоснимателем), дБ, не ниже	-67 (-63)	63 (-57)	-57 (-53)	-53
Уровень акустического шума приводного механизма, дБ, не более	30	30	34	38

ние 86...106 кПа, номинальное напряжение питания с допустимыми отклонениями $\pm 2\%$. Электрическая нагрузка каждого канала звукоснимателя состоит из параллельно включенных активного сопротивления 100 ± 50 кОм и емкости 150 ± 10 пФ или 47 ± 5 кОм (для звукоснимателя с магнитными головками) на частоте 1000 Гц. Основные параметры ЭПУ даны в табл. 9.14.

Лентопротяжный механизм

Используются следующие стандартные (ГОСТ 12392—71) номинальные скорости движения МЛ: 76,2; 38,1; 19,05; 9,53; 4,76 и 2,38 см/с. Последние три скорости применяются в магнитофонах для любительского использования; скорость 9,53 см/с исполь-

зуется также в корреспондентских магнитофонах. Для радиовещания в основном используется скорость 38,1 см/с. Оптимальные условия работы ЛПМ: $t = 25 \pm 10^\circ\text{C}$, относительная влажность $60 \pm 15\%$, атмосферное давление 86...106 кПа.

Отклонение скорости МЛ от номинального значения не более $\pm 2\%$ на любой скорости, а коэффициент детонации, %, при скоростях 19,05 см/с $\pm 0,1$ (0,2)%; 9,53 см/с $\pm 0,3$ (0,4) % и 4,76 см/с $\pm 0,4\%$.

Двигатели. Для ЭПУ и ЛПМ (ГОСТ 14191—81 и ГОСТ 5.2051—73) используются электродвигатели переменного тока. По принципу действия и конструкции они делятся на синхронные и асинхронные (с экранированными полюсами АД и конденсаторными КД). Параметры электродвигателей

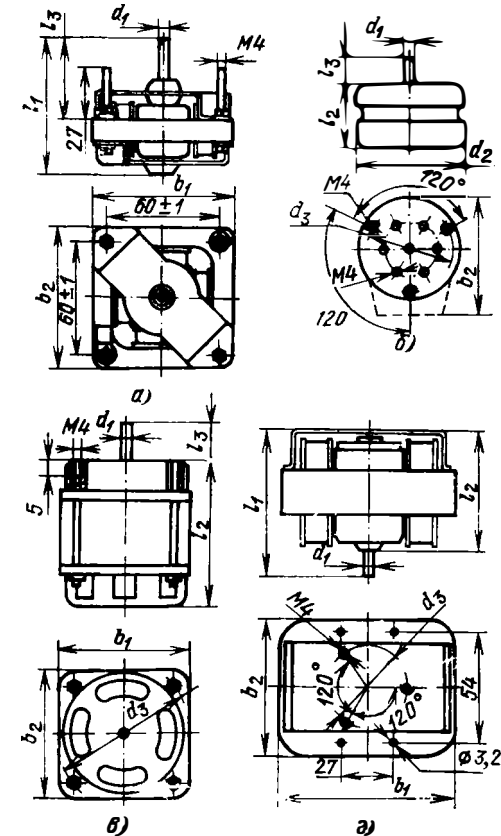


Рис. 9.21. Различные конструкции двигателей

Таблица 9.15

Электрические параметры основных типов электродвигателей для электропроигрывающих устройств и лентопротяжных механизмов

Тип	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, Вт	Пусковой момент на валу, Н·см	Частота вращения, мин ⁻¹	Мощность на валу, Вт	Емкость конденсатора, мкФ	Назначение
ЭДГ-1	127	13	0,8	2800	—	0,5	ЭПУ
ЭДГ-1М	220	35	1,2	2800	—	1	ЭПУ и ЛПМ
ЭДГ-2	110	20,5	0,8	2800	—	3	ЛПМ
ЭДГ-2П	127	40	2,4	2600	—	4	ЛПМ
КД-6-4	220	—	2,95	1400	6	0,5	ЛПМ
КДП-6-4	127	16/50	4/15	850	—	4	ЛПМ
АД-5	127	35	3,5	1400	6	2	ЛПМ
СД-6	127/220	—	1,2	3000	6	2,5	ЛПМ
КД-3.5А	127	—	2,5	1400	6	2	ЭПУ
АДТ-1,6/10-2	127/220	—	0,51	2800	1,6	—	ЛПМ
АДТ-6	127/220	—	2,08	2830	6	—	ЛПМ

Таблица 9.16

Габаритные размеры электродвигателей

Тип	b_1	b_2	l_1	l_2	l_3	d_1	d_2	d_3	Масса, кг
ЭДГ-1	74	74	84,3	—	—	4,5	—	—	0,6
ЭДГ-1М	74	74	77,5	—	—	4,5	—	—	0,85
ЭДГ-2	74	74	72,6	—	38,2	4,5	—	—	0,8
ЭДГ-2П	74	74	72,6	—	—	4,5	—	—	0,8
КД-6-4	—	100	—	57	27	5	89	77	1,1
КДП-6-4	—	100	—	65	22	5	89	77	1,26
АД-5	—	—	—	77,5	22,5	6,5	87	44	1,3
СД-6	—	—	—	76,1	27	5	90	44	1,1
КД-3.5А	65	65	—	77	21	5	—	—	1
АДТ-1,6/10-2	88	66	70	56	—	5	—	—	1
АДТ-6	100	80	100	78	—	5	—	—	1,7

Примечание. Все размеры указаны в мм.

Таблица 9.17

Основные параметры сверхтихоходных электродвигателей

Тип	Частота вращения, мин ⁻¹	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Уровень рокота, дБ
ДСК-50-1,6	375	∅ 50×32	0,17	—57
ДПТ-0,17	33 1/3/45	∅ 160×70	1,2	—66
ДЭК-33/45	33 1/3/45	∅ 110×64	1,1	—68

тродвигателей даны в табл. 9.15, а габаритные размеры, соответствующие рис. 9.21, — в табл. 9.16.

Особым видом синхронных двигателей являются сверхтихоходные двигатели с ременным (ДСК-50-1,6) или с непосредственным приводом на диск ЭПУ

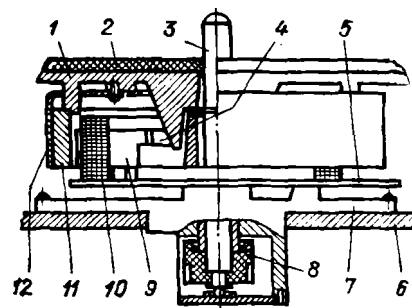


Рис. 9.22. Схематическое изображение конструкции сверхтихоходного двигателя: 1 — диск; 2 — резиновая подкладка; 3 — ось; 4 — датчик положения; 5 — плата; 6 — основание; 7 — корпус двигателя; 8 — колесо зубчатое; 9 — статор; 10 — обмотка статора; 11 — кольцевой магнит; 12 — экран

(ДПТ-0,17 и ДЭК-33/45). Схематическое изображение такого вида Д показано на рис. 9.22, основные параметры приведены в табл. 9.17.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменко Б., Демидов О., Усачева Е. Громкоговорители для бытовой радиоаппаратуры. — Радио, № 1, 1979.
2. Мищенко В., Варянка В., Винницкий О. Изодинамические стереотелефоны «Амфитон» ГДС-7. — Радио, № 7-8, 1981.
3. Дегрелл Л. Проигрыватели и грампластинки: Пер. с венг./Под ред. Ю. А. Вознесенского. — М.: Радио и связь, 1982.
4. Варшавская И., Казачков Б., Лазарева С. Электродвигатели переменного тока для магнитофонов и электропроигрывающих устройств. — Радио, № 7, 1975.
5. Справочник по акустике/В. К. Иофе, В. Г. Корольков, М. А. Сапожков; Под ред. М. А. Сапожкова. — М.: Связь, 1979.

Г. ОПТИМИЗАЦИЯ, НАДЕЖНОСТЬ, КАЧЕСТВО

10. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

Основные аббревиатуры

ВЧ	— высокочастотный
Д	— дроссель
ММ	— математическая модель
ПМ	— поле монтажное
ПП	— печатная плата
ПЭ	— планирование эксперимента
ТММ	— трансформаторы малой мощности
ТЭЭ	— типовой элемент замены
ЭРЭ	— электрорадиоэлементы (дискретные и в виде микросхем)

10.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МЕТОДЫ

Качество любой системы (РЭА, электронных блоков, ЭРЭ и т. д.) определяется вектором $K = (K_1, \dots, K_i, \dots, K_m)$ показателей качества. Каждый из показателей K_i ($i=1 \dots m$) является таким параметром системы, с увеличением или уменьшением которого качество системы монотонно улучшается при прочих равных условиях [1].

Оптимальной системой называется такая система, которая обладает значением вектора K , наилучшим в заранее установленном смысле. Критерий, согласно которому одно значение вектора K считается лучше или хуже другого его значения, называется критерием оптимальности системы.

Показателями качества системы могут быть, например, занимаемый объем V , масса G , стоимость C , потребляемая мощность P и другие параметры в зависимости от конкретной системы и условий ее эксплуатации. Очевидно, что критерием оптимальности системы в отношении, например, объема системы $K_1 = V$ будет зависимость: чем меньше V , тем лучше K_1 и т. д.

Одной из основных задач при оптимизации системы в целом является оптимизация ее параметров $x_1, \dots, x_i, \dots, x_m, \dots, x_n$ ($n > m$), т. е. отыскание таких значений $x_1, \dots, x_i, \dots, x_m, \dots, x_n$, при которых достигается наилучшее значение вектора K показателей качества.

Каждый из показателей качества K_1, K_2, \dots, K_m в общем случае зависит от всех n параметров системы:

$$K_1 = f_1(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n),$$

$$K_2 = f_2(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n),$$

$$K_m = f_m(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n).$$

Функции f_m называются целевыми функциями.

Наряду с обособованием вектора K показателей качества (определением целевых функций) системы и критерия оптимальности для оптимизации параметров системы в исходных данных в общем случае требуется установить совокупность ограничений, накладываемых на показатели качества и параметры синтезируемой системы. Ограничения могут быть, например, типа равенств $K_i = K_{i0}$; $x_i = x_{i0}$; неравенств $K_i \leq K_{imaxi}$; $K_i \geq 0$; $x_i \leq x_{imaxi}$; связей $h_i(K_1, \dots, K_m) \leq 0$; $g_j(x_1, \dots, x_n) \leq 0$ ($j < n$). Функции h_i и g_j называют функциями связи или ограничения. Ограничения и число показателей качества должны быть выбраны либо откорректированы в процессе проектирования таким образом, чтобы данным значением вектора K обладал вполне определенный класс систем.

Оптимизация системы, производимая на основе вектора показателей качества, т. е. с учетом нескольких целевых функций, называется векторной (многокритериальной) оптимизацией. Скалярная оптимизация осуществляется по одному показателю качества. Сущность решения векторных оптимизационных задач состоит в све-

дении их к скалярным задачам различными методами. Можно, например, построить некоторую обобщенную целевую функцию $K = f(K_1, \dots, K_m)$ или использовать только один (определяющий) показатель качества, а все остальные перевести в разряд ограничений какого-либо типа. Исследованию задач векторного синтеза посвящена монография [1]. В дальнейшем под оптимизацией системы будет подразумеваться скалярная оптимизация ее параметров или (для краткости) синтез системы.

Основные методы оптимизации параметров

Задача оптимизации — найти вектор параметров системы $X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$, обеспечивающий экстремум целевой функции

$$f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \min(\max) \quad (10.1)$$

при условиях ограничений

$$g_j(x_1, \dots, x_n) \leq 0; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (J < n). \quad (10.2)$$

При известной целевой функции и функциях связи оптимизация параметров сводится к задаче отыскания глобального условного экстремума функции многих переменных. Если на переменные x_1, \dots, x_n не наложено никаких ограничений, то экстремум называется безусловным. На практике для упрощения отыскания условного экстремума иногда сначала находят безусловный экстремум или сводят задачу на условный экстремум к соответствующей задаче на безусловный.

Если целевая функция $f(x_1, \dots, x_n)$ или хотя бы одна из функций ограничения $g_j(x_1, \dots, x_n)$ нелинейны относительно переменных x_1, x_2, \dots, x_n , то задача отыскания экстремума целевой функции является задачей нелинейного программирования, которая имеет аналитическое решение в некоторых частных случаях. Получить решение этой задачи аналитическим путем в общем виде не удается, поэтому приходится прибегать к численным методам, требующим использования ЭВМ. Наиболее широкое применение для решения таких задач нашли методы, основанные на вычислении градиента целевой функции.

Подробное изложение подобных алгоритмов можно найти в специальной литературе [2, 3].

Необходимые и достаточные условия осуществления безусловного экстремума. Если функция $f(x_1, \dots, x_n)$ в точке (a_1, a_2, \dots, a_n) дифференцируема, то экстремум в этой точке имеет место лишь в случае равенства n первых частных производных нулю:

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} = 0; \dots; \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} = 0. \quad (10.3)$$

Условие (10.3) является необходимым для существования экстремума функции $f(x_1, \dots, x_n)$. Значения функции в точках, удовлетворяющих условию (10.3), называются стационарными значениями, а сами точки являются стационарными. Этому условию удовлетворяют также точки перегиба, или седловые точки. Кроме того, экстремум, найденный из необходимых условий, может быть локальным. Поэтому для нахождения глобального экстремума нужно вычислить все стационарные значения функции $f(x_1, \dots, x_n)$ и сравнить их между собой.

Для дважды непрерывно дифференцируемых функций в точке (a_1, a_2, \dots, a_n) можно воспользоваться достаточными условиями существования экстремума, имеющими вид цепочки неравенств:

а) если в точке (a_1, a_2, \dots, a_n) выполняются условия

$$d_{11} > 0; \quad \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{vmatrix} > 0;$$

$$\begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{vmatrix} > 0 \text{ и т. д.},$$

где $d_{ij} = \partial^2 f / \partial x_i \partial x_j$ ($i, j = 1 \dots n$), то в данной точке будет иметь место минимум функции $f(x_1, \dots, x_n)$;

б) если

$$d_{11} < 0; \quad \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{vmatrix} > 0;$$

$$\begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{vmatrix} < 0 \text{ и т. д.},$$

то имеет место максимум функции.

Метод неопределенных множителей Лагранжа. Используется для нахождения условного экстремума функции (10.1) в оптимизационных задачах с ограничениями (10.2) типа равенств:

$$g_j(x_1, \dots, x_n) = 0; \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (10.4)$$

Предполагается, что функции $f(x_1, \dots, x_n)$ и $g_j(x_1, \dots, x_n)$ обладают непрерывными частными производными. При этом задача нахождения условного экстремума функции $f(x_1, \dots, x_n)$ сводится к отысканию безусловного экстремума функции Лагранжа [1]:

$$F_{\text{Л}} = f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^J \lambda_j g_j(x_1, \dots, x_n),$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_J$ — неопределенные множители Лагранжа.

Записывая необходимые условия существования безусловного экстремума функции Лагранжа, получаем систему из n уравнений

$$\frac{\partial F_{\text{Л}}}{\partial x_1} = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \sum_{j=1}^J \lambda_j \frac{\partial g_j}{\partial x_1} = 0, \dots \dots \dots (10.5)$$

$$\frac{\partial F_{\text{Л}}}{\partial x_n} = \frac{\partial f}{\partial x_n} + \sum_{j=1}^J \lambda_j \frac{\partial g_j}{\partial x_n} = 0.$$

Система (10.5) образует с J уравнениями ограничений (10.4) систему из $J+n$ уравнений с $J+n$ неизвестными: J неизвестными множителями Лагранжа $\lambda_1, \dots, \lambda_J$ и переменными параметрами x_1, \dots, x_n . Решение этой системы позволяет определить стационарные значения функции Лагранжа, а следовательно, и функции $f(x_1, \dots, x_n)$. Дальнейшее решение оптимизационной задачи сводится к нахождению глобального минимума или максимума функции $f(x_1, \dots, x_n)$.

Метод неопределенных множителей Лагранжа позволяет решать вопросы, связанные с оптимальным проектированием ЭРЭ.

Метод линейного программирования. Применяется для решения оптимизационных задач в том случае, если целевая функция $f(x_1, \dots, x_n)$ и все функции ограничения $g_j(x_1, \dots,$

$\dots, x_n)$ линейно зависят от своих аргументов. Задача, таким образом, состоит в нахождении переменных x_1, x_2, \dots, x_n , составляющих минимум (максимум) целевой функции

$$f(x_1, \dots, x_n) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \Rightarrow \min (\max)$$

при линейных ограничениях типа равенств

$$a_{j1} x_1 + a_{j2} x_2 + \dots + a_{jn} x_n = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, J)$$

и n ограничениях-неравенствах $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$.

Для задачи линейного программирования характерно, что вследствие линейности всех ограничений экстремум целевой функции, если он существует, всегда является глобальным. Одним из наиболее универсальных методов линейного программирования является симплекс-метод или метод последовательного улучшения плана [3]. Однако его применяют лишь для тех задач, когда неизвестен какой-либо другой метод, позволяющий ускорить процесс получения решения. В общем случае алгоритм последовательного улучшения плана оказывается сравнительно громоздким. Указанный метод был использован при выборе оптимального по стоимости варианта крепления пластин ротора в воздушном конденсаторе переменной емкости [4].

Во многих задачах оптимизации при конструировании приходится учитывать наличие ряда возмущений, являющихся случайными величинами. При этом необходимо использовать методы оптимизации, основанные на моделировании тех случайных возмущений, которые оказывают существенное влияние на оптимизируемый показатель качества. Кроме того, при большом числе варьируемых параметров и случайных возмущений целесообразно использовать специальные алгоритмы статистических испытаний, проводимых на реальных изделиях или макетах, а также на различных моделях.

Метод статистических испытаний. В сложных оптимизационных задачах применяют метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Сущность этого метода состоит в непосредственном моделировании системы со всеми случайными возмущениями, которые оказывают влияние

на минимизируемый показатель качества [1].

После того как ММ изделия набрана на ЭВМ, на ней для каждой комбинации значений варьируемых параметров производят статистические испытания: определяют значения условного показателя качества для ряда реализаций случайных возмущений и основные статистические характеристики показателя качества. Эти данные позволяют в зависимости от объема проведенных испытаний найти глобальный минимум показателя качества.

Если число варьируемых параметров и случайных возмущений очень велико, то целесообразно использовать метод планирования эксперимента.

Метод планирования эксперимента.

Построение математической модели (ММ) изделия или блока, связывающей выходной параметр с влияющими на него факторами, можно осуществить при помощи метода ПЭ.

Пусть имеется N наблюдений над величиной y , зависящей от R независимых переменных x_1, x_2, \dots, x_R . Необходимо найти зависимость $y = f(x_1, x_2, \dots, x_R)$. При неизвестном виде этой зависимости (она называется функцией или поверхностью отклика y) ограничиваются представлением ее в виде уравнения регрессии

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (10.6)$$

где b_i — неизвестные коэффициенты регрессии; x_i — конструктивные факторы.

Метод ПЭ заключается в том, что с помощью специальных экспериментов получают представление о поверхности отклика и затем осуществляют движение одновременно по всем факторам в область оптимума. Если последняя удалена от исходной области эксперимента, то описание поверхности отклика с помощью линейных членов уравнения (10.6) оказывается достаточным, так как в этом случае важно знать лишь направление движения в область оптимума [5]. Следовательно, для линейной ММ коэффициенты регрессии

$$b_1 = \frac{\partial y}{\partial x_1}; \quad b_2 = \frac{\partial y}{\partial x_2}, \dots, \quad b_n = \frac{\partial y}{\partial x_n}$$

являются составляющими градиента и указывают кратчайшее направление в область оптимума.

Полный факторный эксперимент является одним из методов построения ММ. В этой ситуации для каждого исследуемого фактора, влияющего на критерий или выходной параметр изделия, выбирается некоторое число уровней варьирования K , а затем реализуются все возможные комбинации уровней. Число этих комбинаций характеризует тип ПЭ. Так, если $K=2$, то при числе факторов n тип ПЭ характеризуется матрицей порядка $N=2^n$.

Построение ММ состоит из следующих этапов.

1. Планирование эксперимента. Матрицу планирования можно представить в виде таблицы, которая должна удовлетворять условиям симметричности, нормирования и ортогональности. Прежде чем ставить эксперимент, следует перейти от натуральных значений основного уравнения к безразмерным (кодированным) значениям

$$x_i = (X_{i \text{ вн}} - X_{i0}) / I_i,$$

где $X_{i \text{ вн}}$ — натуральные значения верхнего $X_{\text{в}}$ или нижнего $X_{\text{н}}$ основных уравнений i -го фактора; X_{i0} — нулевой уровень i -го фактора ($X_{i0} = (X_{i \text{ в}} + X_{i \text{ н}}) / 2$); $I_i = (X_{i \text{ в}} - X_{i \text{ н}}) / 2$ — интервал варьирования i -го фактора.

Величина x_i в матрице планирования принимает значение +1 при $x_i = X_{i \text{ в}}$ и —1 при $x_i = X_{i \text{ н}}$.

2. Проведение эксперимента. Изменение отклика y носит случайный характер, поэтому в каждой точке факторного пространства приходится проводить m параллельных наблюдений и результаты усреднять.

3. Построение математической модели. В результате ПФЭ по формуле

$$\bar{b}_j = \sum_{i=1}^n \bar{y}_i x_j / N,$$

где \bar{y}_i — экспериментальное значение отклика (среднее из m наблюдений); $j=0, 1, 2, \dots$ — номер фактора (ноль записан для определения коэффициента b_0), вычисляются коэффициенты регрессии \bar{b} модели (10.6).

Проверку гипотезы в значимости полученных коэффициентов b_j осуществ-

ствляют по методике, изложенной в [5].

4. Проверка адекватности полученной модели экспериментальным данным производится с помощью критерия Фишера

$$F = S_{ад}^2 / S^2(y),$$

где $S_{ад}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^N (y_p - \bar{y})^2$; y_p — значения отклика, рассчитанные по модели; d — число членов модели.

Вычисленное значение F сравнивается с табличным значением F_{τ} , которое при заданном уровне значимости, числе степеней свободы числителя $N-d$ и знаменателя $N(m-1)$ определяется по методике, изложенной в [5].

Эвристические методы

Часто при оптимизации используются качественные факторы (технологичность обработки материала, коррозионная стойкость и т. д.), которым нельзя поставить в соответствие числовую шкалу. В этом случае решить проблему чисто математическими методами не удастся и используют так называемые эвристические методы.

Метод экспертных оценок. Предусматривает процедуру из четырех этапов: организация и проведение опроса экспертов (специалистов в данной области), обработка результатов опроса, получение оценок весомости, анализ результатов [6].

В результате опроса n экспертов появляется распределение с функцией плотности

$$f_0(t) = \sum_{i=1}^n a_i f_i(t),$$

где $f_i(t)$ — плотность распределения, построенного на основании информации, полученной от i -го эксперта; a_i — весовой показатель оценки i -го эксперта, причем $\sum_{i=1}^n a_i = 1$.

Тогда

$$M_3 = \sum_{i=1}^n a_i M_{3i};$$

$$D_3 = \sum_{i=1}^n a_i D_{3i} + \sum_{i=1}^n (M_{3i} - M_3)^2,$$

где M_3 — математическое ожидание рассматриваемой величины по коллективной оценке экспертов; D_3 — дисперсия рассматриваемой величины по коллективной оценке экспертов; M_{3i} — математическое ожидание рассматриваемой величины по индивидуальной оценке i -го эксперта; D_{3i} — дисперсия по индивидуальной оценке i -го эксперта.

Если нет основания отдавать предпочтение кому-либо из экспертов, то $a_i = 1/n$; в противном случае $a_i = 2/(n-i+1)/(n+1)$, где i — номер эксперта.

