

А. П. Ненашев

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИО- ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ



Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебника
для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Конструирование и технология РЭС»



Москва «Высшая школа» 1990

ББК 32.844
Н 51
УДК 621.396.6

12

24/083

Рецензенты: кафедра конструирования радиоаппаратуры и микроэлектроники Ленинградского электротехнического института связи им. М. А. Бонч-Бруевича (зав. кафедрой — канд. техн. наук, доц. П. П. Гелль); кафедра конструирования и производства РЭА Рижского политехнического института им. А. Я. Пельше (зав. кафедрой — канд. техн. наук, доц. В. В. Павловский)

Ненашев А. П.

Н 51 **Конструирование радиоэлектронных средств:**
Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. — М.: Высш.
шк., 1990. — 432 с.: ил.

ISBN 5-06-000474-0

Рассмотрены основные принципы реализации радиоэлектронных средств (РЭС) и варианты конструкций РЭС различного назначения. Изложены общие вопросы конструирования, в том числе организация и методология, специфика обеспечения технологичности конструкций, внутренней электромагнитной совместимости, способы защиты от влияния тепла, влаги, механических воздействий, вопросы внешнего оформления РЭС с учетом требований эргономики и технической эстетики. Изложена специфика конструкций РЭС диапазона сверхвысоких частот, наземных, бортовых, радиоэлектронных и электронных вычислительных РЭС.

Н 2302030700(4309000000)—187 186—90
001(01)—90

ББК 32.844

6Ф2.1

ISBN 5-06-000474-0

© А. П. Ненашев, 1990

Важным фактором, определяющим темпы научно-технического прогресса в современном обществе, являются радиоэлектронные средства (РЭС). Ускорение научно-технического прогресса требует сокращения сроков разработки РЭС и внедрения их в производство и эксплуатацию. Конструирование, являясь составной частью процесса создания РЭС, представляет сложный комплекс взаимосвязанных задач, решение которых возможно только на основе системного подхода с использованием знаний в области современной технологии, схмотехники, сопротивления материалов, теплофизики, эстетики и других теоретических и прикладных дисциплин. Ускорение создания РЭС можно осуществить только при широком использовании средств автоматизированного конструкторского проектирования и гибких производственных систем. Это требует от современного конструктора и технолога всестороннего овладения электронной вычислительной техникой.

Книга предназначена для студентов, обучающихся по специальности «Конструирование и технология радиоэлектронных средств», а также по специальности «Конструирование и технология электронных вычислительных средств», так как многие конструкторские решения по обеспечению электромагнитной и тепловой совместимости, защиты от механических воздействий и влаги, внешнего оформления с учетом требований эргономики и технической эстетики являются общими как для радиоэлектронной, так и для электронно-вычислительной аппаратуры.

Особенностью книги является то, что в ней рассмотрены не только вопросы методологии системного конструирования РЭС, но и специфика конструкций различного назначения, методы обеспечения технологичности конструкций, ограничения на конструкции, обусловленные использованием автоматизированных методов проектирования и гибких производственных систем. В конце каждой главы приведены вопросы для самоконтроля. Ввиду быстрой смены стандартов ссылки на нормативные документы, как правило, не приводятся.

Автор считает своим долгом выразить благодарность чл.-кор. АН СССР Г. Я. Гуськову и чл.-кор. АН СССР Л. Н. Преснухину за содействие изданию книги, сотрудникам кафедры конструирования и производства РЭА Рижского политехнического института им. А. Я. Пельше (зав. кафедрой — канд. техн. наук, доц. В. В. Павловский) и кафедры конструирования радиоаппаратуры и микроэлектроники Ленинградского электротехнического института связи им. М. А. Бонч-Бруевича (зав. кафедрой — канд.