Функция желательности. Путь к единому параметру оптимизации в ряде случаев лежит через обобщение. В этом случае для определения обобщенного отклика используется функция желательности Харрингтона. В основе построения функции находится идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности, или предпочтительности. Эта шкала устанавливает соответствие между физическими и психологическими параметрами, причем к физическим параметрам относятся технологичность обработки материалов, конфигурация детали и т. д., к психологическим — субъективные оценки желательности того или иного значения отклика. Шкала желательности (табл. 10.1) имеет интервал от нуля до единицы. Значение 0 соответствует абсолютно неприемлемому уровню данного параметра, а значение 1 — самому высокому уровню [5].

Эвристические методы были использованы при выборе оптимальных материалов для контактных пар по критерию технико-экономической эффективности [7].

Метод штрафных функций — один

из методов решения задачи нелинейного программирования, который позволяет точно или приближенно свести ее к минимизации некоторой функции [3]. При этом задача с ограничениями преобразуется в последовательность задач без ограничений путем замены целевой функции $F(X)$ обобщенной функцией $\Phi(X)$, равной сумме функции $F(X)$ и функций ограничений $g_j(X)$, взятых с соответствующими весами a_j [4]:

$$\Phi(X) = F(X) + \sum_{j=1}^m a_j g_j(X), \quad (10.7)$$

где

$$a_j = \begin{cases} 0, & \text{если } g_j(X) < 0; \\ a_j, & \text{если } g_j(X) > 0. \end{cases}$$

При таком задании g_j в случае выполнения всех ограничений оптимизируется $F(X)$. Если нарушается хотя бы одно ограничение $g_j(X)$ и рабочая точка попадает за пределы некоторой области, с функцией $F(X)$ взимается «штраф», уменьшающий $F(X)$ на $\sum_{j=1}^p a_j g_j(X)$, где p — общее число нарушенных ограничений. При минимальном «штрафе» функция $\Phi(X)$ достигнет оптимального значения.

Значения a_j ($j = 1, 2, \dots, m$) должны выбираться достаточно большими, чтобы любое нарушение ограничений приводило к существенному изменению функции $\Phi(X)$. При этом точность выполнения всех ограничений будет выше, хотя для слишком больших значений a_j процесс поиска может оказаться расходящимся. Чтобы удовлетворить этим противоречивым требованиям, значения a_j изменяют в процессе поиска в соответствии с изменением значений частных производных $\frac{\partial F(X)}{\partial x_i}$ при условии $a_j \frac{\partial g_j(X)}{\partial x_i} > \frac{\partial F(X)}{\partial x_i}$. Значения $X^* = \{x^*_1, x^*_2, \dots, x^*_n\}$, при которых достигается минимальное значение целевой функции $F(X)$, определяются из необходимого условия существования экстремума функции $\Phi(X)$ — из системы n нелинейных уравнений (при $a_j \rightarrow 0$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_1} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_2} &= 0, \\ &\dots \\ \frac{\partial \Phi(X)}{\partial x_n} &= 0. \end{aligned} \quad (10.8)$$

Метод целочисленного программирования. В некоторых задачах все или часть переменных принимают только целочисленные значения. Вследствие этих дополнительных ограничений такие задачи являются нерегулярными и методы их оптимизации отличаются от методов, используемых в линейном и нелинейном программировании.

В общем виде задача формулируется так: найти план $X^* = \{x^*_1, x^*_2, \dots, x^*_n\}$, соответствующий минимуму (максимуму) целевой функции $F(X)$ n переменных при ограничениях:

$$g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m;$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$x_i — \text{целые числа, } i = 1, 2, \dots, p \ (p \leq n).$$

Если все переменные принимают целые числа ($p = n$), то задача полностью целочисленная, в противном случае ($p < n$) — частично целочисленная.

При нелинейности функции $F(X)$ и функций $g_i(X)$ в виде неравенств и равенств задача оптимизации решается поисковыми методами [3, 4].

10.2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ УЗЛОВ И БЛОКОВ РЭА

Оптимизация конструкций трансформаторов малой мощности при ограниченном падении напряжения. Ограничение падения напряжения ($\Delta U = 5 \dots 10\%$) в трансформаторах малой мощности (ТММ) при нагрузке обеспечивает определенную стабильность напряжения на вторичных обмотках в случае изменения нагрузки и условий работы трансформатора.

Выразим размеры сердечника ТММ в долях ширины среднего ядра a — базового размера:

$$m = h/a; \quad n = c/a; \quad l = b/a, \quad (10.9)$$

где h, c — соответственно высота

Таблица 10.1

Шкала желательности со стандартными отметками

Желательность	Отметки по шкале
Очень хорошо	1 ... 0.8
Хорошо	0.8 ... 0.63
Удовлетворительно	0.63 ... 0.37
Плохо	0.37 ... 0.2
Очень плохо	0.2 ... 0.0

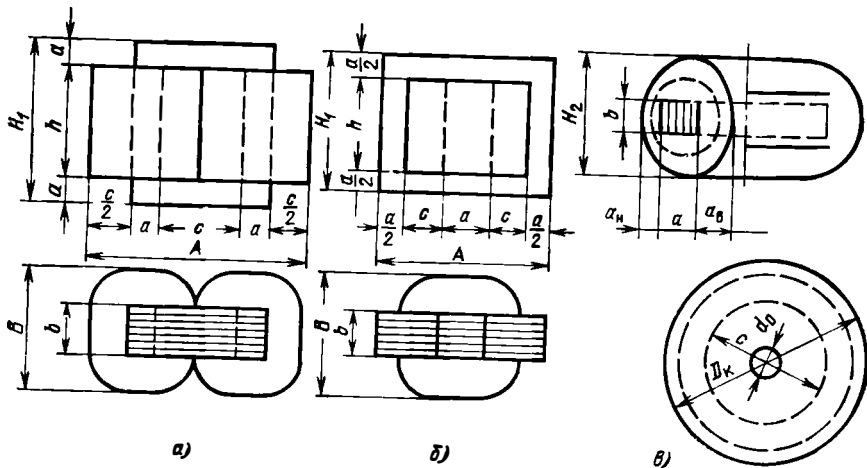


Рис. 10.1. Конструкции магнитопроводов трансформаторов: а — стержневого; б — броньевого; в — кольцевого (тороидального)

и ширина окна; b — ширина сердечника ТММ.

Используя безразмерные параметры (10.9), можно вычислить для броневых, стержневых и кольцевых (тороидальных) трансформаторов (рис. 10.1) сечение сердечника $S_{ст}$, площадь его окна $S_{ок}$, среднюю длину магнитной силовой линии $l_{ст}$, объем сердечника $V_{ст}$, среднюю длину витка $l_{ср.в.}$

Оптимальные геометрические соотношения сердечника ТММ с заданным падением напряжения ΔU можно получить, исследуя на максимум характеристики эффективности для [8]: трансформатора наименьшей массы $P/G^{5/3} = f_1(m, n, l)$; трансформатора наименьшей стоимости $P/C^{5/3} = f_2(m, n, l)$; трансформатора наименьшего объема $P/V^{5/3} = f_3(m, n, l)$, где P — мощность, отдаваемая ТММ в нагрузку; G — общая масса ТММ с сердечником любой конфигурации; C — стоимость ТММ.

Изменяя один из линейных размеров (рис. 10.2), можно получить максимум $P/G^{5/3}$ (наименьшая масса ТММ при заданных ΔU и P) при различных значениях m, n, l [8]. Однако не все из оптимальных соотношений одинаково приемлемы, т. к. могут иметь место острые максимумы и требуется выполнение размеров деталей с очень малыми допусками, что удорожает конструкцию ТММ [9].

Оптимальные геометрические соотношения зависят в основном от ко-

эффициентов заполнения окна сердечника медью, способа намотки, плотности материалов сердечника $\gamma_{ст}$ и обмоточного провода γ_0 (для ТММ наименьшего объема) или их удельной стоимости (для ТММ наименьшей стоимости).

Оптимизация конструкций трансформаторов малой мощности при

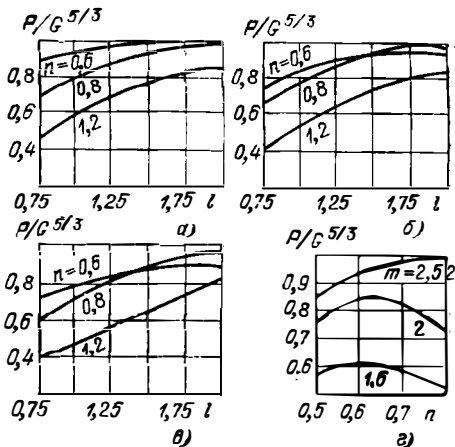


Рис. 10.2. Зависимости $P/G^{5/3} = \psi(l)$ и $P/G^{5/3} = \psi(n)$ для ТММ броневой конструкции с ограниченным падением напряжения: а — обмотка из фольги толщиной 0,1 мм ($m=2$); б — толщиной 0,05 мм ($m=2$); в — толщиной 0,02 мм ($m=2$); г — из круглого эмалированного провода ($l=0,8$)

ограниченной температуре перегрева. Приближенным критерием оптимизации ТММ, у которых размеры ограничены температурой перегрева $\Delta t = 50 \dots 70^\circ \text{C}$ и которые работают на частотах 50, 400, 1000 Гц, является удельная мощность. Этот параметр слабо зависит от базового размера a ТММ [9].

Обозначая в формулах для показателей удельной эффективности все величины, зависящие от геометрических размеров, через m, n, l , получим [8]:

$$P/C = f_4(m, n, l, B_{max});$$

$$P/G = f_5(m, n, l, B_{max}), \quad (10.10)$$

где B_{max} — максимальная магнитная индукция материала сердечника, Тл. Оптимальные значения m, n, l, B находим, исследуя выражения (10.10) на максимум. Результаты этого анализа приведены в табл. 10.2 и на рис. 10.3 [8].

Оптимизация конструкций ВЧ трансформаторов. С целью получения минимального объема ВЧ трансформаторов (до 400 кГц), импульсных преобразователей напряжения с ферритовыми сердечниками исследовалась зависимость выходной мощности трансформатора от геометрических размеров при заданных ограничениях по температуре перегрева (до 50°C), току намагничивания или КПД [10].

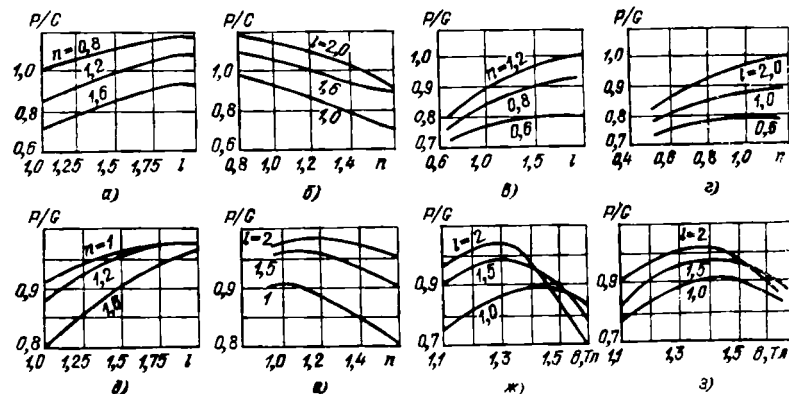


Рис. 10.3. Зависимости показателей удельной эффективности от m, n, l, B при температуре перегрева $55 \dots 70^\circ \text{C}$: а, б — для ТММ стержневой конструкции при мощности 100...200 В·А и $v=50$ Гц ($m=2$); в, г — для ТММ броневой конструкции с радиаторами при мощности 100...200 В·А и $v=400$ Гц ($m=2$); д, е — для ТММ и ДФ стержневой конструкции при мощности 100...200 В·А и $v=50$ Гц ($m=2$); ж, з — для ТММ при $v=400$ Гц для мощностей 200 В·А и 100 В·А (з)

Задача оптимизации решалась для трансформаторов, работающих в линейном режиме и имеющих рабочую индукцию, меньшую индукции насыщения. Результаты расчетов показывают, что с увеличением выходной мощности значение удельного объема снижается. При этом изменение выходной мощности от 10 до 500...1000 Вт приводит к увеличению удельной мощности в 1,2—1,5 раза, а оптимальная плотность тока снижается с 7 до 3 А/мм².

Рекомендации по выбору размеров трансформаторов с минимальным объемом даны в табл. 10.3. Из всех типов ВЧ трансформаторов наилучшими удельно-объемными показателями обладают трансформаторы на кольцевых сердечниках.

Оптимизация конструкций дросселей¹. Как и в случае с ТММ, оптимизация конструкций дросселей (Д) фильтра по массе, объему и стоимости осуществляется при ограничениях по ΔU и Δt . Рекомендуемые значения оптимальных параметров для ДФ приведены в табл. 10.2.

Оптимальные геометрические соотношения для линейных Д переменного тока можно определить, исследуя на минимум выражения для его массы и объема:

¹ Вопросы оптимизации конструкции дросселей насыщения в связи с их малой применимостью не рассматриваются.

Таблица 10.2

Рекомендации по конструированию оптимальных трансформаторов малой мощности (ТММ) и дросселей фильтров (ДФ), линейных дросселей переменного тока (ЛДПТ) и сглаживающих дросселей (СД)

Наименование изделия	Значения параметров				Конструкция сердечника	Ограничение
	<i>l</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>V_{max}</i> , Тл		
ТММ, ДФ, СД минимальной стоимости и массы (обмотка — медный провод, $\nu=50$ Гц)	0,7...1,5	0,5...0,6	2...3	—	Бронева (для всех), стержневая (для СД)	ΔU
ТММ минимальной стоимости ($P=100 \dots 500$ В·А, $\nu=50$ Гц)	1,5...2	0,8...1	1,5...2	1,5	Стержневая	Δt
ТММ, ДФ, СД минимальной массы ($\nu=50$ Гц)	1,5...2	0,8...1	1,5...2	—	Стержневая (для всех), бронева (для СД)	Δt
ТММ минимальной массы ($\nu=400$ Гц)	1...2	0,8...1,2	2...3	1,4	Бронева	Δt
ТММ минимальной массы ($P \leq 200$ В·А, $\nu=1000$ Гц)	0,6...1,5	1,2...1,7	2...3	1,2...1,3	Бронева	Δt
ЛДПТ: минимальной массы	2,7	0,5	1,0	—	Бронева	$\beta=0,2$
	2,7	0,5	1,0	—	—»—	$\beta=0,5$
	2,7	0,5	1,0	—	Стержневая (с одной катушкой)	$\beta=0,2$
минимального объема	2,6	0,5	1,2	—	То же	$\beta=0,5$
	2,6	0,5	1,0	—	Стержневая (с двумя катушками)	$\beta=0,2$
	2,0	0,5	1,2	—	То же	$\beta=0,5$
минимального объема	2,6	0,6	3,0	—	—»—	—
	2,7	0,5	1,5	—	Бронева	—
	2,7	0,5	3,0	—	Стержневая (с одной катушкой)	—

Таблица 10.3

Соотношения геометрических размеров для ВЧ трансформаторов минимального объема

Геометрический параметр	Кольцевой трансформатор		Ш-образный трансформатор	Стержневой П-образный трансформатор
	с полным заполнением окна	с неполным заполнением окна		
<i>l</i>	3,3	3,3	2,4	2,4
<i>n</i>	2,2	2,2	0,8	1,2
<i>m</i>	—	0,6	2	2,8

$$G = (n_T)^{-0,6} (\beta k_{вс} + k_{в0});$$

$$V = (n_T)^{-0,6} k_{вT},$$

где $n_T, k_{вс}, k_{в0}, k_{вT}$ — коэффициенты, зависящие от m, n, l [8]; β — коэффициент, зависящий от заполнения окна, $\beta = k_{ст} \gamma_{ст} / k_{ок} \gamma_{ок}$; $k_{ок}$ — коэффициент заполнения окна (табл. 10.4); $k_{ст}$ — коэффициент заполнения стальной (табл. 10.5).

Для выбора оптимальной по массе или объему конструкции ЛДПТ можно использовать рекомендации табл. 10.6 [8].

Оптимальные параметры m, n, l и базисный размер a для сглаживающего Д с броневым сердечником при ограничении на Δt определяются из выражения [9]:

$$\frac{L I_0^2}{G} = K' \frac{mnl (R_m + R_m^0 + \rightarrow \rightarrow + R_c^0 + R_r)}{[2 k_{ст} \gamma_{ст} l (1 + m + n) + \rightarrow \rightarrow + \gamma_0 mn (2 + 2l + \pi n)]^{5/3} \times \rightarrow}$$

$$\rightarrow \times \sqrt{mna(2 + 2l + \pi n)}$$

где L — максимальная индуктивность сглаживающего Д; I_0 — ток подмагничивания; G — масса; R_m — тепловое сопротивление катушки собственному потоку потерь; R_m^0, R_c^0 — тепловые сопротивления границы катушки — среда и сердечник — среда соответственно; R_r — тепловое сопротивление гильзы; K' — коэффициент.

Анализ этого выражения показал, что оптимальные параметры, обуславливающие получение сглаживающего Д минимальной массы при ограничениях на Δt , эквивалентны параметрам ТММ, работающим на частоте 50 Гц при ограничении на Δt . В обоих случаях сердечник броневаый.

Исследуя аналогичное выражение на максимумы при различных значениях m, n, l , получаем оптимальные параметры для СД с ограничением на ΔU . Сравнив эти параметры с оптимальными параметрами ТММ при ограничении на ΔU , можно сделать вывод, что параметры m, n, l совпадают [9].

Оптимизация несущих конструкций, в частности печатных плат (ПП), осуществляется по разным критериям показателя качества при различных ограничениях.

Рассмотрим наиболее простой случай определения габаритных размеров ПП, при которых получаются минимальные потери монтажного поля (ПМ) [11]. Задача формулируется следующим образом. задается некоторое множество ПП с размерами A_j, B_j (рис. 10.4) массой

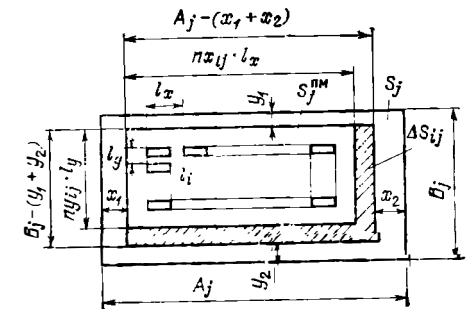


Рис. 10.4. Размещение ЭРЭ на плате

$g_j \in G; g_j: \{A_j, B_j, j=1, \dots, P\}$. Имеется множество ЭРЭ, которые устанавливаются на ПМ с шагами $l_x, l_y, l_i \in L; l_i: \{l_x, l_y, i=1, \dots, k\}$. На ПП отмечены краевые поля x_1, x_2, y_1, y_2 для направляющих, электрических соединений и т. д.

Требуется определить размеры ПП, при которых получаются минимальные потери площади ПМ, соблюдая ограничения $A_{j \min} \leq A_j \leq A_{j \max}; B_{j \min} \leq B_j \leq B_{j \max}$.

Конструкция сердечника		Рабочее напряжение, В	$k_{ок}$ при мощности, В·А, отдаваемой ТММ в нагрузку				
			5 ... 15	15 ... 50	50 ... 150	150 ... 300	300 ... 1000
Частота 50 Гц							
Броневая: пластинчатая ленточная	До 100	0,22 ... 0,29	0,29 ... 0,30	0,30 ... 0,32	0,32 ... 0,34	0,34 ... 0,38	—
	От 100 до 1000	0,19 ... 0,25	0,25 ... 0,26	0,26 ... 0,27	0,27 ... 0,30	0,30 ... 0,33	—
Стержневая (ленточная)	До 100	0,15 ... 0,27	0,27 ... 0,29	0,29 ... 0,32	0,32 ... 0,34	0,34 ... 0,38	—
	От 100 до 1000	0,13 ... 0,23	0,23 ... 0,26	0,26 ... 0,27	0,27 ... 0,30	0,30 ... 0,33	—
Частота 400 Гц							
Броневая: пластинчатая ленточная	До 100	0,22 ... 0,27	0,27 ... 0,29	0,29 ... 0,30	0,30 ... 0,30	0,30 ... 0,34	0,34 ... 0,38
	От 100 до 1000	0,19 ... 0,23	0,23 ... 0,25	0,25 ... 0,26	0,26 ... 0,26	0,26 ... 0,30	0,30 ... 0,33
Стержневая (ленточная)	До 100	0,17 ... 0,20	0,20 ... 0,22	0,22 ... 0,29	0,29 ... 0,30	0,30 ... 0,34	0,34 ... 0,38
	От 100 до 1000	0,13 ... 0,17	0,17 ... 0,19	0,19 ... 0,25	0,25 ... 0,26	0,26 ... 0,30	0,30 ... 0,33

Таблица 10.5
Значения коэффициента заполнения стальной $k_{ст}$ при ее толщинах от 0,08 до 0,35 мм

Конструкция сердечника	0,08	0,1	0,15	0,2	0,35
Пластинчатая	—	0,7 (0,75)	—	0,85 (0,89)	0,9 (0,94)
Ленточная	0,87	—	0,9	0,91	0,93

Примечание. Коэффициент $k_{ст}$ для пластинчатых сердечников указан в случае изоляции пластин лаком или фосфатной пленкой (в скобках).

Таблица 10.6

Оптимальные геометрические соотношения в линейных дросселях переменного тока

Минимизируемый параметр	β	Броневой сердечник			Стержневой сердечник					
					с одной катушкой			с двумя катушками		
		l	n	m	l	n	n_1	l	n	m
G	0,2	2,7	0,5	1,0	2,7	0,5	1,0	2,6	0,5	1,0
	0,5	2,7	0,5	1,0	2,6	0,5	1,2	2,0	0,5	1,2
V	—	2,7	0,5	1,5	2,7	0,5	3,0	2,6	0,6	3,0

За целевую функцию F_j примем среднее значение квадрата разности потерь площади j -го ПМ при размещении на нем i -х ЭРЭ. Чтобы определить оптимальные значения ПП, найдем минимум функции

$$F_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(K_{ij}^s - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K K_{ij} \right)^2 \rightarrow \min$$

при ограничениях на параметры $A_j, B_j, x_1, x_2, y_1, y_2, l_x, l_y$; $K_{ij}^s = \Delta S_{ij} / S_j$ ПМ — относительная потери площади j -го ПМ при размещении на нем i -х ЭРЭ;

$$\Delta S_{ij} = [A_j - (x_1 + x_2)] \times [B_j - (y_1 + y_2)] - \left[E \left| \frac{A_j - (x_1 + x_2)}{l_x} \right| l_x \right] \times \left[E \left| \frac{B_j - (y_1 + y_2)}{l_y} \right| l_y \right];$$

$$S_j^{ПМ} = [A_j - (x_1 + x_2)] [B_j - (y_1 + y_2)];$$

E — оператор выбора целочисленного значения: $E \left| \frac{A_j - (x_1 + x_2)}{l_x} \right| = n_{xij}$ —

количество i -х ЭРЭ в одном ряду на j -м ПМ; $E \left| \frac{B_j - (y_1 + y_2)}{l_y} \right| = n_{yij}$ — количество рядов i -х ЭРЭ на j -м ПМ. Общее количество i -х ЭРЭ на j -м ПМ $N_{ij} = n_{xij} n_{yij}$.

Программная реализация алгоритма и решение задачи оптимизации позволили получить оптимальные габариты ПП для базовой несущей конструкции аппаратуры средств связи.

Оптимизация габаритных размеров ПП по критерию минимальной массы при обеспечении надежности в условиях механических воздействий. В ряде случаев необходимо оптимизировать габаритные размеры ПП по критерию минимальной массы G при условиях: частота собственных колебаний ν ПП не должна быть меньше некоторой заданной частоты ν_0 , определяемой эксплуатационными условиями РЭА (условия отсутствия резонанса); толщина ПП h не должна быть меньше минимальной толщины h_0 , определяемой допустимой жесткостью ПП и ограничениями на сортмент материала [12].

Функция цели имеет вид

$$F = \rho A \cdot Vh, \quad (10.11)$$

где ρ — плотность материала ПП; A, V, h — соответственно длина, ширина и толщина ПП.

Требуется определить значения A^*, V^*, h^* , при которых достигается минимум функции (10.11) при ограничениях

$$g_1(A, V, h) = v - v_0 \geq 0; \quad (10.12)$$

$$g_2(A, V, h) = A \cdot V - S_0 \geq 0; \quad (10.13)$$

$$g_3(A, V, h) = h - h_0 \geq 0, \quad (10.14)$$

где S_0 — монтажное поле печатной платы.

Для решения задачи используем метод штрафных функций, выбирая в качестве функции ограничений логарифмическую функцию $\ln g_0$. Подставив выражения (10.11)–(10.14) в (10.7), после преобразований получим

$$\Phi(X) = \rho A \cdot Vh - a_j [\ln(v - v_0) + \ln(A \cdot V - S_0) + \ln(h - h_0)]. \quad (10.15)$$

Основная резонансная частота ПП, шарнирно закрепленной по четырем краям, определяется по формуле

$$v = \left(\frac{1}{A^2} - \frac{1}{B^2} \right) hK, \quad (10.16)$$

где $K = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\mu^2)\rho}}$ — коэффициент, определяемый упругими свойствами и плотностью материала ПП.

Дифференцируя выражение (10.15) по A, V , получим систему уравнений, решая которую с учетом (10.16), найдем значения A^*, V^*, h^* .

Пример. Определить оптимальные габаритные размеры ПП по критерию минимальной массы G при условии $v_{max} = 300$ Гц, $v_0 = 350$ Гц. Толщина фольгированного стеклотекстолита марки СФ-2-50 выбирается по ГОСТ 10316–78, $S_0 = 0,01$ м².

Вычисления произвелись на ЭВМ. Полученные результаты приведены в табл. 10.7 [12].

Оптимизация габаритных размеров ПП по критерию быстродействия. Выбор оптимальных габаритных размеров ПП для ЭВМ осуществляется по критерию минимальной длины линии связи при заданном объеме мо-

Таблица 10.7

Эвристические и оптимальные значения параметров печатной платы

Параметр	Эвристические значения	Оптимальные значения
$V, \text{ мм}$	140	113
$A, \text{ мм}$	110	97
$h, \text{ мм}$	1,5	1,0
$G, \text{ г}$	41	20
$v_0, \text{ Гц}$	376	348

дуля [13]. Это значит, что ЭРЭ, в частности микросхемы на ПП (ТЭЗ) и ПП (ТЭЗ) на панели, следует размещать с максимальной плотностью, учитывая технологические возможности производства, габаритные размеры электрических соединителей, условия теплообмена, эксплуатации, ремонтпригодности и другие факторы.

Минимальная длина линии связи в панели l (рис. 10.5) между ПП 2 и 3 будет

$$l_{сн} = 2A' + 2l_c = 2A' + 2kl, \quad (10.17)$$

где k — коэффициент, учитывающий ограничения на длину линии связи на ПП при трассировке; при $k=0,5$ оптимальная форма панели — куб ($A'=l$), при $k=1; 1,5; 2, \dots$ — параллелепипед; l — длина ПП (ТЭЗ); l_c — длина линии связи в пределах ПП.

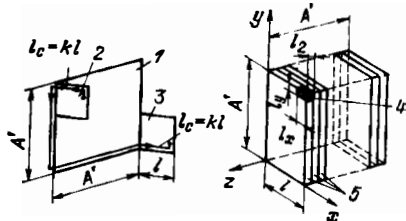


Рис. 10.5. Компонировка панели: 1 — панель; 2, 3, 5 — ПП; 4 — ЭРЭ

Общий объем панели

$$V_{\Pi} = VN = l(A')^2, \quad (10.18)$$

где $V = l_x l_y l_z$ — объем, занимаемый одним ЭРЭ (например, микросхемой) 4 на панели l ; l_x, l_y — минимально допустимый шаг установки ЭРЭ на

ПП соответственно по осям x, y ; l_z — минимально допустимый шаг установки ПП на панели из условия теплообмена; N — число ЭРЭ (микросхем) на панели.

Решая (10.18) относительно l и подставляя это значение в (10.17), исследуем полученное выражение на экстремум. Опуская промежуточные преобразования, имеем оптимальное соотношение между l и A' , при котором обеспечивается минимальное $l_{сн}$: $A' = 2kl = 2l_c$. (10.19)

Условие (10.19) определяет также оптимальную компоновку ПП на панели по критерию быстродействия.

Подставив (10.19) в (10.18), окончательно получим: $l = \sqrt[3]{l_x l_y l_z N / 4k^2}$. Ширину ПП выбирают кратной длине панели A' , при этом она должна соответствовать длине электрического соединителя с учетом его крепления.

Методика выбора оптимального числа панелей в раме и рам в стойке по критерию быстродействия по многим аналогична рассмотренной выше оптимизации габаритных размеров ПП.

Оптимизация конструкции радиаторов для теплонагруженных полупроводниковых приборов. Рассмотрим эту задачу на примере. Определить оптимальные параметры одно-сторонне ребренного пластинчатого радиатора (рис. 10.6) при условии

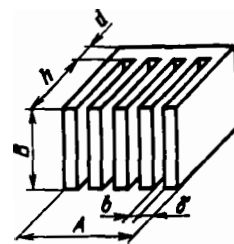


Рис. 10.6. Радиатор

минимальной массы. На радиаторе устанавливается транзистор типа ГТ910, мощность рассеяния которого $P_c \leq 16$ Вт. Материал радиатора — алюминиевый сплав АЛ-2, покрытие радиатора обеспечивает степень черноты его поверхности $\epsilon = 0,9$. Температура в зоне установки транзистора $t_p \leq 90^\circ\text{C}$. Масса радиатора

определяется из выражения (см. рис. 10.6):

$$G = \rho V \frac{A d (b + \delta) + (l + b) \delta h}{b + \delta},$$

где ρ — плотность материала. При этом имеются следующие ограничения:

мощность рассеяния радиатора $P \geq P_0$;

расстояние между ребрами радиатора $b \geq a = 8$ мм, где a — ширина пограничного слоя;

$d \geq d_0 = 2,5$ мм, где d_0 — размер, обеспечивающий прочность конструкции;

$\delta \geq \delta_0 = 1,5$ мм, где δ_0 — размер, обеспечивающий жесткость ребра; $b \geq 2R_{min}$, где R_{min} — линейный радиус ребра радиатора, равный $(\delta + d)/2$;

значение коэффициента неравномерности распределения температуры вдоль ребра радиатора $K_T(B) \geq K_{T0} = 0,7$, где K_{T0} — минимальное значение.

Таким образом определяется минимум целевой функции F_c при ограничениях в алгебраической форме [14]:

$$K_T(B) P(B, A, b, h, \delta, d) - P_0 \geq 0,$$

$$b - a \geq 0; \quad d - d_0 \geq 0; \quad \delta - \delta_0 \geq 0;$$

$$-\delta - d \geq 0;$$

$$K_T(B) - K_{T0} \geq 0;$$

$$V, l, b, h, \delta, d \geq 0;$$

$(b+l)/(b+\delta) = 1, 2, \dots$ — число ребер радиатора.

Задача целочисленного программирования решалась методом скользящего допуска [2, 3] на ЭВМ в два этапа. Полученные результаты приведены в табл. 10.8.

Некоторые оптимизационные задачи при конструировании аппаратурных контейнеров ЭРЭ. В ряде случаев при проектировании аппаратурных контейнеров ЭРЭ встречаются следующие оптимизационные задачи: компоновки радиоэлектронных блоков и устройств в контейнере; оптимизации прочностных и габаритно-массовых параметров перекрытий контейнеров [15].

Первая задача заключается в размещении набора определенного числа радиоэлектронных блоков, функциональных узлов, несущих конструкций и других в контейнере заданного

Эвристические и оптимальные значения параметров ребристого радиатора (рис. 10.6)

Параметр	Эвристические значения	Оптимальные значения
G , г	143	146
b , мм	80	78
b , мм	8	16
h , мм	32	32
δ , мм	1,5	1,5
d , мм	2,5	2,5
A , мм	77	80
K_T (В)	0,954	0,061
P , Вт, с учетом	16,4	16,2
K_T (В)		

размера с наибольшим коэффициентом заполнения его объема при условии обеспечения определенных ограничений. К их числу относятся условия взаимного расположения изделий в контейнере с точки зрения минимальной линии связи, отсутствия явления помех, электромагнитных, тепловых и других полей и т. д. Эта задача геометрического проектирования решается методом математического программирования и представляется в виде ограничений на функцию цели [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств. — М.: Сов. радио, 1975.
2. Полак Э. Численные методы оптимизации: Единый подход. — М.: Мир, 1974.
3. Ляшенко И. Н., Карагодова Е. А., Черникова Н. В., Шор Н. З. Линейное и нелинейное программирование/Под ред. И. Н. Ляшенко. — Киев: Вища школа, 1975.
4. Фефер А. И. Анализ конструкций радиоэлементов по критерию минимальной стоимости. — Средства связи/Экос — М., 1981, вып. 3—4.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976.

6. Колоднер Г. И. Применение математических методов и ЭВМ в стандартизации. — М.: 1974, вып. 1 (Обзоры по электронной технике/ЦНИИ «Электроника»).

7. Фефер А. И. Выбор материалов для скользящих контактов. — Техника средств связи, 1978, вып. 5.

8. Белопольский И. И., Каретникова Е. И., Пикалова Л. Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. — М.: Энергия, 1973.

9. Каретникова Е. И., Рычина Т. А., Ермаков А. И. Трансформаторы питания и дроссели фильтров для радиоэлектронной промышленности. — М.: Сов. радио, 1973.

10. Бериков А. Б., Колосов В. А., Шагирова Э. З. Оптимизация объемных показателей высокочастотных трансформаторов импульсных преобразователей напряжения. — Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты, 1982, вып. 4.

11. Куранов Б. В., Лутченков Л. С. Оптимальное проектирование несущих конструкций аппаратуры средств связи. — Техника средств связи. Сер. Техника проводной связи, 1982, вып. 9.

12. Гришунин Ю. С. Об одном методе оптимизации плоских элементов конструкции радиоэлектронной аппаратуры. — Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи, 1977, вып. 2.

13. Основы построения технических средств ЕС ЭВМ на интегральных микросхемах./В. В. Саморуков, В. М. Микитин, В. А. Павлычев и др.; Под ред. Б. Н. Файзулаева. — М.: Радио и связь, 1981.

14. Гришунин Ю. С. Проектирование оптимальных по массе радиаторов для полупроводниковых приборов. — Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи, 1982, вып. 2.

15. Пинчук Г. И., Плево И. П., Тучкевич В. С. К вопросу оптимизации прочностных и весовых параметров перекрытий аппаратных контейнеров. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетехн., 1980, вып. 12.

16. Стоян Ю. Г. Размещение геометрических объектов. — Киев, Наукова думка, 1975.

11. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Основные аббревиатуры

- БО — безотказность
 ДВ — долговечность
 И — изделие
 ИД — исходные данные
 ИС — интегральная схема
 ИО — интенсивность отказов
 КД — конструкторская документация
 НД — надежность, надежный
 ОТ — отказ
 ПОН — план обеспечения надежности
 ПТ — техническое предложение
 РП — ремонтпригодность
 СХ — сохраняемость
 ТЗ — техническое задание
 ТП — технический проект
 ХП — характеристический показатель
 ЭД — эксплуатационная документация
 ЭЛ — элемент (общее обозначение, имеющее в частности смысл «комплектующий прибор», «комплектующее изделие»)
 ЭП — эскизный проект

11.1. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Термины и определения основных понятий в области НД установлены ГОСТ 27002—83. Для оценки НД необходимо знать: а) режимы и условия использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования И; б) функции И в каждом режиме использования, хранения, транспортирования и др.; в) пределы фактических значений эксплуатационных показателей при выполнении каждой из функций. Все эти данные должны быть заданы в ТЗ или определены руководителем разработки. В соответствии с формулировкой ГОСТ 27002—83 исправное И можно поставлять заказчику, работоспособное — оставлять в эксплуатации и прекращать эксплуатацию, если показатели И находятся на пределе допустимых значений.

Количественная характеристика одного или нескольких свойств И, составляющих НД, и является показателем его надежности, которая

определяется безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, а также вероятностью безотказной работы, средней наработкой до отказа, интенсивностью отказов, параметром потока отказов, средним ресурсом, средним сроком службы, средним временем восстановления, средним сроком СХ и др. Справочное приложение к ГОСТ 27002—83 предлагает определять показатели НД статистически. Например, вероятность безотказной работы предлагается определять отношением числа объектов, безотказно проработавших до момента времени t , к числу объектов, работоспособных в начальный момент времени $t=0$. При этом не оценивается рассеивание параметров каждого из объектов (или событий) в рассматриваемых совокупностях. Пользователя РЭА обычно интересует не столько средняя наработка до ОТ или средняя ИО, а то, как часто будут происходить ОТ именно той РЭА, с которой он работает. Поэтому разработчику и заказчику важны не только средние значения и значения средних вероятностей, рассчитанные по статистическим данным, но и то, с какой достоверностью определены эти характеристики, каково их рассеивание и какие будут показатели НД каждого конкретного И.

Для оценки показателей НД, предлагаемых в ГОСТ 27002—83, с относительно высокой достоверностью (особенно в тех случаях, когда требования к НД высоки) нужно иметь большой набор статистических данных. Для этого следует либо испытать большое количество И, либо испытывать не очень большое количество И, но в течение весьма длительного времени, что для разработчиков, как правило, неудобно.

Точные характеристики рассеивания, например времени работы ЭЛ или РЭА до ОТ, при разработке обычно неизвестны. Часто принимают «приблизленно подходящее» распределение, описываемое относительно простым (экспоненциальным или гауссовским) законом.

При экспериментальном распределении для подтверждения с задан-

ной достоверностью α нижнего предела вероятности безотказной работы p нужно провести в заданном режиме испытания N изделий, имея при этом не более K отказов: $N = A / (1 - p)$, где A берется из табл. 11.1.

Таблица 11.1

Коэффициент A при заданной достоверности α и разном числе отказов K

Число отказов K	Значения A при достоверности α			
	0,75	0,8	0,9	0,99
0	1,4	1,7	2,3	3,0
1	2,7	3,1	3,9	4,7
2	3,9	4,4	5,3	6,3
3	5,1	5,6	6,7	7,7
4	6,3	6,8	8,0	9,1
5	7,4	8,0	9,2	10,5
7	9,7	10,3	11,7	13,1
10	13,0	13,8	15,4	16,9
14	17,4	18,3	20,1	21,8

Если $\alpha=0,9$, $K=0$ и $p=0,95$, то при заданном времени работы I (например, 3 года) нужно испытать 46 образцов, причем они не должны иметь ни одного ОТ. Если за это время все же было 3 ОТ, то для подтверждения заданной НД необходимо испытать уже 134 образца. Еще большие значения числа I (несколько тысяч) и времени испытаний (десятьки лет) получаются для ИС, к надежности которых предъявляют высокие требования.

Такой большой объем испытаний затрудняет оценку показателей НД в процессе разработки РЭА и ее ЭЛ. Их можно определить в процессе эксплуатации, наблюдая за работой большого числа I . Например, наблюдая за работой 4 миллионов ИС, установленных во многих ЭВМ, в течение 5000 ч и имея при этом не более 14 отказов, мы получим с достоверностью 0,9 ИО порядка 10^{-9} 1/ч. Однако такие суждения о НД разработки бывают нередко запоздалыми и поэтому в процессе разработки приходится применять другие оценки и подход при расчете НД на основе экспериментальных исследований.

В РЭА НД в основном обеспечивается разработчиком. Она зависит от выбранной структурной, электрической, кинематической и других схем, от программ работы И, от того, из каких ЭЛ она построена и каковы режимы их использования, от качества конструкции, уровня технологии производства, методов и средств контроля качества при производстве, от условий эксплуатации, качества КД и ЭД. Общая НД РЭА может быть снижена из-за пониженной НД ЭЛ. Разработчик РЭА сам выбирает ЭЛ, согласовывает требования к ним и методы контроля их НД. Он устанавливает, какой должна быть НД ЭЛ и может выбрать ЭЛ и режимы их использования в РЭА, чтобы обеспечить высокую НД. НД РЭА может быть низкой из-за плохого качества ее изготовления, но именно разработчик готовит КД и определяет методы контроля качества, он определяет принципы технологии изготовления, методы и средства контроля качества. НД также может быть понижена, если эксплуатация ведется неверно. Однако ЭД составляет сам разработчик, он же ведет авторский надзор за эксплуатацией. Поэтому ответственность за НД несет прежде всего разработчик, в его возможностях так разработать И, так организовать производство, контроль качества и эксплуатацию, чтобы НД была высокой.

На разных стадиях разработки выполняют комплекс работ по обеспечению НД. Содержание этих работ, сроки, исполнители, форма отчетности фиксируются в ПОН. Нередко составляют ПОН на различные стадии разработки отдельно, корректируют и дополняют их. Руководитель разработки утверждает ПОН, утверждает или согласовывает отчетные документы по отдельным разделам и контролирует выполнение ПОН.

В ТЗ на разработку нередко указаны показатели НД, рекомендованные ГОСТ 27002—83, однако экспериментальное подтверждение этих показателей, как было показано ранее, при разработке затруднено. Возникает вопрос о распределении требований НД по составным частям РЭА, разрабатываемым в одной или нескольких организациях. Если система из десяти I должна иметь $p=0,98$ в течение года, то ее

ненадежность $1-p=0,02$ можно распределить между соисполнителями с учетом сложности их I так, чтобы общая НД соответствовала ТЗ (например, ЭВМ 0,004, а $p=0,996$; первичный источник питания 0,002, а $p=0,998$; устройства связи и контроля 0,003, а $p=0,997$ и т. д.). Такое «волевое» решение позволяет приблизительно учесть разницу в сложности и НД частей системы, но оно не может быть основой для требований об экспериментальном подтверждении НД на стадии разработки.

Поэтому задача разработчика — проанализировать ранее полученные результаты испытаний и эксплуатации аналогичных I и при выполнении других заданных технических характеристик (чувствительности, точности, избирательности, массы, габаритных размеров и др.), обеспечить максимальную НД резервированного варианта РЭА, анализировать и устранять все возможные причины снижения НД, применять ЭЛ, имеющие максимальную НД, и в оптимальных режимах, использовать оптимальные схемно-конструктивные варианты узлов и приборов, тщательно исследовать и устранять все недоработки, обнаруживаемые при экспериментальных исследованиях узлов и приборов в процессе разработки. Такие же требования должны быть предъявлены к разработчикам отдельных узлов и блоков РЭА, например процессоров, ОЗУ, ПЗУ и др.

Наряду с этим при подготовке принципиальной схемы разрабатываемого I и его частей, когда ясно, на каких ЭЛ будут они построены, должен быть проведен приближенный расчет НД [1—3] и показано, что принятые решения о принципиальной схеме, составе ЭЛ, режимах, в которых предполагается использовать ЭД, не противоречат заданным требованиям к показателям НД. В таких расчетах принимается, что нет конструкторских и производственных дефектов и ошибок эксплуатации. Расчет ведется на «идеальные» условия с учетом известной принципиальной схемы и известных либо предполагаемых ИО ЭЛ. Если в этих условиях требования к показателям НД не могут быть выполнены, то должна быть заменена принципиальная схема, либо изменены

требования к НД ЭЛ, либо введено резервирование. Решение о введении резервирования является крайней мерой и принимается руководителем разработок.

Расчеты НД современной РЭА, как правило, ведутся с использованием ЭВМ по сложным программам, позволяющим оценивать состояние и изменение параметров РЭА во времени по разным задаваемым законам. При этом полагают независимую или взаимно зависимую НД ЭЛ, монотонные или скачкообразные процессы изменения НД ЭЛ и систем, учитывающие самовосстановление или замены отдельных блоков, изменение структур, работу с помехоустойчивыми кодами и пр. Методы и программы таких расчетов изложены, например, в [1—3, 5, 6].

Если расчеты и эксперименты подтвердили соответствие принципиальной схемы РЭА требованиям, заданным в ТЗ, имеется уверенность в стабильной и устойчивой работе РЭА в заданных условиях и в правильности выбранных ЭЛ, расчеты показали не только отсутствие противоречий между требованиями к показателям НД и возможностями схемы в идеальных условиях, но и наличие запасов «расчетных» значений НД по сравнению с заданными значениями (хотя бы 50% заданного значения надежности), то можно составлять ТЗ на конструкторское проектирование, в котором особо формулируются требования к безотказности, стабильности характеристик, точности и др. при конкретных значениях климатических дестабилизирующих факторов, воздействиях объекта-носителя, паразитных электрических наводках, степени герметизации, а также к защите от динамических и тепловых воздействий.

Пользуясь рекомендациями [4], разработчик-конструктор учитывает влияние окружающей среды на РЭА, особенности объектов-носителей для размещения РЭА, создает оптимальные условия для работы человека-оператора, использует наилучшим образом особенности типовых (унифицированных) конструкций, выбирает компоновку и средства для устранения паразитных взаимодействий ЭЛ и различных блоков РЭА, подбирает требуемые средства герметизации, предусматривает защиту от

динамических и вредных тепловых воздействий. Он также разрабатывает конструкцию с учетом возможного изменения характеристик конструкций из-за рассеивания параметров материалов, наличия конструкторских и производственных допусков и пр. Требование о безусловном обеспечении НД при эксплуатации И в заданных режимах относится и к разработчику конструкции, и к разработчику схемы. Конструктор на этапе разработки обязан подтвердить работоспособность конструкции при всех заданных в ТЗ условиях и наличие необходимых запасов.

11.2. ПЛАН ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ

ПОН должны предусматривать: а) научно-исследовательские работы, проводимые в обеспечении НД разрабатываемой РЭА; б) уточнение условий работы и функций, выполняемых разрабатываемой РЭА в разных режимах эксплуатации; в) работы по оценке НД вариантов решения ТЗ на разработку; г) схемотехнические и конструкторские разработки по обеспечению БО выполнения функций выбранным вариантом при разных режимах эксплуатации; д) контроль и разработку отчетных материалов по НД (рис. 11.1). В ТЗ на разработку устанавливаются требования к НД и способы ее подтверждения. На стадии подготовки ПТ сопоставляется НД рассматриваемых вариантов. Задаваемые показатели НД зависят от сложности, степени новизны И, ЭЛ, схем, технологических процессов. Лишь в редких случаях вновь разрабатываемое И состоит из готовых блоков, по которым имеются данные для оценки показателей НД, рекомендованных в ГОСТ 27002—83. Чаще в разрабатываемую РЭА включаются новые блоки с новыми ЭЛ, работающими в новых режимах.

В этом случае для контроля хода работ по обеспечению НД, в том числе и на самых ранних стадиях разработки, целесообразно использовать так называемые характеристические показатели [5, 6]. Они позволяют оценивать полноту и эффективность выполняемых работ ПОН

по каждой определяющей функции. Такие показатели НД оцениваются по результатам исследований конкретных технических характеристик ЭЛ и РЭА. Они должны показывать, что разработчики схемы и конструкции, технологи, производственники сделали все необходимое для того, чтобы обеспечить полное выполнение РЭА заданных ей функций в заданных условиях и с заданной НД.

Поставить в точное соответствие ХП и предложенные ГОСТ 27002—83 показатели НД обычно трудно. Если выполняется свойство устойчивости частот отказов, то можно говорить о вероятностных оценках. В процессе разработки, когда каждый отказ исследуется и принимаются меры для устранения его причин, чаще всего устойчивости частот отказов не наблюдается. ХП следует назначать так, чтобы они оценивали не только БО, но и СХ, ДВ и РП РЭА, если они заданы ТЗ. Желательно, чтобы эти характеристики были количественными, хотя в силу неустойчивости частот отказов они могут и не быть вероятностными. Желательно, чтобы для каждой из функций РЭА были определены эксплуатационные характеристики и выходные параметры, которые она должна иметь. Перечень функций, характеристик и параметров не зависит в принципе от того, какой будет схема или конструкция РЭА, во всяком случае для подавляющей части функций и характеристик. Поэтому такие перечни можно составлять на самых ранних стадиях разработки РЭА и широко использовать при оценках НД.