техн. наук, доц. П. П. Гелль) за труд по рецензированию книги, замечания и полезные советы, а также д-ру техн. наук, проф. В. Б. Пестрякову за постоянное внимание и помощь при написании книги, кандидатам техн. наук В. Г. Петрову, Н. И. Платонову, А. Н. Тарееву, О. А. Кузнецову, Ю. М. Ильину, Н. Ф. Мормуль за советы и помощь при подготовке материала рукописи, а также студентам МИЭТ Т. А. Яковлевой, В. В. Холанскому, М. А. Монаховой и О. А. Червякову за помощь в подготовке графического материала.

Замечания по книге следует направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

Конструкция характеризует структуру и свойства изделия, под которым понимается любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. Изделия различают по видам:

деталь — изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций;

сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе с помощью сборочных операций;

комплекс — два изделия и более (состоящих, в свою очередь, из двух частей и более), не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;

комплект — два изделия и более, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (комплект запасных частей, инструмента).

Под радиоэлектронным средством (РЭС) понимают изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники.

Термин «радиотехника» широко использовался до 50-х годов и определял область науки и техники, связанную с генерацией, излучением, приемом и преобразованием радиоволн. С увеличением разнообразия и сложности решаемых задач в области автоматики, вычислительной, измерительной и связной техники и расширением диапазона используемых электромагнитных волн он был заменен термином «радиоэлектроника». Область науки и техники, связанная с изучением и использованием взаимодействия электронов с электромагнитными полями, называется *электроникой*. Изделиями электронной техники являются электровакуумные, газоразрядные, полупроводниковые, опто- и акустоэлектронные приборы, приборы на доменной неустойчивости и др.

Одновременно с развитием радиотехники и электроники изменялось понятие РЭС. Вначале РЭС назывались *аппаратурой*. Когда она использовалась в основном для связи, имело место понятие *радиоаппаратуры*. Когда же ее стали использовать для решения технических задач (обнаружение целей, наведение, навигация и т. д.), появилось понятие *радиотехнической аппаратуры*. Развитие ЭВМ и систем автоматики (в том числе электронных АТС) привело к понятию *электронной аппаратуры*, в которой

передача и преобразование информации осуществлялись методами электроники. Дальнейшее усложнение аппаратуры привело к понятию *радиоэлектронной аппаратуры*, в которой прием, обработка, хранение и передача информации осуществлялись методами как радиотехники, так и электроники. Включение в состав радиоэлектронной аппаратуры различных электромеханических исполнительных устройств, систем питания, теплоотвода и контроля привело к понятию «радиоэлектронное средство».

Электромагнитные колебания условно делятся на четыре диапазона: низкочастотные (от 3 Гц до 3 кГц), радиоволны (от 3 кГц до 3000 ГГц), оптическое излучение (от 3000 ГГц до 750 ТГц), рентгеновское и гамма-излучение (от 750 до 10 000 ТГц). Имеется специфика способов генерации, передачи и приема электромагнитных колебаний каждого диапазона, а следовательно, имеется и специфика конструкций аппаратуры. В данной книге будут рассмотрены конструкции РЭС, работающих в диапазоне радиоволн. В свою очередь, в этом диапазоне различают высокочастотные (ВЧ) (3 кГц...300 МГц) и сверхвысокочастотные (СВЧ) (300 МГц...3000 ГГц) устройства, конструкции которых также существенно различаются.

Радиоэлектронные средства предназначены для передачи, приема, хранения и преобразования информации, представленной в виде непрерывных или дискретных электромагнитных сигналов. Устройства, работающие с непрерывными электромагнитными сигналами, называют *аналоговыми*, а устройства, работающие с дискретными сигналами, — *цифровыми*. Конструкции их существенно различны. Обычно в состав РЭС входят как аналоговые, так и цифровые устройства, в свою очередь включающие дискретные электрорадиоэлементы (ЭРЭ) — резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, тиристоры, светодиоды, фотодиоды и т. д.), а также узлы в интегральном исполнении (интегральные схемы и элементы функциональной микроэлектроники) (табл. В.1). Приборы функциональной микроэлектроники выполнены на средах с распределенными параметрами, в которых в нужный момент под воздействием управляющего сигнала возникают динамические неоднородности среды. Эти неоднородности управляют прохождением сигнала. Использование приборов функциональной микроэлектроники эквивалентно резкому возрастанию степени интеграции по сравнению с обычными интегральными схемами. К приборам функциональной микроэлектроники относятся, например, пьезокерамические фильтры, запоминающие устройства на цилиндрических магнитных доменах. В состав элементной базы РЭС входят также элементы электро монтажа (соединители, печатные платы, провода и кабели из объемного про- вода).