После составления перечня функций состава ХП НД. Примерная схема состава этих показателей для РЭА приведена на рис. 11.2. На этом рисунке показаны группы ХП, которые могут быть заданы для различных стадий разработки КД. Их оценка требует разных уровней детализации разработки документации и знаний параметров РЭА.

ХП оценки правильности выбора принципа действия аппаратуры и принципов построения основных блоков (узлов) и установления возможности обеспечения при реальных условиях эксплуатации требуемых основных характеристик (например, точности, чувствительности, спек-

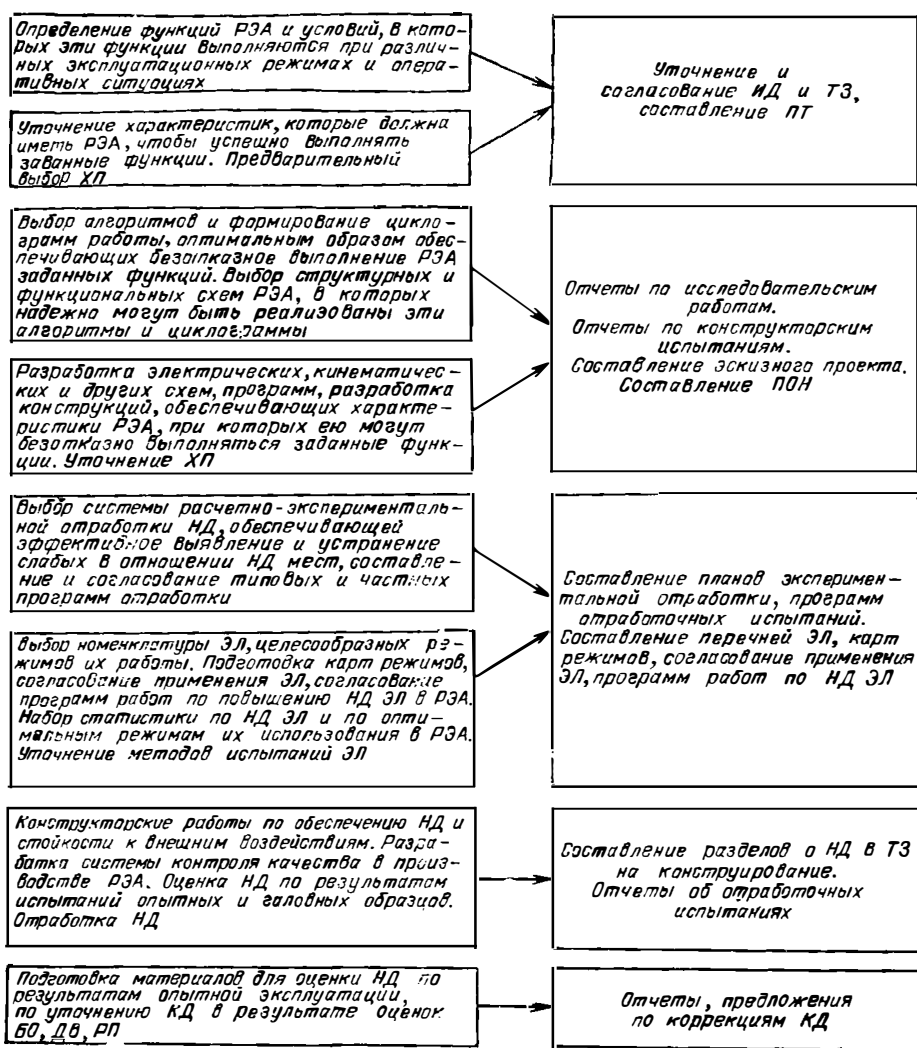


Рис. 11.1. Структурная схема плана обеспечения надежности

ральных характеристик, стабильности), позволяют оценить правильность основ, закладываемых при разработке РЭА. В зависимости от назначения и функций РЭА эти показатели будут иметь различное конкретное содержание для ЭВМ или РЛС: для электронной части акселерометра или для радиовысотометра. Но зная назначение и функции аппаратуры, не представит труда сформулировать ХП, позволяющие оценить (при

желании и в численном виде) правильность выбора принципа действия, принципов построения отдельных блоков, возможность обеспечения основных характеристик в заданных условиях. ХП могут быть сформулированы так, что их можно будет использовать не только на начальных, но и на последующих стадиях для оценки совершенствования разработки

ХП, оценивающие правильность

Характеристические показатели надежности

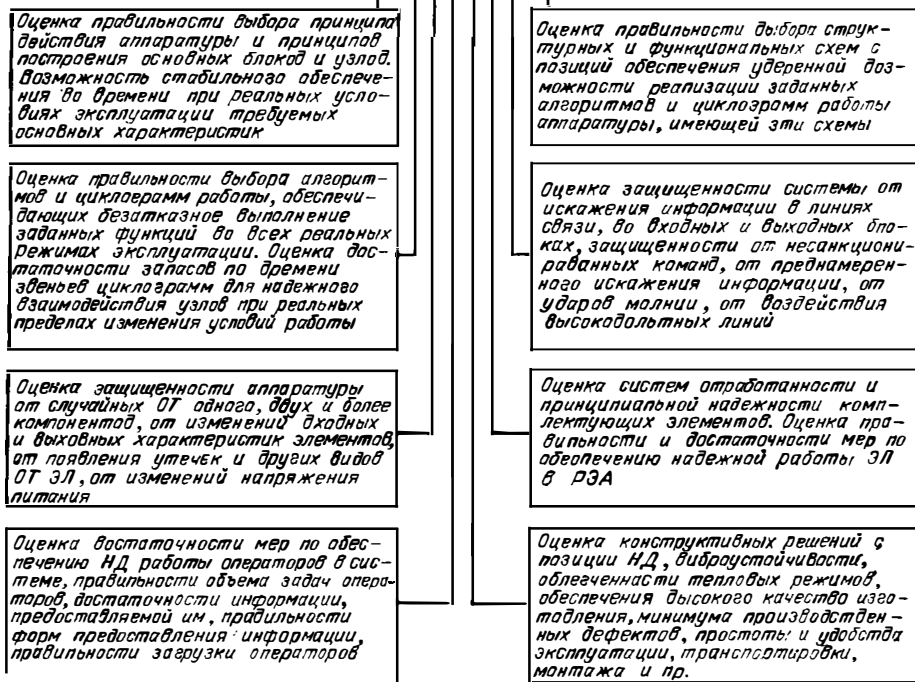


Рис. 11.2. Состав характеристических показателей надежности

выбора алгоритма и циклограмм работы РЭА, степень уверенности в безотказности выполнения заданных функций во всех реальных режимах эксплуатации, особенно важны для оценки НД РЭА, выполняющей последовательность операций, обусловленных сложными логическими функциями. Далеко не всегда эти оценки могут быть проведены на стадии ПТ, нередко они требуют более детальной проработки схем и могут быть выполнены, например, на стадии ЭП, но для систем, работающих по сложным циклограммам, они в значительной степени определяют НД. Должны быть оценены возможные расхождения элементов циклограмм, необходимые запасы, возможные накладки во времени прихода сигналов, НД взаимодействия отдельных приборов, степень уверенности в надежном выполнении всех алгоритмов. Для конкретной аппаратуры в ТЗ должны быть сформулированы

показатели, оценивающие НД с позиций правильности выбора алгоритмов и циклограмм работы РЭА, и указано, когда и как оцениваются выполнение заданных показателей.

Аналогичным должно быть отношение и ко всем группам ХП, в частности к указанным на рис. 11.2, а также к другим группам (например, программным методам обеспечения НД). Для многих систем управления сложными объектами, работающими с ЭВМ, могут быть предложены эффективные программные методы повышения НД. ЭВМ может проводить проверку исправности отдельных приборов, датчиков, агрегатов и при неисправности или сбоях, а также при появлении признаков, позволяющих прогнозировать приближающуюся неисправность (перегрева отдельных точек, вибрации пониженной частоты и др.), проводить переключения в системе, включать резервные цепи, изменять на-

грузки, включать дополнительные источники питания, изменять программу работы и пр. ХП могут оценить эффективность программных методов повышения НД, сопоставить эффективности различных схем, вариантов и пр. Наиболее эффективны эти оценки в конкретных условиях, когда оценка проводится числовыми методами. ХП помимо общих оценок НД позволяют разработчику проанализировать состояние разработки, определить слабые ее места, поэтому правильно разработанная система ХП весьма полезна и для разработчиков, и для заказчиков, так как позволяет конкретно контролировать качество разработки.

Указанные выше группы ХП даны в общем виде, они конкретизируются для различных видов РЭА. В качестве примеров такой конкретизации для больших ЭВМ можно назвать, например: вероятность ОТ ЭВМ при случаях ОТ одного, двух, трех и более ЭЛ любого типа в каких-либо блоках ЭВМ, при отказе одной, двух, трех и более ИС в ЭВМ, при падении напряжения внешнего электрического питания до нуля на время 5 мкс, 5 мс, 5 с. Таких ХП, более или менее общих, можно назвать много. При подготовке ТЗ следует выбирать наиболее важные из них. Аналогично можно назвать ХП, оценивающие правильность выбора алгоритмов и циклограмм работы аппаратуры. Например, для РЭА автоматического управления прокатным станом такими показателями могут быть: степень защищенности от сбоя алгоритма работы стана при случайных сбоях и ОТ одного, двух, трех реле, число ОТ ЭЛ, обрывов цепей и других неисправностей, которые могут привести к поломкам механического оборудования, вероятность остановки стана на одну, три, пять минут и на более длительный срок при одной, двух, пяти и более неисправностях в системе управления и пр.

Подобные конкретные ХП должны быть предложены по каждой из групп, для каждого из видов разрабатываемой РЭА.

Оценки ХП требуют своевременно и тщательного анализа схем и конструкций, нередко экспериментальных исследований блоков, узлов, приборов, что должно быть предусмотрено ПОН, который не

только утверждает руководителем разработки, но и нередко согласовывается с заказчиком.

11.3. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ РЭА

Правильность выбора типов ЭЛ, из которых строится РЭА, имеет принципиальное значение для обеспечения ее НД. Прогресс в развитии РЭА обеспечивается прогрессом в развитии элементной базы, компоненты которой правильнее называть комплектовыми приборами.

Надежность работы ЭЛ в РЭА определяется, во-первых, схемой, конструкцией, технологией изготовления и методами контроля качества самих ЭЛ и, во-вторых, правильностью выбора ЭЛ для РЭА, режимом и условиями использования ЭЛ в аппаратуре. Если на первый фактор разработчик РЭА может влиять выбором типов ЭЛ и указаниями разработчику ЭЛ о необходимости или целесообразности изменения конструкции, характеристик и методов контроля качества, то второй фактор определяется разработчиком РЭА.

Обеспечение и повышением НД работы ЭЛ разработчик РЭА должен заниматься в течение всего периода разработки, начиная от формирования основных идей. Он должен внимательно следить за поисковыми и текущими работами разработчиков ЭЛ, за НД работы однотипных ЭЛ в различных условиях, должен отмечать случаи ОТ ЭЛ и причины этого, способы повышения НД ранее разработанной РЭА различными организациями. Он должен быть в курсе разработок новых материалов, конструкций, технологических приемов и их влияния на повышение НД ЭЛ. Разработка ЭЛ, работы по обеспечению их НД начинаются до разработки РЭА, поэтому нужно знать о перспективах этих работ. Нецелесообразно применять во вновь разрабатываемой аппаратуре новые ЭЛ, по которым нет достаточного опыта применения, нет достоверных материалов о высокой надежности, об оптимальных режимах использования. Однако, когда применены новые ЭЛ позволяет

принципиально улучшить характеристики РЭА, приходится применять их, несмотря на отсутствие достаточного опыта и информации об их реальной НД. В этих случаях особенно важна уверенность разработчиков аппаратуры в принципиальной возможности обеспечения высокой НД ЭЛ. Эта уверенность должна базироваться на отчетливом понимании принципа действия, технологии производства ЭЛ, на знании истинного положения дел на предприятиях-изготовителях ЭЛ, на первоочередном развитии исследовательских, проектных и технологических работ по совершенствованию ЭЛ. Если в принципе ЭЛ данного типа и конструкции могут быть надежными, но в данное время еще недостаточно надежны, то следует понять причины этого и помочь устранить их. Следует помнить, что далеко не всегда ненадежная работа ЭЛ в РЭА определяется только характеристиками ЭЛ, нередко это объясняется конструкцией или схемой РЭА.

После уточнения основных характеристик разрабатываемой РЭА составляется перечень типов ЭЛ, из которых она будет состоять. Далее необходимо оценить, как широко применяются эти типы ЭЛ в других разработках, имеются ли достоверные данные об их НД, об оптимальных режимах применения, нагрузке, питания, об особенностях эксплуатации, обеспечивающих повышенную НД, либо вызывающих повышенную ненадежность ЭЛ. Должны быть выявлены случаи, когда выбранные типы ЭЛ имеют недостаточную НД в других разработках; случаи, когда для обеспечения НД ЭЛ необходимо поддерживать особые условия (например, вводить амортизацию, схемы искрогашения, обогрев, стабилизацию напряжения питания и пр.); случаи, когда ЭЛ являются новыми и нет достоверных сведений об их НД или предприятие-изготовитель недостаточно освоило технологию производства. ● Об этих слабых в отношении НД ЭЛ составляется справка, которая должна быть обсуждена с разработчиками ЭЛ. Ими должен быть составлен план работ по устранению слабых мест. Выполнение этого плана контролируется совместно. Он является предварительным и уточняет-

ся при дальнейшей разработке РЭА.

При разработке принципиальных электрических схем составляются детальные перечни типоминералов ЭЛ и определяются режимы работы каждого из них, выясняется, на какие ЭЛ должно быть получено согласие на применение по ГОСТ 2.117—71. Основными причинами согласования является отсутствие или несоответствие каких-либо параметров, которые должны быть оговорены для обеспечения новых функций ЭЛ или повышения НД РЭА, в которой ЭЛ должны быть применены.

На основе ГОСТ 2.117—71 министерства или ведомства, поставляющие покупные И, по согласованию с Госстандартом разрабатывают отраслевые стандарты, устанавливающие особенности согласования применения покупных И в отрасли. Почти во всех случаях согласования применения разработчик ЭЛ подтверждает, что НД остается высокой и при отличии условий применения от номинальных, при ориентировке на параметры и характеристики, не указанные в КД и пр.

Составление, согласование и утверждение этих карт, как и дальнейшая возможная их корректировка, требуют серьезного внимания, особенно если ЭЛ будут работать в более тяжелых режимах, которые могут понизить НД.

При разработке аппаратуры повышенной НД на режимы использования ЭЛ необходимо обращать особое внимание. ЭЛ нужно применять в облегченных, а не в номинальных режимах, потому что в этих режимах их НД увеличивается, иногда очень значительно по сравнению с использованием в номинальных режимах [7]. Разработчик должен иметь информацию об облегченных режимах и широко использовать их. Например, для резисторов почти всех типов и классов облегченными будут режимы пониженной нагрузки, когда температура резистивного материала невысока, режим пониженной влажности, предохраняющий резисторы от коррозии, режим пониженной температуры окружающей среды. Снижение нагрузки резистора по отношению к номинальной зависит от типа, конструкции и материалов, из которых изготовлен резистор. Для полупроводниковых приборов облегченными будут режи-

мы, при которых перегревы полупроводниковых переходов минимальны, проводимости утечки снижены, напряженности обратного поля на переходах уменьшены до определенного уровня. Эти режимы зависят от типа корпуса (для приборов в герметическом металлическом корпусе и в пластмассовом корпусе они различны). Для некоторых типов конденсаторов неблагоприятной оказывается работа на пониженных по отношению к некоторому критическому уровню напряжениях, для других типов конденсаторов любое снижение уровня рабочего напряжения благоприятно.

Облегченные режимы бывают разными для различных применений одних и тех же ЭЛ (например, конденсаторов в интегрирующих и фильтровых схемах, резисторов в счетных схемах и схемах гашения напряжения и пр.). Разработчик электрической схемы должен быть осведомлен об облегченных режимах, должен понимать важность их применения для обеспечения НД. При анализе и утверждении карт режимов проверяется, являются ли режимы использования ЭЛ облегченными. При анализе режимов использования ЭЛ нужно рассматривать не только режимы эксплуатации РЭА, но и режимы изготовления и производства испытаний, хранения и транспортировки, когда элементы могут повреждаться. Примерный перечень облегченных режимов, рекомендуемых для наиболее часто применяемых ЭЛ, приведен ниже.

Резисторы

Ограничиваемые режимы.

1. Отношение предельной суммарной рассеиваемой мощности P_{max} при максимальной температуре окружающей среды, минимальном атмосферном давлении (в виде суммы мощности потерь по постоянному току, эффективной и средней импульсной мощности) к допускаемой по ТУ предельной рассеиваемой мощности $P_{доп}$: $K_P = P_{max}/P_{доп}$.

2. Отношение предельного суммарного падения напряжения на резисторе U_{max} (в виде суммы постоянного напряжения и его переменных и импульсных составляющих) к допускаемому по ТУ предельному па-

дению напряжения $U_{доп}$: $K_U = U_{max}/U_{доп}$.

Предельно допускаемые значения K_P и K_U : пленочные углеродистые резисторы УНУ-III $K_P=0,5$, $K_U=0,7$; композиционные резисторы КЭВ $K_P=0,4$, $K_U=0,7$; объемные резисторы ТВО-0,125...25 и ТВО-5-60 $K_P=0,6$, $K_U=0,8$; проволочные постоянные резисторы С5-14, С5-16, С5-35В, С5-36В, ПТМН $K_P=0,7$, $K_U=0,8$; проволочные переменные резисторы СП5-1В1, СП5-2, СП5-3, ППЗ-40...47 $K_P=0,8$, $K_U=0,8$; переменные непроволочные резисторы СП, СПО, СП4-1, СП4-2М $K_P=0,5$, $K_U=0,7$.

Конденсаторы

Ограничиваемые режимы.

1. Отношение суммы максимальных значений фактически приложенного к зажимам конденсаторов напряжения U_{max} при максимальной температуре окружающей среды, минимальном атмосферном давлении, допускаемом по ТУ значению $U_{доп}$ с учетом того, что переменное напряжение не превышает 0,8 по амплитуде от допускаемого по ТУ: $K_U = U_{max}/U_{доп}$.

2. Для электролитических конденсаторов отношение минимального фактически приложенного к зажимам конденсатора напряжения постоянного тока U_{min} при минимальной температуре окружающей среды, максимальном атмосферном давлении к допускаемому по ТУ значению $U_{доп}$: $K_{min} = U_{min}/U_{доп}$.

Предельно допускаемые значения K_U и K_{min} : бумажные и металлобумажные конденсаторы К40У-9, К41-1 $K_U=0,6$; металлобумажные конденсаторы К42У-2 $K_U=0,6$; оксидные и оксиднополупроводниковые конденсаторы $K_U=0,7$; $K_{min}=0,2$; металлопленочные, комбинированные и лакопленочные конденсаторы К72П-6, К73П-2, К73-14, К73-16 $K_U=0,6$; слюдяные конденсаторы КСОТ $K_U=0,8$; керамические конденсаторы КВИ, КЛ КДУ, КМ-3, КМ-4, КМ-5, К15-5 $K_U=0,8$.

Полупроводниковые диоды и тиристоры

Ограничиваемые режимы.

1. Отношение фактического предельного значения выпрямленного

рабочего тока I_{max} к допускаемому по ТУ значению при максимальной температуре окружающей среды и минимальном атмосферном давлении $I_{доп}$: $K_I = I_{max}/I_{доп}$.

2. Отношение фактического предельного значения обратного напряжения на диоде $U_{фк\ об}$ к допускаемому по ТУ значению предельного обратного напряжения $U_{доп}$: $K_U = U_{фк\ об}/U_{доп}$.

3. Отношение фактической предельной рассеиваемой мощности $P_{фк}$ при максимальной температуре окружающей среды и минимальном атмосферном давлении к допускаемому по ТУ значению предельной рассеиваемой мощности $P_{доп}$: $K_P = P_{фк}/P_{доп}$.

Предельно допускаемые значения K_I и K_U : германиевые диоды всех типов (без микромодульных) $K_I = 0,5$, $K_U = 0,7$; кремниевые диоды всех типов $K_I = 0,7$, $K_U = 0,8$; тиристоры $K_I = 0,9$, $K_U = 0,8$; туннельные диоды и фотодиоды $K_I = 0,8$; стабилизаторы микромодульные, стабилизаторы $K_P = 0,6$; светодиоды $K_I = 0,85$.

Полупроводниковые транзисторы

Ограничиваемые режимы.

1. Отношение суммарной мощности, рассеиваемой на переходах при максимальной температуре окружающей среды и минимальном атмосферном давлении, к максимальной рассеиваемой мощности, разрешенной по ТУ, $P_{доп}$: $K_P = (U_{вх}/I_{вх} + U_{вых}/I_{вых})/P_{доп}$.

2. Отношение фактического максимального напряжения на электродах $U_{фк}$ к допускаемому по ТУ значению напряжения на данных электродах $U_{доп}$: $K_U = U_{фк}/U_{доп}$.

Предельно допускаемые значения K_P и K_U : мощные кремниевые силовые транзисторы $K_P = 0,7$, $K_U = 0,8$; кремниевые транзисторы средней и малой мощности $K_P = 0,8$, $K_U = 0,8$; варакторы $K_P = 0,5$.

Реле и контакторы

Ограничиваемые режимы.

1. Отношение предельного фактического максимального тока, протекающего через контакты $I_{фк\ max}$, к максимальному току, допускаемому по ТУ, $I_{доп\ max}$: $K_I\ max = I_{фк\ max}/I_{доп\ max}$.

2. Отношение минимального тока, фактически протекающего через контакты, $I_{фк\ min}$ к минимальному току, допускаемому по ТУ, $I_{доп\ min}$: $K_I\ min = I_{фк\ min}/I_{доп\ min}$.

3. Отношение фактического предельного минимального напряжения на разомкнутых контактах $U_{фк\ min}$ к предельному минимальному напряжению, допускаемому по ТУ, $U_{доп\ min}$: $K_U\ min = U_{фк\ min}/U_{доп\ min}$.

4. Отношение предельного фактического максимального напряжения на разомкнутых контактах $U_{фк\ max}$ к предельному напряжению, допускаемому по ТУ, $U_{доп\ max}$: $K_U\ max = U_{фк\ max}/U_{доп\ max}$.

Предельно допускаемые значения K_I : реле электромагнитные слаботочные РЭС-47, РЭС-48, РЭС-49, РЭС-60; РЭС-78, РЭС-80, РЭС-32: $K_I\ max = 0,8$; $K_I\ min = 1,4$; $K_U\ max = 1$, $K_U\ min = 1,4$; реле электромагнитные средней мощности 8Э 122, 8Э 123, РЭН 34, РЭН 35, РНЕ 22, РНЕ 31, РНЕ 44, РНЕ 66: $K_I\ max = 0,8$, $K_I\ min = 1,2$; $K_U\ max = 1$, $K_U\ min = 1,2$.

Типовыми приемами повышения НД ЭЛ и РЭА в целом являются: использование специальных схем искрогашения в коммутационных ЭЛ, развязывающих фильтров, стабилизаторов напряжения питания, ограничителей тока нагрузки, рациональной компоновки трансформаторов и других ЭЛ (для уменьшения паразитных магнитных и электрических взаимодействий), созданных в аппарате каналов и теплопроводных конструкций (для отвода тепла за счет конвекции и теплопроводности) и др.

Очень большое значение для обеспечения НД ЭЛ в РЭА имеет своевременное накопление экспериментальных данных об ОТ ЭЛ и их причинах, а также, коррекция в схемах или конструкции РЭА при необходимости. Система разработки И должна быть организована так, чтобы ни один ОТ ЭЛ на любой стадии разработки, при любых испытаниях приборов, блоков, узлов не оставался неисследованным. Следует обращать внимание даже на очевидную поломку на любой стадии разработки — от лабораторных испытаний макетов блоков и узлов до отчетных испытаний РЭА. Необходимо установить четкие формы представления результатов исследо-

вания причин ОТ, должны быть тщательно учтены условия, при которых произошел ОТ или повреждение, оценены характер и уровни воздействия на ЭЛ. Как правило, разработчик РЭА устанавливает контроль за результатами исследования каждого повреждения, даже в тех случаях, когда анализ причин повреждения проводится изготовителем ЭЛ. На основании актов о результатах исследования ОТ составляются отчеты, приурочиваемые либо к календарным срокам, либо к этапам разработки. В этих отчетах рассматривается частота ОТ ЭЛ каждого типа по определенным причинам, уровни нагрузок и перегрузок, при которых произошли ОТ, оценивается необходимость проведения коррекций в схемах РЭА, необходимость введения защитных и профилактических мер в конструкции РЭА при производстве, монтаже; необходимость доработки ЭЛ, введения дополнительных испытаний РЭА и ЭЛ, т. е. делаются выводы о мерах для повышения НД.

Нередко для повышения НД работы ЭЛ перед установкой их в РЭА рекомендуется проводить электро-, термо- или электротермотренировки ЭЛ и РЭА. В некоторых случаях они вводятся как обязательная стадия испытаний ЭЛ перед поставкой их изготовителям аппаратуры. Целесообразность проведения этих тренировок не во всех случаях очевидна. Иногда они восполняют недостатки производственного контроля или уменьшают влияние дефектов технологии производства. Вопрос о целесообразности и режиме тренировок должен решаться на основании результатов специального анализа.

Анализ экспериментальных материалов о НД ЭЛ в РЭА не ограничивается первыми периодами разработки. На всем протяжении работ с РЭА регулярно должны вестись наблюдения за ОТ ЭЛ, проводится детальный анализ причин ОТ, выпускаются отчеты о НД ЭЛ, при необходимости проводятся работы по коррекции методов испытаний РЭА, КД и ЭД, конструкции, технологии производства и контроля качества ЭЛ. Упущения в производстве и контроле ЭЛ и РЭА могут привести к снижению НД. Необходимо своевременно замечать это и заблаговре-

менно проводить необходимые коррекции. Разработчик РЭА нередко имеет более достоверную информацию о типичных отказах ЭЛ, об их фактической НД, чем разработчик ЭЛ, эту информацию нужно сообщать разработчику ЭЛ.

Промышленность, как правило, отказывается гарантировать значения показателей НД, которые она не может подтвердить при выпуске ЭЛ с предприятия, так как проверить на предприятии-изготовителе Ю меньше $10^{-6} \dots 10^{-7}$ 1/ч трудно. Можно было бы подтвердить эти данные результатами эксплуатации ЭЛ в РЭА, но для этого должна быть уверенность в том, что в способах изготовления и эксплуатации РЭА нет ошибок, снижающих НД ЭЛ. Кроме того, должна существовать система детального учета и исследования каждого ОТ ЭЛ в РЭА, для которой определяются λ -характеристики. Эти характеристики не указываются в ТУ на ЭЛ или в других документах, которые служат основой для гарантии. Для того чтобы партии ИС в 1000 штук гарантировать $\lambda = 10^{-7}$ 1/ч, нужно эти ИС испытывать в течение более 40 мес., а за это время изменяются и исходные материалы и технология производства и сама λ -характеристика, да и ЭЛ, изготовленные более трех лет тому назад, будут давно установлены в серийную аппаратуру. При достаточной отработанности ЭЛ, отсутствии явных дефектов, при современном уровне развития промышленности и проведении при необходимости электротермотренировок ЭЛ можно рассчитывать на следующие средние значения интенсивностей отказов [7]: микросхемы малой и средней степени интеграции $10^{-9} \dots 10^{-11}$ 1/ч; кремниевые транзисторы малой и средней мощности $10^{-10} \dots 10^{-11}$ 1/ч; кремниевые транзисторы силовые $10^{-9} \dots 10^{-10}$ 1/ч; кремниевые диоды малой и средней мощности $10^{-11} \dots 10^{-12}$ 1/ч; резисторы, конденсаторы $10^{-12} \dots 10^{-13}$ 1/ч.

При этом, конечно, должно быть сделано все необходимое в схеме и конструкции РЭА, чтобы обеспечить повышенную НД ЭЛ, которые должны использоваться в облегченных режимах, а также должен быть обеспечен удовлетворительный температурный режим работы ЭЛ и пр. Если ЭЛ имеют меньшую НД, значит,

они недоработаны либо РЭА разработана плохо и нужно искать меры, которые повысят НД ЭЛ.

11.4. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЭА СХЕМОТЕХНИЧЕСКИМИ ПРИЕМАМИ

Схемы РЭА могут решающим способом влиять на ее НД. Простота схемы, обеспечение уверенности в безусловном выполнении схемой заданных функций, стабильность характеристик, резервирование приборов, блоков, узлов и ЭЛ — все эти обстоятельства в значительной мере определяют НД РЭА в различных эксплуатационных режимах. Далеко не всегда наиболее простая схема имеет максимальную НД. Схема должна выполнять заданные функции, быть стабильной, противостоять всем заданным воздействиям. Это нередко требует усложнения схемы, введения корректирующих, стабилизирующих, защитных ЭЛ и цепей. Иногда к РЭА предъявляется требование, что она должна оставаться работоспособной при ОТ одного, двух и более ЭЛ, одного из ЭЛ каждого блока или каждого функционального узла и др. Это также требует введения дополнительных ЭЛ в схему, усложнения ее, создания схем с «избыточностью» [8].

Нередко в сложных ответственных системах резервируют источники питания, предусматривая возможность питания РЭА от линии электропередач, дизельных электростанций, аккумуляторов, солнечных батарей. Резервируют ЭВМ, навигационные устройства, высотомеры, отдельные блоки РЭА, обеспечивая нормальную работу ответственных систем при отказах ЭЛ, выключении линий электропередач и др. Резервирование может существенно повысить НД, создать уверенную защиту системы от различных воздействий, но оно способствует увеличению массы, стоимости системы, трудозатрат на ее изготовление и эксплуатацию и не всегда эффективно, поэтому необходимость резервирования должна быть обоснована. Обоснование резервирования может исходить непосредственно из требований ТЗ (например, требование об автономных или резервных источниках питания) либо из результатов анализа схем, режимов, циклограмм.

Формирование вариантов схем проводится на основании ТЗ с учетом заданных условий работы и требований, излагаемых в нормативно-технической документации. Формирование схемы, как правило, — сложная техническая задача, требующая тщательного изучения ТЗ, наличия опыта, понимания принципов работы РЭА и характера взаимодействия ее узлов. Чаще всего варианты схемы формируются с использованием предыдущего опыта разработок аналогичных И. После того как сформирован вариант структурной схемы, нужно провести оценки НД; они должны дать основания для принятия решения об удовлетворительности или неудовлетворительности структурных схем в смысле НД, необходимости или отсутствия необходимости их переработки, нужных тенденциях доработки схем, необходимым резервированием.

Оценки НД структурных схем составляются на основании двух проверок: проверки (с той степенью детализации и достоверности, с которой это возможно для структурных схем) выполнения заданных функций в заданных эксплуатационных режимах и условиях; проверки того, что оценки расчетных показателей НД данного варианта схемы не противоречат по величине заданным требованиям.

Первая проверка проводится с помощью анализа перечня функций, которые должны выполняться аппаратурой в каждом из эксплуатационных режимов, и перечня заданных условий, при которых должны выполняться функции. Желательно подтвердить, что заданные функции полностью выполняются и что при этом имеются необходимые запасы по условиям, при которых должны выполняться эти функции, и по эксплуатационным параметрам и характеристикам, которые реализуются. По каждому из рассмотренных вариантов схем следует составить сводку содержащую основные результаты анализа (табл. 11.2). Естественно, что при анализе структурной схемы степень детализации и достоверность сводки будут не очень высокими. Более детальный анализ проводится на дальнейших стадиях разработки РЭА.

Если в результате анализа подтверждено, что все заданные функ-

Форма для оценки функций РЭА

Эксплуатационный режим	Функции, выполняемые РЭА	Условия, при которых должны выполняться заданные функции	Соответствие заданных эксплуатационных параметров реализуемым	Запасы по условиям, при которых выполняются функции, и по эксплуатационным параметрам	Оценки качества выполнения функций
...

ции определенными вариантами схем выполняются в заданных условиях, что при этом эксплуатационные показатели лежат в заданных нормах, проводится расчетная проверка, которая должна показать, что требования по НД не противоречат принципиальным возможностям, ограниченным НД принятых типов ЭЛ и схемой.

НД ЭЛ часто характеризуют величиной интенсивности отказов, которую нельзя рассматривать как константу. В действительности (особенно для ограниченного числа ЭЛ данного типа, выпущенных каким-либо заводом в каком-либо году или месяце, установленных в РЭА конкретного типа, работающих в определенных условиях и т. п.), она изменяется во времени, от качества исходных материалов, от колебаний технологии производства, состояния средств контроля качества в процессе производства и т. д. Интенсивность ОТ для многих современных ЭЛ настолько мала, что трудно рассчитывать на стабильность этой характеристики и устойчивость частоты ОТ. Как указывалось выше, для многих типов резисторов следует считать с ИО порядка 10^{-12} 1/ч, для некоторых типов транзисторов ИО не превышают 10^{-11} 1/ч, для микросхем 10^{-9} ... 10^{-10} 1/ч [7]. Речь идет о практически безотказных ЭЛ, в которых ОТ возникают либо при ошибке в процессе производства ЭЛ, либо в процессе производства или эксплуатации РЭА. Эти ОТ, как правило, бывают единичными, причины их исследуются и чаще всего могут быть устранены. Фактические значения ИО в этих случаях можно определить лишь по результатам эксплуатации больших количеств ЭЛ в течение значительных периодов времени. Они должны быть осреднены

по датам производства ЭЛ, по различным приборам, местам эксплуатации приборов и пр. Это приближенные данные, практически невозможные на относительно малых партиях или группах ЭЛ. И все же при анализе, выборе схемы расчеты НД РЭА с использованием таких приближенных исходных данных о НД ЭЛ позволяют приблизительно установить, могут ли быть достигнуты требуемые значения характеристик НД, например вероятности безотказной работы на больших партиях РЭА, изготовленных за длительный срок, при отсутствии производственных дефектов, конструктивных недоработок, эксплуатационных ошибок в РЭА, т. е. при условии, что причинами ОТ РЭА будут только ОТ ЭЛ. Если задаваться условием, что ОТ ЭЛ будут причиной только половины всех ОТ или только трети ОТ РЭА, можно оценить порядок величины показателей НД при условии достижения определенной степени отработки РЭА и определенном уровне квалификации специалистов по эксплуатации. Конечно, результаты таких расчетов не будут точными, но для ориентировки такие расчеты пригодны. Например, предположим, что для сложной системы управления химическим производством требуется при непрерывной работе в течение одного года иметь вероятность безотказной работы РЭА не менее 0,999. Известно, что система управления имеет большую ЭВМ, входные устройства, устройства для анализа и преобразования информации, выходные устройства, источники питания и другие, работающие в «надежном» смысле последовательно, т. е. без резервирования. Составляя последовательную схему безотказной работы для расчета НД, мы должны будем последовательно «соединить»:

12 500 шт. ИС с ИО 10^{-9} 1/4, 19 800 транзисторов с ИО 10^{-10} 1/4, 25 000 диодов с ИО 10^{-10} 1/4, 50 000 резисторов с ИО 10^{-12} 1/4, 40 000 конденсаторов с ИО 10^{-12} 1/4, 1 000 000 пак с ИО $5 \cdot 10^{-13}$ 1/4. Расчет по этой схеме дает приближенное значение вероятности безотказной работы в течение 1 года 0,971. Это значит, что даже при «выбранных» низких значениях ИО, т. е. при высокой НД ЭЛ, при условии, что других причин, кроме ОТ ЭЛ для ОТ системы не существует, а также что система отработана полностью и не имеет конструктивных дефектов, требования по НД не выполняются. Расчетная ненадежность (0,029) оказалась в 29 раз выше заданной (0,001). Очевидно, что «последовательная» схема непригодна, нужно вводить резервирование. Более детальные расчеты, учитывающие схемы отдельных приборов или блоков, позволяют выяснить, на каких участках схемы выгоднее вводить резервирование и насколько эффективным должно быть резервирование. Необходимо только учитывать в результатах расчетов их приближенность, явную оптимистичность результатов по сравнению с реальной действительностью (при расчетах учитываются только возможные ОТ ЭЛ).

При проверке НД структурных и функциональных схем конкретные принципиальные схемы блоков РЭА часто бывают не ясны и поэтому возникают затруднения при надежном контроле схем, трудно провести даже приближенный расчет НД, как это было сделано выше, когда задались числом ИС, транзисторов, конденсаторов и приближенно оценкой НД «последовательной» схемы. При отсутствии данных об элементном составе РЭА и грубо-оценочном расчете НД структурных схем можно по опыту, накапливаемому при эксплуатации прежних разработок, или по опыту разработок, сделанных другими организациями, оценить НД отдельных блоков структурной схемы (усилителей, дешифраторов или более крупных блоков питания, процессоров и пр.). Конечно, точность подобных расчетов будет невелика, следует выбирать для расчетов данные о блоках, построенных на таких же ЭЛ, имеющих примерно ту же сложность, оценивать данные, накопленные приблизительно в одинаковых

с разрабатываемым устройством режимах эксплуатации. Но при недостаточности данных о схеме и конструкции разрабатываемых устройств такие приближенные сведения могут все же служить для ориентировки.

Анализ и отбор структурных и функциональных схемных вариантов является весьма важной частью разработки: неудачный выбор и неверные решения вызывают необходимость принципиальных изменений в дальнейшей разработке, что приводит к задержкам и непроизводительным расходам. Поэтому крайне важно воспользоваться любыми реальными возможностями для того, чтобы провести возможно более достоверные расчеты для обоснования выбора варианта структурной схемы.

Для повышения НД «слабых» звеньев структурных схем можно улучшать их технические характеристики, применять более надежные ЭЛ, изменять принцип действия схемы или конструкцию звеньев, совершенствовать систему эксплуатации. Можно повышать НД структурной схемы, устанавливая резервные звенья, блоки, приборы. При принятии решения о введении резервирования следует учитывать, что использование резерва вызывает дополнительные затраты на изготовление РЭА, ее установку и эксплуатацию, на дополнительную площадь и избыточные энергозатраты. Введение резервирования — это дорогостоящий метод повышения НД системы и его нужно применять, когда иными методами решить задачу нельзя.

11.5. ОТРАБОТОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Эти испытания особенно важны при обеспечении НД новой, сложной РЭА. Если разрабатываемая РЭА очень проста или представляет собой лишь малосущественную модификацию существующих серийных изделий, часто можно обойтись без тщательной отработки. Но в сложных устройствах, проектируемых заново, особенно если в проектировании заняты большие коллективы, без тщательной отработки обойтись нельзя. Целью отработочных испытаний является выявление всех недостатков разрабатываемой РЭА, ухудшающих НД, и контроль за эффективностью мер, проводимых для повышения НД.

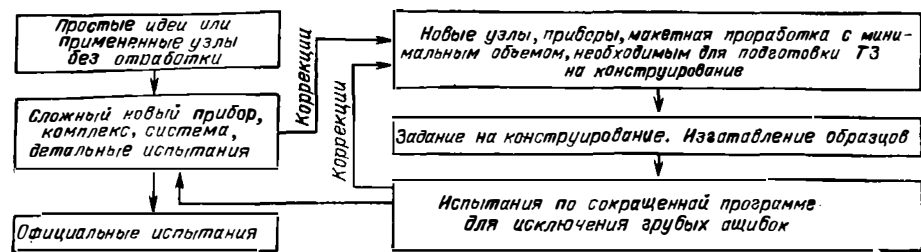


Рис. 11.3. Схема отработки РЭА

Методика первоначальной отработки РЭА разработчиком показана на рис. 11.3. Простые узлы, имеющие тривиальные схемные или конструктивные решения, и узлы из других разработок применяются в РЭА без предварительной отработки. Вновь разрабатываемые нетривиальные схемы подвергаются макетным испытаниям в объеме, который необходим для проверки принципиальной правильности схемы и подготовки ТЗ на конструирование. После выдачи ТЗ, подготовки эскизной КД изготавливаются опытные образцы, которые подвергаются автономным испытаниям по сокращенной программе, достаточной для того, чтобы убедиться в отсутствии грубых ошибок. Затем они передаются на комплектацию приборов, комплексов, систем, частями которых эти узлы являются. Приборы, комплексы, системы подвергаются детальным конструктивным испытаниям, проводимым при непосредственном участии разработчика и по его программам. После устранения всех замечаний по результатам испытаний схемы и конструкции РЭА передается на официальные отработочные испытания.

Наряду с предварительной отработкой приборов и блоков ведется предварительная проверка правильности структурных схем систем, имеющая целью подтверждение правильности схем и выбора основных параметров приборов, проверка надежного функционирования, электрической совместимости и помехозащитности РЭА. Проработка обычно проводится на моделях и макетах, проверяется правильность выбора состава сложных систем, целесообразность распределения функций между человеком и машиной, правильность выбранных алгоритмов и цик-

лограмм работы сложных систем. Официальные испытания начинают конструкторскими поверочными испытаниями приборов и самостоятельно разработанных блоков РЭА. Конструкторские поверочные испытания проводятся на приборах и блоках, имеющих отдельные ТУ. Их задача состоит в том, чтобы убедиться, что И полностью выполняет заданные функции в заданных условиях и имеет при этом требуемые эксплуатационные параметры. Эти испытания являются автономными, приборы или блоки вначале испытываются не в составе системы. Подачу сигналов на вход, подключение нагрузки на выход и другие операции производят с помощью испытательной аппаратуры либо с помощью имитаторов. Как правило, автономные конструкторские испытания проводятся при реализации всех видов условий эксплуатации работы И, но более тяжелых, чем заданные в ТЗ. При испытаниях проверяется, имеются ли запасы в НД и каковы эти запасы. В программе автономных испытаний И должна быть предусмотрена проверка приборов, имеющих регулировки, проверка качества работы при экстремальных внешних условиях, устойчивость к искажениям формы сигналов, напряжений питания, помехам. По результатам автономных испытаний могут проводиться коррекции схемы и конструкции (обычно без согласования с заказчиком), испытания являются конструкторскими. По результатам испытаний выпускается официальный отчет, утверждаемый руководителем разработки. В отчете должно быть установлено, что РЭА удовлетворительно выполняет все заданные функции, имея необходимые запасы по условиям работы и эксплуатационным ха-

рактикам и что ХП выполняются. Должны быть тщательно разобраны все отказы и замечания, имевшие место при испытаниях, а также указано, какие коррекции проведены по результатам испытаний, подтверждена эффективность коррекций.

Конструкторские проверки правильности программ работы ЭВМ в системах проводятся в аналого-цифровой модели системы с использованием макетных образцов или макетов приборов, ЭВМ, модели, имитирующей нагрузки и воздействие внешней среды. При этих испытаниях проверяется правильность программы при различных внешних ситуациях и условиях, проводится первоначальная проверка правильности работы всей системы. Как и конструкторские автономные испытания РЭА, эти испытания являются испытаниями разработчиков, программа их не согласовывается с заказчиком, коррекции по их результатам проводятся по указанию руководителя разработки без согласования с заказчиком. По результатам испытаний выпускается официальный отчет, утверждаемый руководителем разработки.

Параллельно с проверкой правильности программ или непосредственно след за этой проверкой проводятся комплексные конструкторские испытания систем. В этих испытаниях используются макетные образцы приборов и блоков, составляющих систему и изготовленных по эскизной КД. По возможности, используют макетные или опытные образцы источников питания, кабельных сетей, нагрузок для выполнения макетного образца системы. Проверяются рабочие, испытательные и другие режимы системы, а также реагирование системы на отказы в отдельных приборах и блоках, помехоустойчивость системы при различных типах и уровнях помех, реагирование системы на изменение параметров питания, на различные внешние воздействия, на изменение температуры, вибрации, согласованность действия отдельных приборов, подсистем. При необходимости воздействие внешних факторов может имитироваться изменением параметров питания, уровней сигналов на входе отдельных приборов, нагрузок и др. Факт имитации и масштабы утверждаются руководителем разработки. Отчет по комплексным конструкторским испытаниям должен

показать, что вся система удовлетворительно выполняет заданные функции и циклограммы при всех заданных режимах работы, что все характеристики системы обеспечивают надежную работу во всех заданных режимах питания, сигналы и помехоустойчивость отдельных приборов согласованы, ХП выполняются.

По результатам конструкторских испытаний иногда приходится проводить достаточно сложные коррекции отдельных приборов, программ, связей между приборами, а иногда изменения систем. В этих случаях нередко повторяют отдельные или даже полные конструкторские испытания либо проводят испытания по частным программам для проверки каких-либо характеристик. По результатам конструкторских испытаний выпускается заключение о готовности РЭА к совместным контрольным испытаниям с заказчиком.

После успешного окончания конструкторских поверочных испытаний начинается цикл контрольных испытаний совместно с заказчиком на РЭА, изготовленной по эскизной КД, но по основным параметрам согласованной с заказчиком, проверенной и принятой заказчиком на соответствие этой документации. В аппаратуре все коррекции по результатам конструкторских испытаний должны быть проведены. Программа испытаний согласовывается с заказчиком, по результатам испытаний выпускается согласовываемый с заказчиком отчет. Проводятся три группы испытаний: автономные испытания приборов, проверка программ работы ЭВМ и комплексные испытания системы. Программа испытаний, проводимых совместно с заказчиком, строится так, чтобы проверить соответствие разработанной РЭА требованиям, заданным в ТЗ на разработку. Это прежде всего касается выполнения заданных функций в заданных режимах и условиях. При совместных испытаниях, как правило, ОТ РЭА не допускаются; в случае, если ОТ все же произошел, совместно с заказчиком проводится исследование причин ОТ, устанавливается, какие меры должны быть приняты для предупреждения ОТ в будущем, проверяется эффективность этих мер. Цель совместных испытаний в том, чтобы предупредить, перед официальными сдаточными испытаниями РЭА и согласованием КД с заказчиком, убе-

диться в соответствии аппаратуры ТЗ.

Конструкторские и совместные с заказчиком испытания проводят иногда на одном, чаще на двух или трех образцах. Поэтому, если рассматривать результаты каждого из испытаний как случайные, то достаточно достоверных результатов по испытаниям трех образцов нельзя получить. Однако оснований для того, чтобы рассматривать результаты этих испытаний как полностью случайные, нет. Испытания проводятся в строго контролируемых условиях, испытываемая РЭА изготовлена по известной схеме, из известных ЭЛ, имеет известные параметры и характеристики, в процессе испытаний проводятся подробные измерения. Поэтому есть основания доверять результатам испытаний и рассматривать «свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей...» как НД.

Если принять, что результаты испытаний имеют все же ограниченную достоверность, то, увеличивая число объектов, испытываемых в тех же условиях, можно повысить достоверность результатов. Если полагать, что достоверность единичного опыта $p_1 = 0,7$, то при повторении опыта в тех же условиях на однотипном объекте, получим достоверность повторного результата $p_2 = 1 - (1 - p_1)^2 = 0,91$. Проведя третий опыт в тех же условиях, получим $p_3 = 1 - (1 - p_1)^3 = 0,973$ (четвертый 0,9919, пятый — 0,99757 и т. д.).

В зависимости от сложности и ответственности систем, от предполагаемой серийности производства объем отдельных отработочных испытаний может быть изменен. Могут быть введены новые подразделы программы испытаний или устранены некоторые из перечисленных выше. Описанная система является типовой, но не обязательной для любой РЭА.

Результаты отработочных испытаний дают возможность утверждать, что испытанная РЭА способна выполнять заданные функции в заданных условиях, но при этом остается неподтвержденным вопрос о времени, в течение которого РЭА способна выполнять заданные функции. В тех случаях, когда в соответствии с ТЗ гарантийный срок действия РЭА не очень велик, его можно проверить прямыми испытаниями. Но часто тре-

буемый срок действия аппаратуры составляет 10, 15, 20 лет. В этих случаях можно строить РЭА из ЭЛ и материалов, имеющих достаточные сроки службы, и утверждать, что характеристики РЭА, полученные в начале срока службы при отработочных испытаниях, сохранятся до конца срока службы ЭЛ. Если этого сделать нельзя, оценивают возможные причины ОТ, предыдущий опыт исследования дефектов и другое, что позволяет дать приближенные оценки срока службы РЭА.