Изменение доли (%) различных элементов в составе РЭС

Элементы	Год			Область использования
	1977	1985	1990	
Интегральные схемы и элементы функциональной микроэлектроники	36	46	55	Маломощные элементы для приема, обработки и хранения информации
Дискретные полупроводниковые приборы	20	16	13	Элементы источников питания и устройств автоматики
Электровакуумные приборы мощностью в десятки — сотни киловатт	12	12	12	Элементы радиопередающих устройств
Миниатюрные элементы	32	26	20	Элементы согласования, фильтрации, индикации, управления, соединители, провода и кабели

Применительно к ИС следует различать понятия «элемент» и «компонент». *Под элементом ИС* понимается часть, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации. *Компонентом является часть ИС*, которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации. Компонентом может быть либо часть гибридной ИС, либо гибридная или полупроводниковая ИС. РЭС, в которых используются элементы в интегральном исполнении, называются *микроэлектронными* и составляют подавляющее большинство. Это определяет актуальность развития конструкторско-технологического направления создания микроэлектронных РЭС.

Под конструкцией (от лат. constructio — составление, построение) понимается совокупность деталей и материалов (тел) с разными физическими свойствами, находящихся в определенной физической связи (электромагнитной, тепловой, механической), обеспечивающая выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью под влиянием внешних и внутренних воздействий и воспроизводимая в условиях производства. Конструкция определяет взаимное расположение частей в пространстве, способы их соединения, характер взаимодействия, а также

материал, из которого они изготовлены. Конструкция РЭС отличается рядом особенностей, которые выделяют ее в отдельный класс среди других конструкций:

1) иерархической структурой (от греч. *hierarchia*, *hieros* — священный, *archē* — власть), под которой подразумевается последовательное объединение более простых электронных узлов в более сложные;

2) доминирующей ролью электрических и электромагнитных связей;

3) наличием неоднородностей в электрических соединениях, приводящих к искажению и затуханию сигналов, а также паразитных связей, порождающих помехи (наводки);

4) наличием тепловых связей, что требует принятия мер защиты термочувствительных элементов;

5) слабой связью внутренней структуры конструкции с ее внешним оформлением.

Конструкторская иерархия реализуется с помощью уровней разукрупнения РЭС, габаритные размеры которых стандартизованы. Конструкции нижестоящего уровня совместимы с конструкциями вышестоящих уровней. По конструктивной сложности различают следующие уровни разукрупнения РЭС: шкаф, блок, ячейка. Если устройства являются не только конструктивно, но и функционально законченными, то они называются *модулями* (от лат. *modulus* — составная часть, кратная целому).

Различают (ГОСТ 26632—85) следующие уровни разукрупнения РЭС в модульном исполнении по конструктивной сложности: радиоэлектронный модуль третьего уровня (РЭМ 3) — функционально законченный радиоэлектронный шкаф, пульт, стойка, выполненные на основе базовой несущей конструкции третьего уровня и обладающие свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости; модуль второго уровня (РЭМ 2) — блок или рама; модуль первого уровня (РЭМ 1) — ячейка, плата. Модуль нулевого уровня (РЭМ 0) конструктивно совместим с модулем первого уровня и реализует преобразование информации или преобразование сигналов. Обычно это элементы (ЭРЭ, ИС, элементы функциональной микроэлектроники), не имеющие самостоятельного эксплуатационного применения. На рис. В.1 представлена система иерархических конструктивных уровней разукрупнения РЭС подвижного наземного комплекса. Она состоит из шкафов, в которых размещают блоки четырех типоразмеров; в двух блоках (тип I) использованы функциональные ячейки, в двух других (тип II) — плоская панель, на которой расположены навесные ЭРЭ и электрические соединения.