Следует подчеркнуть важность полной и своевременной отработки помехозащищенности, электрической и электромагнитной совместимости современных систем управления, работающих с цифровыми вычислительными машинами. Недостаточная отработанность систем в заводских и стендовых условиях может привести к крайне дорогостоящим и отнимающим много времени срывам при натурных испытаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. — М.: Сов. радио, 1975.
2. Bemann H. V., Geißler M. Zuverlässigkeitsanalyse spezieller Strukturen mit der Digitalsimulation. — Nachrichtentechnik Elektronik, 1981, Bd. 31, H. 12.
3. Johnson E. Redundancy for on-line computer control systems. — Third Nat. Reliability Conf. — Reliability, 1981.
4. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/ Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1980.
5. Бердичевский Б. Е. Оценка надежности аппаратуры автоматики. — М.: Машиностроение, 1966.
6. Бердичевский Б. Е. Вопросы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при разработке. — М.: Сов. радио, 1977.
7. Mil — HDBK — 217C. — Reliability prediction of electronic equipment, 1979.
8. Моложин В. П. Модели управления надежностью авиационной техники. — М.: Машиностроение, 1981.

12. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Основные аббревиатуры

И	— изделие
К	— коэффициент
КИ	— качество изделия
КП	— комплексный показатель (качества)
М	— метод
МС	— микросборка
П	— показатель
ПП	— печатная плата
ТЭЭ	— типовый элемент замены
ФУ	— функциональный узел
ЭРЭ	— электрорадиоэлементы
ЭФ	— эффективность

12.1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Оценка эффективности системы мероприятий по конструированию РЭА может быть получена на основе методологии теории исследования операций [2, 3] с учетом ограничений, отмеченных в [1].

В целях упрощения задачи эффективности конструирования удобнее оценивать по показателю качества изделия. Несмотря на определенный риск такого допущения из-за различий в определениях КИ, этот подход вполне обоснован, так как ЭФ при функционировании является проявлением качества конструктивной разработки [1, 3]. При этом методологической основой оценки ЭФ конструирования РЭА является квалиметрия (оценка качества И) как часть теории исследования операций. КИ в результате его функционирования в определенных условиях по прямому назначению может быть измерено по результату этого функционирования. Каждое И обладает определенной потенциальной ЭФ для заданных условий, которая зависит от его свойств. При этом под свойствами И понимают его объективные особенности, проявляющиеся в процессе разработки, производства и эксплуатации.

Совокупность свойств И, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением, называется качеством изделия.

Количественные характеристики свойств И, определяющие КИ, называются показателем качества и мо-

гут быть: единичными (дифференциальными), относящимися только к одному из его свойств; комплексными, относящимися к нескольким его свойствам; интегральными, отражающими соотношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации И и затрат на его разработку, создание и эксплуатацию; базовыми, принятыми за исходные при сравнительных оценках качества.

Качество изделия определяется различными конструктивными и технологическими свойствами, обуславливающими трудоемкость производства И и эффективность его эксплуатации (пригодность к техническому обслуживанию, ремонту, хранению и транспортированию), безотказностью и долговечностью.

Показатели качества

К основным П качества И относят: назначение, характеризующее полезный эффект от использования И в определенной области его применения; надежность и долговечность И в конкретных условиях использования; конструктивно-технические П; технологичность, характеризующую эффективность решений для обеспечения высокой производительности при изготовлении и ремонте И; экономические П, отражающие затраты на разработку, технологическую перестройку производства в процессе изготовления серийных образцов, затраты на обслуживание и ремонт в процессе эксплуатации, а также инженерно-психологические, патентно-правовые и др.

Так как разработка И, как правило, осуществляется с выполнением требований комплексной миниатюризации, унификации и стандартизации, целесообразно рассматривать и такие П качества, как объемно-массовую, временную и энергетическую миниатюризацию, показатели эксплуатационной приспособленности (пригодности) и показатели, характеризующие устойчивость И к внешним воздействиям среды (уровни полей, механические, климатические и другие воздействия), показатели базовости, унификации и стандартизации, модернизационной способности. Необ-

ходимость учета этих факторов обусловлена существенным влиянием уровней миниатюризации, стандартизации и унификации образцов РЭА на П качества.

П назначения характеризует качество полезной работы, которую И совершает (дальность обнаружения целей, их классификацию, точность измерения их координат, динамический диапазон, пропускную способность и т. д.). П надежности и долговечности по значимости обычно приравниваются к П назначения. В практике расчета надежности известны единичные и комплексные П надежности. К последним относятся коэффициенты готовности и технического использования, а также вероятность безотказного функционирования при выполнении задачи. К основным П технологичности относятся: коэффициенты сборности (блочности) изделия и использования рациональных материалов; удельные показатели трудоемкости производства и материалоемкости И и др. В качестве эксплуатационной пригодности можно рассматривать число человеко-часов, затрачиваемых на регламентное техническое обслуживание, профилактический ремонт РЭА за установленное время. Сущность экономических, массогабаритных показателей, уровней комплексной миниатюризации, стандартизации и унификации особых пояснений не требует. Они достаточно полно представлены в [2], ГОСТ, ОСТ и другой нормативно-технической документации.

Комплексный показатель качества

Частных П качества может быть достаточно много, что затрудняет оценку И и требует введения обобщенного критерия КИ U , по совокупности П его свойств. Для уменьшения числа П (когда их число n велико) исключают те из них, которые не являются определяющими (имеют малый параметрический вес). Такой обобщенный критерий, обычно называемый КП качества, можно представить так:

$$U = \sum_{l=1}^n \alpha_l W_l \quad (l=1, 2, \dots, n), \quad (12.1)$$

где α_l — положительные (для показателей W_l , которые желательны максимизировать) или отрицательные

(для тех, которые желательно минимизировать) коэффициенты (параметрические веса). Абсолютные значения α_l соответствуют степени важности П W_l .

Допустимость оценки КИ по КП, определенным образом синтезированным из совокупности частных (дифференциальных) П, подтверждается следующими соображениями:

а) КИ не только познаваемо, но и может быть выражено количественно, так как в процессе развития любой науки, и в том числе квалиметрии, рано или поздно наступает этап, на котором ее основные понятия переводятся на язык математики (экспликации понятий);

б) данные психологии свидетельствуют о том, что человек, осуществляющий операцию выбора (например, одного из многих конструкторско-технологических решений) имеет в своем подсознании обобщенные модели качества этих решений, которые он оценивает каким-то образом количественно;

в) с точки зрения математики задачи выбора лучшего варианта из нескольких является задачей оптимизации некоторой функции, зависящей от нескольких переменных (дифференциальных показателей качества изделия, решения). Однако вся теория оптимизации строится на соблюдении одного важного условия: оптимизируемая функция (функция цели) должна быть единственной.

Следовательно, КИ как объект оптимизации должно иметь единственный критерий. Таким критерием может быть КП. Правомочность применения указанной формы обосновывается следующим образом: имеется m изделий (или вариантов исполнения одного и того же И) $O_1, \dots, O_i, \dots, O_m$, каждое из которых обладает p свойствами $C_1, \dots, C_l, \dots, C_p$. Дана mp -матрица

$$U = \begin{bmatrix} W_{11} & \dots & W_{1l} & \dots & W_{1p} \\ W_{i1} & \dots & W_{il} & \dots & W_{ip} \\ W_{m1} & \dots & W_{ml} & \dots & W_{mp} \end{bmatrix},$$

где элемент W_{il} ($i=1, 2, \dots, m$; $l=1, 2, \dots, p$) — некоторое число, характеризующее l -е свойства изделия O_i .

Считается, что O_i предпочтительнее O_j по свойству C_l , если $W_{il} > W_{jl}$ (если более предпочтительно изделие соответствует меньшее зна-

чение выбранного показателя, его берут со знаком минус); при $W_{il} = W_{jl}$ объекты O_i и O_j равноценны с точки зрения свойства C_l .

Качество изделия O_i по совокупности свойств C_l ($l=1, 2, \dots, p$) характеризуется комплексным показателем U_i . Изделие O_i предпочтается изделию O_j тогда и только тогда, когда $U_i > U_j$; при $U_i = U_j$ изделия считаются равноценными.

Установленное таким образом отношение предпочтительности (равноценности) является транзитивным (если $O_j \succ O_i$, а $O_i \succ O_h$, то $O_j \succ O_h$). Именно в этом и заключается смысл замены вектора $\langle W_{i1}, \dots, W_{i2}, \dots, W_{ip} \rangle$ одним комплексным показателем U_i . Очевидно, что любая процедура сравнения качества, которая при $m > 2$ может привести к не транзитивным предположениям, должна быть признана заведомо неприемлемой. Таким образом, всегда можно расположить И O_i ($i=1, 2, \dots, m$) в порядке убывания (точнее, невозрастания) их предпочтительности: последовательность $O_1, O_2, \dots, O_i, \dots, O_m$ упорядочена в порядке убывания предпочтительности, если (и только если)

$$U_1 \geq U_2 \geq \dots \geq U_i \geq \dots \geq U_m,$$

то наиболее предпочтительно И O_1 , которому соответствует максимальный П качества U_1 .

Указанная процедура сравнения ИИ O_i обладает следующими свойствами:

каждой матрице u соответствует единственное (с точностью до перестановки равноценных объектов) упорядочение объектов O_i ($i=1, 2, \dots, m$) по предпочтительности; порядок предпочтений не зависит от обозначений объектов; при добавлении или исключении из последовательности каких-нибудь объектов упорядочение других не меняется;

если И O_i предпочтительнее И O_j по одному или нескольким свойствам и равноценно по остальным (т. е. $W_{il} \geq W_{jl}$, $l=1, 2, \dots, p$ и хотя бы для одного l $W_{il} > W_{jl}$), то O_i предпочтительнее O_j по совокупности свойств C_l ($l=1, 2, \dots, p$);

изменение какого-либо частного П качества для всех сравниваемых И на одну и ту же величину не изменяет порядка предпочтений. Если хотя бы одно из перечисленных усло-

вий не выполняется, критерием U_i пользоваться нельзя.

Помимо указанных процедура сравнения качества изделий должна учитывать четыре дополнительных ограничения:

1 — вид функции для U_i не имеет значения для тех случаев оценки качества, когда решается задача выбора лучшего варианта, и весьма существенно, когда определяется степень превосходства одного варианта над другим;

2 — необходимо учитывать интервал изменения П свойств. В простейшем виде можно учесть недопустимость выхода П W_l за определенные пределы $[W_l \min, W_l \max]$ путем введения символа Кронекера:

$$\delta_l = \begin{cases} 1, & \text{если } W_l \in [W_l \min, W_l \max], \\ & (l=1, 2, \dots, p) \\ 0, & \text{если } W_l \notin [W_l \min, W_l \max]. \end{cases}$$

$$\text{Тогда } U = \left[\sum_{l=1}^p \alpha_l W_l \right] \prod_{l=1}^p \delta_l.$$

Если хотя бы для одного показателя W_l его значение выходит за допустимые пределы, КП U будет равен нулю;

3 — линейная форма представления КП (12.1) применима для расчета только тогда, когда речь идет о суммировании дифференциальных оценок свойств, составляющих простую совокупность (аддитивная система);

4 — число П качества, привлекаемых для синтеза КП, весьма существенный фактор для установления значения U . Это число может быть определено экспериментальным путем либо путем следующих рассуждений.

Предположим, что свойства C_l ранжированы по значимости, т. е. образован кортеж $\langle C_1, C_2, \dots, C_i, C_j, \dots, C_p \rangle$. Можно показать, что функция $\alpha(i)$ — весовой К l -го свойства в кортеже — должна представляться в виде

$$\alpha_i = \frac{i}{a^{i-1}} = \frac{i}{2^{i-1}}, \quad i \neq 0.$$

Следовательно, весовые К изменяются с изменением порядкового номера в кортеже в геометрической прогрессии, так что для какого-то i -го числа кортежа может оказаться $\alpha(i) < \Delta$, где точность расчетов Δ .

Отсюда можно сделать вывод о том, что число свойств, привлекае-

мых для расчета КП, необходимо определять в соответствии с точностью решения задачи, т. е. путем решения уравнения $i/2^{i-1} = \Delta$ относительно i .

Определение весовых коэффициентов α_l при использовании интегрального показателя качества

В практике определения значений α_l наиболее широко используются стоимостный, вероятностный и экспертный методы.

Стоимостный метод предполагает, что коэффициент веса α_l ($l=1, 2, \dots, p$) является монотонно возрастающей функцией от аргумента S_l , выражающего денежные или трудовые затраты, необходимые для обеспечения существования l -го свойства, т. е. $\alpha_l = f(S_l)$ при $l=1, 2, \dots, p$. Можно

$$\text{принять } \alpha_l = S_l / \sum_{l=1}^p S_l.$$

Недостатком этого М является зависимость весового К от затрат, которые со временем могут претерпеть изменения.

Вероятностный метод (М систематической обработки проектов, вариантов, решений) предполагает, что существует $f(W_l/W_l^{(0)})$ — некоторая функция, показывающая степень приближения абсолютного показателя l -го свойства W_l к эталону $W_l^{(0)}$. Тогда можно записать $\alpha_l = F[f(W_l/W_l^{(0)})]$. Весомость показателя тем выше, чем больше степень его приближения к эталону. Исходя из этого принципа,

$$\alpha_l \approx \bar{\alpha}_l = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{K_{li}}{\sum_{l=1}^p K_{li}}}{m},$$

где m — достаточно большое число анализируемых вариантов (конструкций) аппаратуры, выполненных разными разработчиками; K_{li} — относительная оценка l -го свойства в i -м варианте (т. е. оценка степени приближения в i -м варианте абсолютного П l -го свойства W_l к своему эталонному значению $W_l^{(0)}$,

$$K_{li} = K_{li}'' + 0,64 \operatorname{sgn} K_{li}'' (1 - K_{li}'') \times \operatorname{arctg}(S_l),$$

где $K_{li}'' = K_{li}' l(V)$ при условии, что

$V = 1 - W_l / W_l^{(0)}$ (W_l — абсолютный П l -го свойства в i -м варианте);

$$l(V) = \begin{cases} 0 & \text{при } V \leq 0 \\ 1 & \text{при } V > 0 \end{cases};$$

$$\operatorname{sgn} K_{li}'' = \begin{cases} 1 & \text{при } K_{li}'' \neq 0; \\ 0 & \text{при } K_{li}'' = 0. \end{cases}$$

Величина S_l , характеризующая интервал изменения абсолютных показателей l -го свойства, определяется выражением:

$$S_l = \frac{W_l \max - W_l \min}{W_l^{(0)}};$$

$$K_{li}' = 1 - \frac{|W_l^{(0)} - W_{li}|}{W_l^{(0)}};$$

$$0 \leq S_l \leq \infty;$$

$$0 \leq K_{li}' \leq 1;$$

$$0 \leq K_{li}'' \leq 1;$$

$$0 \leq K_{li} \leq 1;$$

$$0 \leq \alpha_l \leq 1.$$

Экспертный метод предполагает эвристические процедуры принятия решений за счет использования обобщенного опыта (коллективной мудрости) специалистов. Процедура получения экспертных оценок весовых К складывается из следующих этапов: организации и проведения опроса экспертов; обработки результатов опроса и получения оценок К; анализа результатов.

Определяющим моментом экспертного М является подбор экспертов и оценка их квалификации (по критерию близости оценки эксперта к средней оценке группы экспертов или по критерию качества тестовых задач, тождественных реальным).

Число свойств, которым эксперт должен приписать определенный «вес», как показывают исследования, не должно превышать семи. В противном случае вероятность назначения свойствам ошибочных весов возрастает.

Степень надежности (объективности) оценок экспертов зависит от того, насколько правильно сформулированы вопросы. Разработка методологии и схемы опроса — процедура эв-

ристическая. Они в значительной мере определяют эффективность эксперимента. Имеется ряд методов проведения опроса. Их описания и теоретические обоснования приведены в [1]. В основу всех методов заложена система непротиворечивых правил: 1) сумма весов взаимоисключающих событий должна быть равна единице; 2) вес любого события должен лежать между нулем и единицей; 3) если два или более взаимоисключающих событий можно объединить в одно, то его вес должен равняться сумме весов событий, его составляющих.

Существующие оценки «веса» экспертов в зависимости ранга (должности, категории, ученой степени) лежат в пределах от 1 до 12.

При различных (часто используемых) формах представления КП У оценки качества используются следующие формулы для определения коэффициентов веса α_i ($i=1, 2, \dots, p$):

а) среднее арифметическое значение

$$\text{при } U = \sum_{i=1}^p \alpha_i W_i$$

$$\alpha_i \approx \frac{1 / (\bar{W}_i - W_i^*)}{\sum_{i=1}^p 1 / (\bar{W}_i - W_i^*)};$$

б) среднее арифметическое значение

$$\text{при } U = \sum_{i=1}^p \alpha_i / W_i$$

$$\alpha_i \approx \frac{\bar{W}_i W_i^* / (\bar{W}_i - W_i^*)}{\sum_{i=1}^p \bar{W}_i W_i^* / (\bar{W}_i - W_i^*)};$$

в) среднее геометрическое значение

$$\text{при } U = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^p \alpha_i W_i^2}$$

$$\alpha_i \approx \frac{1 / (\bar{W}_i^2 - W_i^{*2})}{\sum_{i=1}^p 1 / (\bar{W}_i^2 - W_i^{*2})};$$

г) среднее геометрическое значение

$$\text{при } U = m \sqrt[p]{\sum_{i=1}^p \alpha_i W_i^m}$$

$$\alpha_i \approx \frac{1 / (\bar{W}_i^m - W_i^{*m})}{\sum_{i=1}^p 1 / (\bar{W}_i^m - W_i^{*m})};$$

д) среднее показательное значение

$$\text{при } U = \prod_{i=1}^p W_i^{\alpha_i}$$

$$\alpha_i \approx \frac{\log(\bar{W}_i / W_i^*)}{\sum_{i=1}^p \log(\bar{W}_i / W_i^*)};$$

где \bar{W}_i — среднее (номинальное, удовлетворяющее требованиям НТД) значение i -го показателя качества; W_i^* — предельно допустимое значение i -го показателя качества. Для продукции, удовлетворяющей заданным требованиям, должно выполняться условие $\bar{W}_i \geq W_i^*$ ($i=1, 2, \dots, p$).

Каждый вариант конструкции РЭА может быть охарактеризован многими ПК, так как он обладает многими свойствами. В практике оценки качества конструктивных вариантов установлено, что нет необходимости в рассмотрении всех этих свойств: требуется выбрать важнейшие при решении данной задачи. Одним из методов выбора этих показателей является метод априорного ранжирования, подробно рассмотренный в [2]. Его достоинством является возможность установления иерархии рассматриваемых показателей, что существенно облегчает присвоение коэффициентов весомости основным показателям при оценке качества продукции.

12.2. МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ

РЭА может оцениваться тремя взаимосвязанными группами показателей качества. К ним относятся: схмотехнические, конструкторско-технологические и экономические оценки разработки, серийного производства и эксплуатации.

В группу схмотехнических показателей целесообразно включить: технические параметры назначения (дальность и точность действия, степень автоматизации обработки ин-

формации, число каналов, объективность классификации, помехоустойчивость, чувствительность, потребляемая мощность, частотные характеристики, быстрдействие и т. д.);

эффективность применяемой элементной базы, оцениваемой обобщенным коэффициентом применимости элементов (разнородных по поколениям ЭРЭ, модулей, микромодулей, микросхем, корпусных и бескорпусных МС, микропроцессорных наборов, оптоэлектронных устройств, акусто- и магнитоэлектронных, криогенных и голографических устройств) и их параметрическими весами [1];

эффективность и качество схмотехнических решений, оцениваемых универсальностью, унифицированностью, базовостью логических и аналоговых решений, возможностью их использования в разнородных радиоэлектронных устройствах без перестройки (с минимальной перекоммутацией входов и выходов ячейки), применением универсальных многофункциональных модулей и т. п.;

помехоустойчивость функциональных узлов и ЭРЭ; быстрдействие логических элементов и узлов;

модернизационную способность базовых схмотехнических решений; автоматизацию процессов управления и диагностики, встроенного контроля и устранения неисправностей; высокую преемственность схмотехнических решений и согласованность входных и выходных параметров в комплексе разнородной РЭА, располагаемой на одном носителе и т. п.

В группу конструкторско-технологических показателей входят:

соответствие И заданным условиям эксплуатации;

обеспечение заданных тепловых режимов при различных видах естественного и принудительного охлаждения;

показатель комплексной миниатюризации;

массо-объемная, энергетическая, экономическая, временная миниатюризация;

ремонтпригодность ячеек, блоков, приборных шкафов;

стандартизация и унификация конструктивных решений ячеек, блоков, приборных шкафов, видов внутри- и межблочных электрических соединений;

технологичность (серийнопригод-

ность) ячеек, блоков и приборных шкафов, методов изготовления печатного и объемного монтажа, несущих конструкций, методов герметизации и влагозащиты;

коэффициент использования объема;

коэффициент заполнения блоков, приборных шкафов;

коэффициент металло- и материалоемкости ячеек, блоков, приборных шкафов;

коэффициент использования технологических процессов;

коэффициент прогрессивных средств формообразования;

коэффициент класса точности и чистоты обработки;

инженерно-психологические и эстетические характеристики разработки;

характеристики патентной чистоты; обеспечение опережающей разработки нормативно-технической документации.

Сущность экономических показателей пояснений не требует. Важно, чтобы относительные одиночные показатели входили в единую систему схмотехнических и конструкторско-технологических показателей единого образца.

С точки зрения количественной оценки П качества разделяются на поддающиеся аналитическому расчету и оцениваемые экспертным путем.

Если уровень сравниваемых величин находится в значительном разбросе значений, отличающихся порядками, то целесообразно использовать логарифмическую систему:

$$U_i = 10 \lg \frac{W_{li}}{W_{li}^{(0)}}, \quad \text{где } W_{li} - i\text{-й}$$

показатель КИ.

Для сравнения И или вариантов решений А и В по l_i П можно воспользоваться выражением $\Delta U_i = U_{iA} - U_{iB}$.

Значение ΔU_i может быть записано в логарифмической форме, тогда

$$\Delta U'_i = 10 \lg \frac{U_{iA}}{U_{iB}}.$$

Такое выражение позволяет установить, что по l_i показателю решение, принятое в отношении изделия А, лучше, чем по изделию В на ΔU_i децибелов.

Процесс определения показателя КИ (варианта решения) требует про-

ведения предварительных мероприятий, включающих: анализ оцениваемого изделия; выбор эталона изделия (решения, свойства); выбор из большого числа свойств, характеризующих И, необходимое и достаточное количество основных (базовых) свойств; объединение простых (дифференциальных) свойств в группы, характеризующие количественными оценками; определение системы предпочтения выбранных свойств; определение структурного состава обобщенного П качества и установление наиболее предпочтительной системы обобщения и объединения показателей групп свойств И; выявление частных показателей, которые должны быть улучшены.

При проведении экспресс-оценки используются ранее выявленные соотношения влияния основных факторов на качество конструкции в некотором приближении, без расчета составляющих К. За основу берется балльная система оценок влияния основных факторов по заранее составленным оценочным таблицам.

Процесс экспресс-оценки КИ (варианта решения) включает проведение исследований в следующей последовательности.

1. Разрабатываются оценочные таблицы для И или варианта конструктивного решения.

2. Участникам экспертизы раздаются оценочные таблицы, которые заполняются каждым экспертом независимо друг от друга.

3. Каждый эксперт зачитывает количественные оценки с кратким обоснованием (без их обсуждения и полемических споров).

4. После выступления всех экспертов и корректировки (по необходимости) оценок каждым экспертом (или проведения вторичной экспертизы) производится сбор таблиц и их последующая обработка.

В соответствии с ТЗ на разработку образца РЭА или варианта конструкторского решения различают: принципиально новую разработку ($K_1=1,2$); новую разработку с использованием большого числа известных решений ($K_2=1$) и модернизацию существующей разработки ($K_3=0,8$), что учитывается КП.

Если в процессе анализа или оценки качества И (варианта решения) будет установлено отсутствие соответствия хотя бы одному из требова-

ний ТЗ, дальнейшее его рассмотрение по оценке качества не проводится.

Обобщенный П качества в оценке U_j -го эксперта определяется по основному виду КП:

$$U_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} W_{ij}$$

Значение обобщенного П с учетом оценок всех экспертов

$$U = \frac{\sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} W_{ij}}{r}$$

где r — число экспертов; n — число показателей.

Для оценки обобщенного П используются оценочные баллы, из которых неприемлемыми и едва приемлемыми являются 0 и 2 (нормированные значения 0 ... 0,4 и 0,4 ... 0,6). Удовлетворительными и более высокими уровнями являются: 3; 3,5; 4; 4,5; 5 (нормированные значения которых 0,6 ... 0,7; 0,7 ... 0,8; 0,8 ... 0,9; 0,9 ... 0,95; 0,95 ... 1).

Пример экспресс-оценки. Рассмотрим три функциональных унифицированных блока, выполненных на однородной элементной базе, но с различными конструкциями и типоразмерами ПП, прошедших испытания на надежность с приблизительно равными показателями. Другие характеристики блоков приводятся ниже.

Блок № 1 разъемной конструкции скомпонован из набора ячеек, состоящих из двух печатных плат с ИС-2 в корпусах 401.14—1 и навесных ЭРЭ. Верхняя и нижняя стенки блока крепятся к передней и задней панелям, образуя замкнутую жесткую металлическую конструкцию. На верхнюю и нижнюю стенки установлены направляющие из пресс-материала для крепления ячеек в блоке. Электрический монтаж ячейки осуществлен соединителями ГРПМ1 и объединительной ПП. Монтаж в ячейке осуществлен через нижний ряд контактов разъема ГРПМ1 с помощью контактных лепестков и объемных переключек. Обе ПП расположены параллельно друг другу с односторонним расположением корпусов ИС.

Блок № 2 разъемной конструкции состоит из набора одноплатных и

двухплатных ячеек, каждая из которых представляет совокупность многослойной ПП, корпусов микросхем второй степени интеграции типа 401.14—1 и навесных ЭРЭ, установленных с двух сторон ПП. На вертикальных гранях платы с одной стороны крепится вилка соединителя типа РППМ26, а с другой — планка для крепления ячейки в блоке. Ячейки в блоке установлены по направлению параллельно лицевой панели. Электрическое соединение между ячейками в блоке выполнено разъемами типа РППМ26 и объединительной ПП.

Блок № 3 разъемной конструкции состоит из набора ячеек, состоящих из литой металлической рамы, на ко-

торой пустотелыми заклепками крепится ПП с микросхемами ИС-2 в корпусах типа 201.14—1, навесными ЭРЭ и вилкой соединителя типа ГРПМ1. Ячейки установлены в блоке параллельно передней панели. Верхняя и нижняя стенки блока крепятся к передней и задней панелям, образуя замкнутую жесткую металлическую конструкцию. В блоке имеются боковые съемные крышки. Электрический монтаж между ячейками осуществлен соединителями типа ГРПМ1 и монтажными проводами (возможно использование соединителей типа печать — печать и объединительной ПП).

Методология оценки качества предполагает следующую процедуру: со-

Таблица 12.1

Характеристика трех функциональных блоков РЭА

№ п/п	Конструктивные характеристики (параметры)	Блок № 1	Блок № 2	Блок № 3
1	Коэффициент функциональной сложности	0,95	1,0	0,90
2	Тип корпуса микросхемы второй степени интеграции	401.14-1	401.14-1	201.14-1
3	Габаритные размеры блока, мм	338×200×145	454×210×144	320×194×194
4	Объем корпуса блока, см ³	9800	13 700	11 760
5	Число корпусов микросхем	3276	2160	864
6	Число дискретных ЭРЭ	440	646	220
7	Плотность компоновки микросхем и ЭРЭ, эл/см ³	0,33	0,16	0,08
8	Масса, кг	6,8	8,0	6,9
9	Энергопотребление, Вт	100	65	30
10	Коэффициент использования объема	0,74	0,62	0,31
11	Коэффициент заполнения	0,26	0,20	0,17
12	Относительная стоимость	0,64	1,0	0,8
13	Показатель надежности (наработка на отказ, ч)	1550	1250	1100
14	Показатель относительной технологичности	0,96	0,90	0,87
15	Типоразмер ПП ячейки, мм	170×110×1,5	170×90×1,5	170×170×1,5
16	Число ячеек	26	30	18

ставляется сводная табл. 12.1, выполняется анализ включенных в нее характеристик блоков и осуществляются последовательные преобразования, в результате которых получают данные, необходимые для расчета.

Из анализа следует, что характеристики № 2 — № 8 учитываются характеристиками № 12 — № 14 и не обладают общностью и достаточными параметрическими весами; характеристики № 10, 11, 15 и 16 могут служить составными частями других оценочных параметров в случае близких значений интегрального критерия качества конструкторской проработки (оставляются в качестве резервных характеристик). Поэтому основными для интегральной оценки качества станут параметры, представленные в табл. 12.2.

Из-за параметрической функциональной неоднородности блоков и необходимости приведения параметров к правомерно-равному виду составлена табл. 12.3 с приведенными количественными значениями параметров уже функционально однородных

блоков. Методически процесс выравнивания осуществляется следующим образом. Каждое значение параметра блока, имеющего коэффициент функциональной сложности $K_{фс} \neq 1$, делится на значение $K_{фс}$, характеризующее данный блок. Например, для первого блока приведенная масса будет $6,8:0,95=7,15$ кг; для второго блока $8:1=8$ кг; для третьего блока $6,9:0,9=7,66$ кг и т. д.

Все сравнимые значения параметров приводятся к безразмерным величинам так, чтобы они имели одинаковую направленность влияния на П качества И. Например, с уменьшением значений выбранных характеристик для сравнения качество И должно повышаться. П, не удовлетворяющие этому условию, пересчитываются: $\bar{W}_i=1/W_i$, нормирование параметров выполняется по формулам $\bar{W}_i=W_i/W_{i\max}$ и $\bar{W}_i=1-W_i/W_{i\max}$ и сводятся в табл. 12.4.

В соответствии с методологией определения КИ, изложенной выше, для всех значений параметров определяем весовые коэффициенты, с учетом

Таблица 12.2

Основные параметры трех функциональных блоков

Параметры блоков	Коэффициент функциональной сложности	Объем, см ³	Масса, кг	Энергопотребление, Вт	Относительная стоимость	Показатель надежности (наработка на отказ, ч)	Показатель относительной технологичности	Плотность компоновки микросхем и ЭРЭ, эл/см ²
Блок № 1	0,95	9800	6,8	100	0,64	1550	0,96	0,33
Блок № 2	1,0	13 700	8,0	65	1,0	1250	0,90	0,16
Блок № 3	0,90	11 760	6,9	30	0,8	1100	0,87	0,08

Таблица 12.3

Приведенные параметры трех функциональных блоков

Параметры блоков	Коэффициент функциональной сложности	Объем, см ³	Масса, кг	Энергопотребление, Вт	Относительная стоимость	Показатель надежности, ч	Показатель относительной технологичности	Плотность компоновки микросхем и ЭРЭ, эл/см ²
Блок № 1	1,0	10 315	7,15	105,3	0,67	1631	1,0	0,35
Блок № 2	1,0	13 700	8,0	65	1,0	1250	0,9	0,16
Блок № 3	1,0	13 066	7,67	33,3	0,89	1222	0,97	0,09

Нормированные параметры трех функциональных блоков

Нормированные параметры блоков	Объем	Масса	Энергопотребление	Стоимость	Показатель надежности	Показатель технологичности	Плотность компоновки микросхем и ЭРЭ
Блок № 1	0,75	0,89	1,0	0,67	0	1	0
Блок № 2	1,0	1,0	0,62	1,0	0,23	0,90	0,54
Блок № 3	0,95	0,97	0,32	0,89	0,25	0,96	0,74

меры их важности для объекта установки И или целевого предназначения (например, самолеты ближнего, среднего или дальнего действия; суда морского флота малого, среднего или большого водоизмещения и т. п.).

Для экспресс-оценки наиболее эффективен и рационален метод установления весовых значений парамет-

ров экспертами. Иногда весовые значения задаются в ТЗ на разработку И. В любом случае сумма всех весовых значений должна быть равна единице, а каждое из них не должно существенно отличаться от другого.

Определение весовых значений параметров табл. 12.4 35 специалистами дало значения, представленные в табл. 12.5. После анализа и корректировки, исходя из общего требования методологии оценки КИ, можно исключить «П технологичности» и «плотность компоновки корпусов ИС и ЭРЭ». Тогда значения весовых коэффициентов сокращенного числа характеристик должны быть пересчитаны и сведены в табл. 12.6. Для сокращенного числа нормированных параметров пересчет весовых значений осуществляем, составляя уравнение для оставшихся (например, для судов большого водоизмещения вида $0,19x+0,1x+0,11x+0,15x+0,30x=1$, тогда $x=1,18$ и весовые коэффициенты будут 0,22; 0,12; 0,13; 0,17; 0,36).

Обобщенные показатели качества конструктивной проработки трех блоков рассчитываем по средневзвешенному арифметическому значению

$$V_i = \sum_{l=1}^p \alpha_l \bar{W}_l,$$

где l — параметрический номер от 1 до p ; α_l — весовое значение характеристики; \bar{W}_l — нормированное значение характеристики, $i=1, 2, 3$ — номера блоков и сводим в табл. 12.7.

Оценка и анализ полученных по-

Таблица 12.5
Значения весовых коэффициентов нормированных параметров функциональных блоков

Нормированные параметры блока	Морские суда		
	большого водоизмещения	малого водоизмещения	среднего водоизмещения
Объем	0,19	0,26	0,21
Масса	0,10	0,16	0,10
Энергопотребление	0,11	0,12	0,11
Стоимость	0,15	0,07	0,13
Показатель надежности	0,30	0,24	0,29
Показатель технологичности	0,10	0,07	0,095
Плотность компоновки микросхем и ЭРЭ в блоке	0,05	0,08	0,065

Таблица 12.6

Значения «весовых коэффициентов» сокращенного числа нормированных параметров функциональных блоков

Нормированные параметры	Морские суда большого водоизмещения	Морские суда малого водоизмещения	Морские суда среднего водоизмещения
Объем	0,22	0,31	0,25
Масса	0,12	0,19	0,12
Энергопотребление	0,13	0,14	0,13
Стоимость	0,17	0,08	0,15
Показатель надежности	0,36	0,26	0,35

Таблица 12.7

Показатели качества конструкторской проработки трех функциональных блоков

Объект установок блоков	Блок № 1	Блок № 2	Блок № 3
Морские суда большого водоизмещения	0,521	0,714	0,622
Морские суда малого водоизмещения	0,592	0,740	0,650
Морские суда среднего водоизмещения	0,526	0,717	0,629

казателей производится исходя из заданного в методике принципа: «чем значение показателя V_i меньше, тем качество конструкторской проработки блока лучше».

В методологическом плане значения интегральных критериев качества получены и их сравнение позволяет установить оптимальный вариант функционального блока. Однако в практике конструирования часто встречаются случаи, когда оценка качества конструкторской проработки в силу субъективных причин и установившихся традиций в отрасли в области конструирования РЭА по изложенной методике не дает чет-

кого ответа о приоритете одного из вариантов конкурирующих И из-за близости значений обобщенных показателей. В таких конкретных случаях целесообразно произвести дополнительную оценку по частным показателям (например, по уровню комплексной миниатюризации).

Оценка уровня миниатюризации РЭА производится как на этапе его проектирования, так и в серийном производстве и может служить основой для сравнения ряда одиотипных образцов (однородных по функциональному назначению) с целью установления показателей качества каждого из них и выбора наилучшего по критерию миниатюризации. В основу оценки уровня миниатюризации И положены частные критерии, учитывающие степень совершенства конструкторско-технологической и схемотехнической проработки, внедрение прогрессивной элементной базы с учетом эффективности, оцениваемой снижением массогабаритных и энергетических показателей и увеличением ресурса безотказной работы функциональных устройств.

Показателем качества схемотехнической проработки образца в методике принят коэффициент применяемости $K_{пр}$ наборов дискретных ЭРЭ, модулей плоской конструкции, этажерочных и плоских микромодулей, микросхем различных уровней интеграции, корпусных и бескорпусных цифровых и аналоговых МС, микропроцессорных наборов, оптоэлектронных элементов и др.

$K_{пр}$ характеризует насыщенность РЭА элементами радио- и микроэлектроники и показывает, насколько разработчику удалось привести в соответствие функциональную схему устройства с современными возможностями микроэлектроники.

Показателем качества конструкторской проработки образца в методике принят коэффициент заполнения объема функционального устройства (блока) $K_{з.о.}$, характеризующий потери эффективности использования объема при объединении разнородных функциональных узлов в конструктивно-законченные устройства (ячейки, модули, блоки, приборные шкафы). В процессе объединения ФУ объективно увеличиваются масса и габариты конструкций за счет существенного различия их объемно-массовых, энергетических и надежно-

стных показателей и методов их компоновки.

Наряду с этим существенно влияют и субъективные факторы, такие, как опыт конструктора, тщательность проработки геометрии расположения и компоновки с учетом тепловых режимов и требований по допустимым уровням емкостных и индуктивных паразитных связей, выбор оптимального ТЭЗ и другие конструкторские факторы.

Оценка объективных факторов, влияющих на уровень миниатюризации, возможна за счет введения дополнительного критерия, определяющего качество поколений элементной базы при разработке образца РЭА.

Коэффициент качества \mathcal{E}_k различных поколений функциональных узлов (эффективность, как прирост качества при сравнении поколений) определяется методом экспертных оценок или путем логического сравнения типовых параметров (функциональная сложность, энергопотребление, надежность, стоимость и др.).

В частности, методами логического сравнения и ряда экспертных оценок получены средние значения показателей \mathcal{E}_k для наборов ЭРЭ и ФУ различных поколений:

дискретные наборы ЭРЭ	0,1
унифицированные модули плоской конструкции	0,2
унифицированные этажерочные микромодули	0,3
гибридные ИС-1 и ИС-2	0,4
однокристалльные ИС-1 и ИС-2	0,45
аналоговые корпусные МС	0,65
логические корпусные МС	0,80
аналоговые бескорпусные МС	0,75
логические бескорпусные МС	0,90
монокристалльные ИС-3	0,65
монокристалльные ИС-4 (большие ИС)	1,0

Обобщенный (интегральный) показатель уровня миниатюризации РЭА

$$K_M = K_{з.о.} \sum_{k=1}^n K_{прk} \mathcal{E}_k,$$

где k — номер поколения функционального узла; $K_{з.о.}$, $K_{прk}$ — имеют численные значения в диапазоне от 0 до 1.

Пример. Произвести оценку качества конструкторской проработки трех блоков (по данным табл. 12.1) по критерию миниатюризации.

1. Рассчитываем коэффициент заполнения блока

$$K_{з.о.} = \frac{1}{V_{бл}} (\sum V_{МСx} + \sum V_{соед} + \sum V_{ПП} + \sum V_{пр}),$$

где $V_{МСx}$ — объем корпуса микросхемы ИС-2, м³; $V_{соед}$ — объем корпусов вилки и розетки соединителя, м³; $V_{ПП}$ — объем ПП, м³; $V_{пр}$ — объем внутриблочного проводникового монтажа, м³; $V_{бл}$ — объем корпуса блока, м³.

По справочникам определяем:
 $V_{МСx} = l_{ох} l_{ов} l_{оз} = 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 6,5 \times 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = 14 \cdot 10^{-8}$ м³;
 $V_{соед} = l_{рх} l_{рy} l_{рz} = 2 \cdot 16,5 \cdot 10^{-3} \times 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,153 = 6 \cdot 10^{-8}$ м³;
 $V_{ПП} = l_{дх} l_{дy} \sigma_{п} = 0,175 \cdot 0,110 \times 1,5 \cdot 10^{-3} = 30 \cdot 10^{-6}$ м³;
 $V_{бл1} = L_{кx} L_{кy} L_{кz} = 0,338 \cdot 0,2 \times 0,145 = 98 \cdot 10^{-4}$ м³ (для блоков №№ 2 и 3 соответственно 137 · 10⁴ и 117,6 · 10⁴ м³);
 $V_{пр} = (0,05 - 0,1) V_{бл}$.

Подставляя все исходные данные (с учетом числа корпусов ИС-2, соединителей и ПП в блоке) в формулу для определения значений $K_{з.о.}$, получаем соответственно: $K_{з.о1} = 0,26$; $K_{з.о2} = 0,20$ и $K_{з.о3} = 0,17$.

2. Определяем значения коэффициентов применяемости ИС-2 и навесных ЭРЭ в блоках

$$K_{пр ИС} = \frac{N_{МСx}}{N_{МСx} + N_{ЭРЭ}};$$

$$K_{пр ЭРЭ} = \frac{N_{ЭРЭ}}{N_{ИС} + N_{ЭРЭ}};$$

из табл. 12.1: — число микросхем в блоках: $N_{МСx1} = 3276$; $N_{МСx2} = 864$ и $N_{МСx3} = 2160$; число ЭРЭ в блоках $N_{ЭРЭ1} = 440$; $N_{ЭРЭ2} = 220$ и $N_{ЭРЭ3} = 646$. Тогда

для блока № 1 $K_{пр МСx} = 0,881$,
 $K_{пр ЭРЭ} = 0,119$;

для блока № 2 $K_{пр МСx} = 0,766$,
 $K_{пр ЭРЭ} = 0,234$;

для блока № 3 $K_{пр МСx} = 0,797$,
 $K_{пр ЭРЭ} = 0,203$.

3. Выбираем коэффициенты эффективности поколений элементной базы: для микросхем $\mathcal{E}_{МСx} = 0,45$; для навесных дискретных ЭРЭ $\mathcal{E}_{ЭРЭ} = 0,10$.

4. Определяем качество конструктивной проработки блоков по критерию миниатюризации

$$K_{\mu i} = K_{с.б} \sum_{k=1}^n K_{пр МСХ i} \mathcal{E}_{ИС i} + K_{пр ЭРЭ i} \mathcal{E}_{ЭРЭ i}$$

Численные значения критериев миниатюризации:

для блока № 1 $K_1 = 0,26 (0,881 \times 0,45 + 0,119 \cdot 0,10) = 0,106$;

для блока № 2 $K_2 = 0,20 (0,766 \times 0,45 + 0,234 \cdot 0,10) = 0,074$;

для блока № 3 $K_3 = 0,17 (0,797 \times 0,45 + 0,203 \cdot 0,10) = 0,064$.

Исходя из заложенного в методологию основного принципа, что большему значению K соответствует лучшее качество конструкторской разработки изделия, можно сделать вывод о том, что блок № 1 имеет значительное превышение качества и получает первое конкурсное место. Приведа показатель качества $K_1 = 100\%$, последовательно вычислим значения $K_3 = 60\%$ и $K_2 = 70\%$. В то же время блоки № 2 и № 3 имеют достаточно близкие значения, что говорит о наличии некоторых недоработок у каждого из них, но сущность их разного происхождения. Окончательное решение о работоспособности всех трех блоков проверяется по показателям теплового режима (в частности, по допустимому перегреву корпусов ИС и навесных ЭРЭ).

Показатели качества трех конкурирующих блоков, определенные по двум методикам, имеют хорошее совпадение для блока № 1, получающего первое место, и некоторое расхождение в оценках для блоков № 2 и № 3. Очевидно, целесообразно второе конкурсное место предоставить блоку № 2, имеющему лучший показатель $K_{с.б}$, т. е. лучшую конструкторскую проработку.

При определении показателей K для отдельных устройств или законченных приборов можно побочно установить дополнительный и иногда весьма существенный качественный фактор — соответствие разработки достигнутому мировому, национальному, отраслевому или любому другому уровню развития РЭА.

С этой целью необходимо по-

строить график эффективности $\mathcal{E} = f(t)$, где t — годы развития и внедрения поколений РЭА, разработанной на основе различных поколений элементной базы.

Учитывая параметрический вес ЭРЭ, различных ФУ, микросхем, МС и БИС, можно для каждого поколения элементной базы построить кривую развития по годам.

Для логических бескорпусных МС

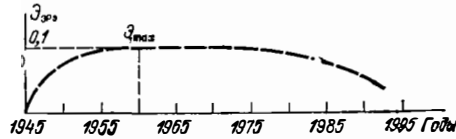


Рис. 12.1. Применение дискретных ЭРЭ в РЭА

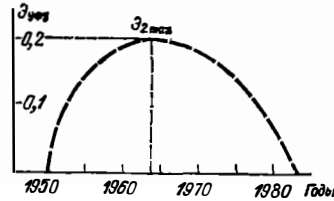


Рис. 12.2. Применение унифицированных функциональных узлов в РЭА

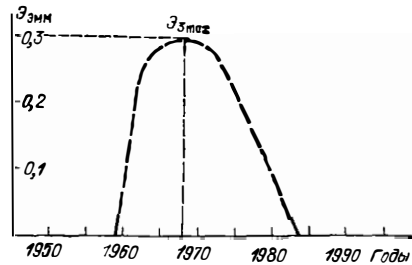


Рис. 12.3. Применение унифицированных микромодулей этажерочной конструкции (ЭММ) в РЭА

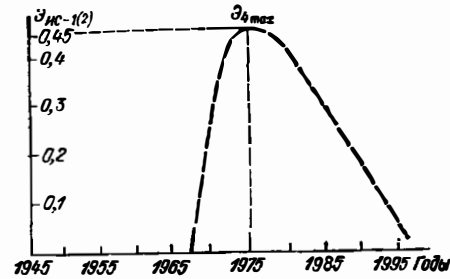


Рис. 12.4. Применение ИС1—ИС2 в РЭА

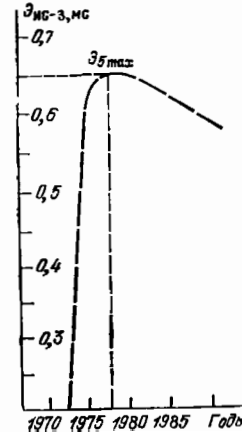


Рис. 12.5. Применение ИС3 и аналоговых корпусных микросборок в РЭА

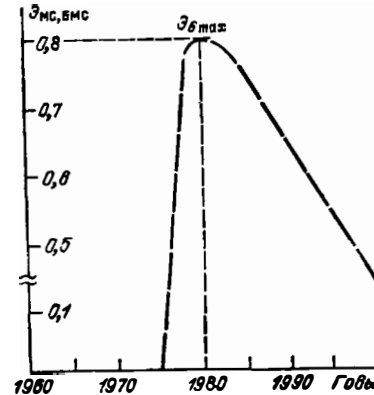


Рис. 12.6. Применение логических корпусных и аналоговых бескорпусных микросборок в РЭА

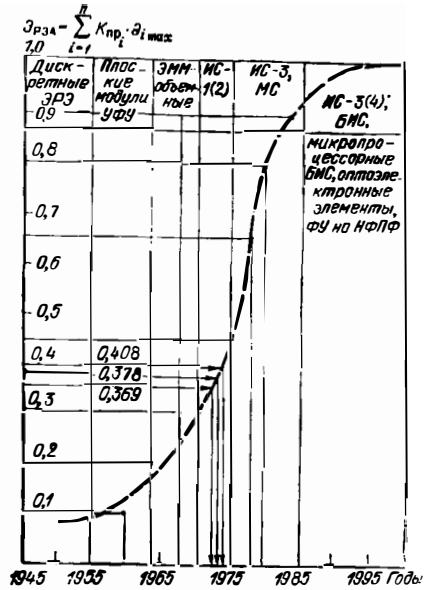


Рис. 12.7. Эффективность применения различной элементной базы в РЭА

и монокристалльных ИС-4 (микропроцессорных наборов) рисунка с кривой развития приводить нет смысла, так как начало развития этого поколения элементов относится к 1977 г. и ему присваивается параметрический вес на уровне 1985 г. $\mathcal{E}_{max} = 0,9 \dots 1,0$.

Если последовательно наложить все точки развития поколений элементов по годам, то при соединении значений точек \mathcal{E}_{max} и при условии, что $K_{пр}$ во всех случаях равны единице, можно получить обобщенную кривую эффективности, выражающую аналитически следующую зависимость $\mathcal{E}_{РЭА max} =$

$$\mathcal{E}_{РЭА max} = \sum_{k=1}^p K_{пр k} \mathcal{E}_i max$$

Данная кривая, представленная на рис. 12.7, и является кривой максимальных значений достигнутого уровня развития РЭА. Значения $\mathcal{E}_{РЭА max}$ рассчитывать нет необходимости, так как они были получены ранее при подсчете коэффициентов миниатюризации блоков № 1—

№ 3 по формуле $K_{\mu i} = K_{с.б} \sum_{k=1}^p K_{пр k} \mathcal{E}_i$

и имели значения: для блока № 1 $\mathcal{E}_1=0,408$; для блока № 2 $\mathcal{E}_2=0,369$; для блока № 3 $\mathcal{E}_3=0,378$.

Для определения соответствия рассмотренных выше трех вариантов функциональных блоков достигнутому максимальному уровню (в данном случае национальному) достаточно отложить на графике рис. 12.7 значения \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_3 и по кривой эффективности установить годы, соответствующие развитию РЭА: блок № 1 соответствует 1973 г.; блок № 2 соответствует 1971 г.; блок № 3 соответствует 1972 г. Более подробные сведения по вопросам, изложенным выше, приведены в [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Верхопятинский П. Д., Латинский В. С.** Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Судостроение, 1983.

2. **Верхопятинский П. Д., Латинский В. С., Хаинин П. К.** Эффективность миниатюризации судовой радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Судостроение, 1975.

3. **Вентцель Е. С.** Исследование операций. — М.: Сов. радио, 1972.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Антенны вибраторные 259...262
— зеркальные 266, 267
— параболические 267, 268
— поверхностных волн 263, 264
— рупорные 265, 266
— спиральные 264
— щелевые 262, 263
Аппаратура магнитной записи 301, 319
Арматура неразъемная 292
— разъемная 292, 294
— соединительная 269, 292, 293
Аттенюаторы диссипативные 242
— СВЧ 241

Б

Бак компенсационный 269, 286
Безотказность 343, 346

В

Валы, классификация 91, 92
Вентили 291
— ферритовые 242
— на смещении поля 246
— резонансные 242
— на коаксиальном волноводе 245, 246
— на полосковом волноводе 246
— на прямоугольном волноводе 242...245
Вентилятор 269, 271
— выбор 274, 275
— осевой 269, 273, 274
— радиальный 269, 272, 273
— шум 275
Волноводы высокочастотные полосковые 173, 200
— гребневые 185
— изгибы 233
— коаксиальные 215
— изгибы 215, 223
— разветвления 225
— круглые 189, 192...194
— микрополосковые 173, 196
— связанные 173, 196, 198
— неразъемные 216
— переходы 226
— полосковые 173, 195...200
— высокочастотные 173, 200
— изгибы 234, 235
— копланарные связанные 173
— несимметричные 173, 195, 196
— связанные 173, 234, 235

— разветвления 234, 235
— связанные 173, 196
— симметричные 173, 197, 198
— связанные 173, 195, 196, 200
— экранированные 200
— щелевые 173, 195
— связанные 173, 195
— экранированные 173, 200
— полые металлические 184
— преобразователи типов волн 226
— прямоугольные 184, 185...187
— разветвления 225
— разъемные 216
— фланцевые контактные 217
— дроссельные 217
— скрутки 223
— соединения 216
— элементы опорные и согласующие 233...235
— эллипсные 192
Волна (-ы) высшего типа 177
— гибридная 176
— дециметровые 173
— дециметровые 175
— критическая длина 176
— магнитная 176
— метровые 173
— основная 177
— поперечная 176
— сантиметровые 173
— субмиллиметровые 173

Г

Громкоговорители 309
— абонентские 301, 309
— динамические рупорные 309, 310
Головки громкоговорителей 301, 303, 309
— основные параметры 310
— звукоснимателей 301, 314, 315
— иглы 315, 316
— тонары 301, 316, 317
— магнитные 301, 302, 321, 329
— основные параметры 322, 323

Д

Делитель мощности 173, 216
Диаграмма направленности 173, 259...264
Документация эксплуатационная 343

З

Зазор боковой 75

И

Изгибы волноводов 215, 223, 224
— — — полосковых 234
Изделие 340, 363
Излучатели полосковые 241
Изоляторы металлческие 211, 212
Источник питания 123

К

Кабели радиочастотные 179...183
Каркас силовой 158
Качество изделия 360, 364
— комплексный показатель 361, 362
— показатель 360, 361
Клапаны разъема 294
Краны 291
Колесо зубчатое 77, 78, 80
— червячное 75, 81
Компоновка волноводных трактов 232, 233
— плотность 17
Конструирование узлов на микросхемах 10
Конструкция наружная 158
Корпуса микросхем 10, 12...14
Коэффициент (-ы) аэродинамический 159, 160, 162, 164, 168
— — — типичных наружных конструкций 161, 164, 165
— — — антенных систем 165, 166, 168
— весовой 363
— бегущей волны 173, 177
— — — статистический 177
— отражения по напряжению (току) 177
— передача тракта 177
— стоячей волны 177
— температурный лнейного расширения 175
— усиления 173
КПД передач механических 55, 56
— муфт механических 55, 57, 58

Л

Ларингофоны 301, 309
Лента магнитная 75, 318
Лентопротяжный механизм 75, 201, 325
Линии передачи 173, 176
— — — коаксиальные 178
— — — однородные с потерями 209
— — — открытые 177
— — — температура шумовая 210
— — — характеристики электрические 176

М

Материалы диэлектрические 174

— элементов конструкции СВЧ 174
— радиопоглощающие 173
Мембраны 105, 106
Металлы для работы на СВЧ 174
Метод (-ы) 328, 360
— аналитического определения скоростей и ускорений 47
— вероятностный 363
— — — решения размерной цепи 67, 68
— геометрический 66, 67
— дифференциальный 65
— кинематических диаграмм 47, 48
— линейного программирования 330
— неопределенных множителей Лагранжа 330
— определения ошибок 65...67
— — — скоростей и ускорений 45...48
— оптимизации параметров 329
— планирования эксперимента 331, 332
— планов 45, 46
— преобразованного механизма 65, 66
— решения размерной цепи 67, 68
— статистических испытаний 330
— стоимостной 363
— элечисленного программирования 333
— штрафных функций 332
— эвристический 332
— экспертных оценок 322, 363
Механизм (-ы) 75
— винтовой 75, 84, 85
— дистанционного управления 113
— дифференциальный 75, 82, 83
— классификация ошибок 61, 62
— кулачковый 75, 88, 89
— конструктивные схемы 88
— проектирование 89...91
— лентопротяжный 75, 118...123, 301, 325
— настройки 109
— — — общие сведения 109, 110
— — — плавные 112, 113
— — — электромеханические 109
— неравномерность хода 60, 61
— общие положения конструирования 75, 76
— определение ошибок 65...67
— планетарные 5, 75, 82
— прерывистого движения 91
— приводов антенн РЛС 118
— синхронно-следающих систем 116, 117
— уравнение движения 59
— фрикционный 75
Микрокорпус (-а) 21
— керамические 4
— матричные 43
— периферийные 43

Микросборка 4, 360
Микросхема (-ы) 4
— — — большой степени интеграции 4, 21
— — — гибридные интегральные
— — — малого уровня интеграции 4
— — — сверхбольшой степени интеграции 4
— — — среднего уровня интеграции 4
— — — современные с высокой плотностью упаковки 6
Микрофон (-ы) 301
— классификация 303, 307, 308
— параметры 304
— области применения 304...307
Модель математическая 328
Монтаж микросхем на МКП 42
Мосты кольцевые СВЧ 236
Муфта (-ы) 75
— назначение и классификация 96
— подвижные 96
— — — постоянные соединительные 96...98
— — — расширительные 96
— — — крестовые 96
— — — мембранные 98
— — — поводковые 96
— — — упругие 98
— — — цепные управляемые 98...101
— — — самоуправляющиеся 100
— — — зубчатые 98
— — — кулачковые 98
— — — фрикционные 98
— электромагнитные 123, 152
— — — гистерезисные 157
— — — зубчатые 153
— — — индукционные 154...157
— — — порошковые 123, 153, 154
— — — фрикционные 123, 153

Н

Нагрузки аэродинамические 159
— волноводные согласованные поглощающие 231
Надежность 15, 19, 343, 344...359
— компонентов РЭА 349
— — — в облегченных режимах 351...354
— — — план обеспечения 346
— — — структурная схема 347
— — — повышение схмотехническими приемами 354...356
— — — показатели 343, 344
— — — по результатам отработочных испытаний 356...359
— — — состав характеристических показателей 348
Направляющие вращения 92, 93...95
— общие сведения и классификация 91, 92
— прямолинейного движения 95
Насос (-ы) 269, 282

— выбор 284
— центробежные 282, 283
— — герметичные 282, 283
— — шестереночные 282, 283
Носители информации 301, 313, 317
— — — дисковые 301, 313, 314
— — — ленточные 318
— — — кассеты 319
— — — катушки 319, 320
— — — основные параметры 318, 320
— — — пленочные 301, 318
— — — проволочные 301, 317

О

Ограничители движения 101, 102
Опоры 91
Оптимизация 333
— габаритных размеров печатных плат 339, 340
— — — конструкции 333...336
— — — высокочастотных трансформаторов 335
— — — дросселей 335
— — — радиаторов для полупроводниковых приборов 341
— — — трансформаторов малой мощности 333, 335
— несущих конструкций 337
— параметров 329
Ось (-и) 75, 91, 92
Ослабление тракта 177
Основы модельного эксперимента 169
Ответвители направленные 173, 239, 240
— — — полосковые 239
— — — двухшлейфовые, расчет 240
— — — расчет 239
Отказ 343
— интенсивность 343, 345...352
Отложения гололедно-изморозевые 158
Ошибки выходные механизма 66
— законы распределения 62...64
— — — отсчетных устройств 108
— — — расчет 65...67

П

Передачи 45, 75, 81...86, 113...116
— винтовые 84, 85
— волновые 82
— — — зубчатые 75, 83, 84
— гибкой связью 86, 87
— — — дистанционные электромеханические 113...115
— — — потенциометрические 116
— — — сельсинные 115, 116
— — — с шаговым двигателем 115
— — — с электромагнитным искателем 115

— роликами 85, 86
— зубчатые 45, 75...77
— планетарные 82
— фнкционные 75, 85
— червячные 75, 81, 82
Переходы волноводные плавные 226
— — многоступенчатые коаксиально-волноводные 229
— — от прямоугольного волновода к круглому 228
— — четвертьволновые ступенчатые 227
— коаксиально-волноводные 173
— полосковые 235, 236
План обеспечения надежности 343
— скоростей 45, 46
— ускорений 45...47
Плата (-ы) 9
— керамические 21
— — многослойные, типы 4, 21, 39
— — с одновременным спеканием печатных слоев 39
— — с разделным спеканием печатных слоев 39
— — технические характеристики 41
— — технология изготовления 41
— — печатные 4, 21, 25, 328, 360
— — двусторонние 25
— — конструирование 23
— — материалы 23
— — методы изготовления 34
— — многослойные 22, 23, 27
— — односторонние 21
— — оригиналы и фотошаблоны 38
— — основные материалы 23
— — расчет электрических параметров 31
Площадка контактная 21
Поверхность отражающая 158
Погрешность кинематическая 45, 70
— — и свободный обратный ход 70
— — расчет 70, 71
— — отсчетных устройств 108
Подшипник 75
— качения 93...95
— скольжения 75, 92, 93
Показатель (-и) 360
— конструктивные 19
— конструкции абсолютные 18
— — удельные и относительные 18
— характеристические 343
Поле монтажное 328, 329
Предложение техническое 343
Прибор полупроводниковый 4, 15, 16
— — бескорпусной 4
Привод 75
— электромеханический 109, 110, 123
Приемник давления 304
Проект эскизный 343
Проводимость волновая 177
Проводники печатные 31, 32, 33, 34

— — допустимая токовая нагрузка 32
— — сопротивление 31
— — электрическая емкость 34
— — прочность изоляции 33
Продолжительность включения 123
Проницаемость диэлектрическая 174
Прочность электрическая волноводных устройств 256
— — СВЧ устройств 253, 254
Пружины 75
— биметаллические 105
— винтовые 104, 105
— конические 104
— прямые 104, 105

Р

Район гололедно-ветровой 158
Разветвления волноводов 225, 226
— — коаксиальных 215
— — полосковых 26
Размеры габаритные микросхем 6
Расчет (-ы) 31, 48, 58, 67, 258
— кинематической погрешности 70
— — и мертвого хода 70, 71
— — зубчатой пары и зубчатого механизма 70, 71
— кинестатический 48
— КПД передачи 56, 57
— механизмов, динамические 58
— однородных металлических экранов 58
— сил и моментов трения 50...53
— размерных цепей механизмов 67
— электрических параметров печатных плат 31...34
Рекомендации по конструированию гибридных микросхем и микросборок 15
— — — узлов РЭА на микросхемах 10
— — — с полупроводниковыми приборами 15
— — монтажу дискретных ЭРЭ 17
Ремонтпригодность 343
Рисунок проводящий 21, 25, 31, 33
Ролик 75

С

Сигнализатор 288
— давления 269, 289, 290
— потока воздуха 269, 279
— — жидкости 269, 280
— температуры 269, 288, 289
— уровня жидкости 219, 290
Сила (-ы) в кинематических парах 48
— намагничивающая 123
— трения 49...54
Система (-ы) автоматического регулирования 123

— — управления 123
— акустические 301, 311, 312
— — основные параметры 312
— антенная 158
— воздушного охлаждения 269, 271
— жидкостного охлаждения 269, 280, 281
— — — термостабилизированные 281, 282
— — — элементы 280
— колебательные СВЧ 250
— — — в виде короткозамкнутых отрезков линий с поперечной волной 250, 251
— — — в виде объемных резонаторов на отрезках прямоугольных и круглых волноводов 252
— — — в виде разомкнутых отрезков длинных линий 251
— — — в виде систем на полосковых волноводах 251, 252
— — — устройства связи и перестройки 252, 253
— координат, выбор 158, 159
— аэродинамические 158
— связанная 158, 159
— скоростная 158, 159
— обеспечения тепловых режимов 269, 270
— оптимальная 328
— показатель качества 328
Слой проводящий 21
Соединение (-я) 216, 217
— волноводов 217
— коаксиальных волноводов различных сечений 214, 215
— прямоугольных волноводов 216, 217, 219, 223
— полосковых волноводов 234
Соединители высокочастотные 213, 214
— радиочастотные 212, 213
Сопротивление (-я) 159, 173, 178, 269
— аэродинамическое 159, 269
— волново 177, 178
— гидравлическое 269
— температурный коэффициент 173
Сочленения вращающиеся 229, 230
— — с прямоугольными волноводами 230, 231
— коаксиальные 229, 230
Стопоры 102

Т

Телефоны головные 301, 312
— — динамические 312, 313
— — — стереофонические 313
— — изодинамические 313
— — ортодинамические 313
Теплообменники 269, 275, 276

— воздухо-воздушные 269, 276, 277
— воздухо-жидкостные 276, 277
— выбор 270, 26
— жидкостно-жидкостные 269, 277
Теплоносители 269, 270
— основные параметры 297
— уравнения теплофизических свойств 299, 300
Терморегуляторы 287
Термосфоны двухфазные 295, 296
Трансформаторы малой мощности 328
Трение в шарикоподшипниках 49
— качения 49, 93...95
— расчет сил и моментов 50, 51...57
— скольжения 49, 92
Труба аэродинамическая 158, 169, 170
— тепловая 269, 294, 296
Трубопровод 291
Точность зубчатых передач 69, 70
Типовой элемент замены ТЭЗ 360

У

Узел функциональный 360
Указатель давления 291
— температуры 290
Управление программное числовое 123
Уравнение равновесия 48
Условия технические 4
— эксплуатационные микросхем 10, 11
Установка антенная 158, 159, 170
Устройства отсчетные 75, 106...108
— — назначение и классификация 106
— — погрешность 107
— — расчет 106, 108
— соединительные 212, 213
— электроакустические, классификация 301
— электропроигрывающие 301, 322, 324
— — основные параметры 324
Учет механических деформаций 72...74

Ф

Фазовращатель 123
Фактор конструктивный 123
Фиксаторы 101
Фильтры воздушные 269, 278, 279
— — инерционные 279
— — поверхностные и объемные 269, 279
— жидкостные 269, 285, 286
— — глубинные и поверхностные 285
— регенерация фильтроэлементов 286
Функция желательности 332
— метода штрафов 332

Ц

- Центр тяжести 45
- Цепи размерные, расчет 67...69
- Циркуляторы полосковые У-типа 248, 249
 - симметричные У-типа на прямо-угольных волноводах 247
 - фазовые 250
 - ферритовые 247

Ч

- Частота критическая 176
- основной диапазон 177
- Червяк 75, 81, 82

Ш

- Шайбы диэлектрические 210, 211
- Шкала 75, 107, 108
 - децибел 210
 - грубого и точного отсчета 75, 108

Э

- Экран 257
 - расчет 258
- Экранирование полосковых волно-водов 173, 200
 - СВЧ устройств 257, 258
- Эксперимент модельный 169, 170
- Экспресс-оценка качества 364
 - — пример 366
- Экстремум, условия осуществления 320

- Электродвигатель (-и) 75, 123, 124... 129, 269, 325
 - выбор 138, 139
 - для лентопротяжного механизма 125, 326
 - — электроприводящего устрой-ства 125, 326, 327
 - переменного тока 129...131
 - — — с волновым ротором 133, 134
 - — — с катящимся ротором 132, 133
 - — — синхронные 131, 132
 - — — шаговые 134...137
 - — — — индукционные 135
 - — — — реактивные 135
 - — — — с постоянными магнитами 134
 - сверхтихоходный 326, 327
- Электромагниты 75, 123, 139
 - инженерные методы расчета 142... 152
 - конструкции 140...142
 - основные размеры и параметры 140, 141
- Электронагреватели трубчатые 287
- Электрорадиоэлемент 4, 21, 328, 360
- Элемент (-ы) 4, 5, 269, 270, 343, 344
 - — и согласующие для полосковых волнопроводов 233
 - простейшие полосковых волново-дов 235
 - упругие механические 103...106
- Эффективность 360

Я

- Ячейка функциональная 4

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.		Стр.
Предисловие	3	4.16. Механизмы синхронно-следящих систем	116
А. МОНТАЖ КОМПОНЕНТОВ	4	4.17. Механизмы приводов антенн РЛС	118
1. Конструкция и монтаж микросхем и ЭРЭ	4	4.18. Леитопротяжные механизмы	118
1.1. Интегральные микросхемы и дискретные ЭРЭ	4	Список литературы	123
1.2. Особенности конструкций РЭА на микросхемах и микросборках	17	5. Электромеханические компоненты	123
Список литературы	20	5.1. Электродвигатели	124
2. Печатные платы	21	5.2. Электромагниты	139
2.1. Печатные платы на слоистых и волокистых основаниях	21	5.3. Электромагнитные муфты	152
2.2. Многослойные керамические платы	39	Список литературы	157
Список литературы	44	6. Аэродинамические расчеты механизмов и антенных установок	158
Б. МЕХАНИЗМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	45	6.1. Выбор системы координат	158
3. Кинематические, динамические и точностные расчеты механизмов	45	6.2. Аэродинамические нагрузки и коэффициенты	159
3.1. Кинематика механизмов	45	6.3. Основы модельного эксперимента	169
3.2. Кинестатический расчет	48	Список литературы	172
3.3. Трение в кинематических парах	49	В. ХАРАКТЕРНЫЕ УЗЛЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	173
3.4. Расчет статических моментов в кинематических цепях механизмов	54	7. Узлы СВЧ трактов и антенн	173
3.5. Динамические расчеты механизмов	58	7.1. Характеристика электромагнитного поля и особенности СВЧ диапазона	173
3.6. Точность кинематических цепей механизмов	61	7.2. Матриалы элементов конструкций СВЧ	174
Список литературы	74	7.3. Линии передачи СВЧ	176
4. Схемы и элементы механизмов	75	7.4. Некоторые общие расчетные соотношения для линий передачи	203
4.1. Общие вопросы конструирования	75	7.5. Элементы и устройства коаксиальных трактов	210
4.2. Зубчатые передачи	76	7.6. Элементы и устройства волноводных трактов	216
4.3. Червячные передачи	81	7.7. Элементы и устройства на полосковых волноводах	233
4.4. Планетарные и волновые передачи	82	7.8. Развязывающие устройства СВЧ	241
4.5. Винтовые передачи	84	7.9. Колебательные системы СВЧ	250
4.6. Фрикционные передачи	85	7.10. Электрическая прочность СВЧ устройств	253
4.7. Кулачковые механизмы	88	7.11. Экранирование СВЧ устройств	257
4.8. Механизмы прерывистого движения	91	7.12. Антенные устройства СВЧ	259
4.9. Валы, оси и направляющие (опоры)	91	Список литературы	268
4.10. Муфты	96	8. Элементы и рабочие вещества СОР	269
4.11. Фиксаторы и ограничители	101	8.1. Системы воздушного охлаждения и их элементы	271
4.12. Упругие элементы	103		
4.13. Отсчетные устройства	106		
4.14. Механизмы настройки	109		
4.15. Механизмы дистанционного управления	113		

	Стр.		Стр.
8.2. Системы жидкостного охлаждения и их элементы	280	10.2. Оптимизация конструкций узлов и блоков РЭА	333
8.3. Рабочие вещества СОР	296	Список литературы	342
Список литературы	298	11. Обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры	343
9. Узлы и электроакустические устройства	301	11.1. Показатели надежности	343
9.1. Классификация	301	11.2. План обеспечения надежности и его реализация	346
9.2. Микрофоны, головки громкоговорителей, акустические системы и головные телефоны	303	11.3. Повышение эксплуатационной надежности компонентов РЭА	349
9.3. Дисковые носители информации и сопутствующие им устройства	313	11.4. Повышение надежности РЭА схемотехническими приемами	354
9.4. Ленточные и проволочные носители информации и сопутствующие им устройства	317	11.5. Отработочные испытания	356
9.5. Устройства для движения звуконосителей	322	Список литературы	359
Список литературы	327	12. Оценка качества конструкций радиоэлектронной аппаратуры	360
Г. ОПТИМИЗАЦИЯ, НАДЕЖНОСТЬ, КАЧЕСТВО	328	12.1. Методологические основы	360
10. Принципы оптимизации параметров	328	12.2. Методика экспресс-оценки качества изделия	364
10.1. Основные понятия и методы	328	Список литературы	374
		Предметный указатель	375

**Николай Арсеньевич Барканов
Борис Ефимович Бердичевский
Рем Геннадьевич Варламов и др.**

СПРАВОЧНИК КОНСТРУКТОРА РЭА: КОМПОНЕНТЫ, МЕХАНИЗМЫ, НАДЕЖНОСТЬ

Редактор Н. К. Калинин
Художник И. А. Шилев
Художественный редактор Т. В. Бусарова
Технический редактор Г. И. Колосова
Корректор Л. А. Буданцева

ИБ № 43

Сдано в набор 12.07.84 Подписано в печать 11.01.85 Т-03018
Формат 60x90/16 Бумага кнжн.-журн. № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 24,0 Усл. кр.-отг. 24,0 Уч.-изд. л. 30,69
Тираж 40 000 экз. Изд. № 20503 Зак. 78/355 Цена 2 р.
Издательство «Радио и связь», 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Набрано в Московской типографии № 5 ВГО «Союзучетиздат»
Ипечатано в Подольском филиале ПО «Периодика»
142110, г. Подольск, ул. Кирова, д. 25