Совокупность уровней разукрупнения РЭС определенного назначения образует *конструкционную систему*. Известны конструкционные системы РЭС измерительных приборов, электрон-

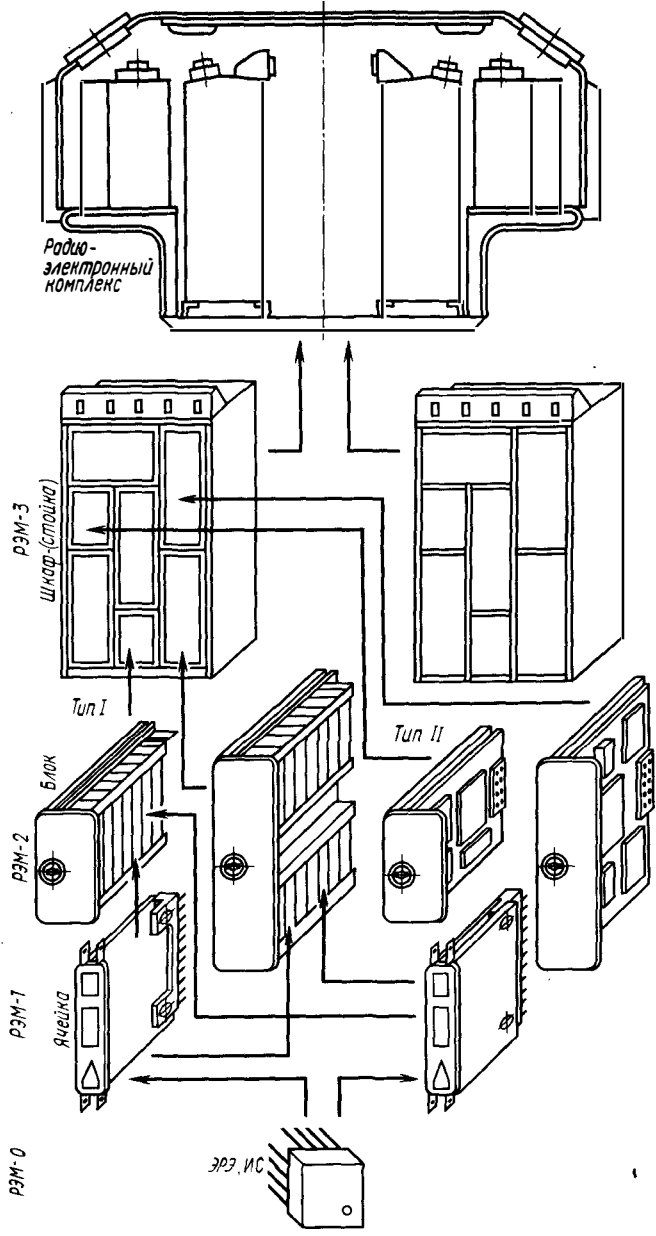


Рис. В.1. Система базовых несущих конструкций РЭС подвижного наземного комплекса

ной вычислительной аппаратуры, телевизионной, связной аппаратуры и др.

Конструкция создается в процессе конструирования, под которым понимают мыслительную, оформительскую и организаторскую деятельность. Основным содержанием конструирования является прогнозирование некоторой будущей структуры на основании современных данных, нахождение и отражение найденных связей между частями конструкции в конструкторской документации и внедрение ее в производство и эксплуатацию. Одним из наиболее важных результатов конструирования является получение новой информации, которую можно использовать в последующих разработках. Эта информация может иметь позитивный (новое решение) или негативный характер. Отрицательный результат тоже полезен, так как позволяет избежать повторения ошибок.

Конструирование является частью общего процесса проектирования или разработки изделия, содержащего такие взаимосвязанные этапы, как разработка структурной и принципиальной электрических схем, собственно конструирование, разработка технологии изготовления, внедрение изделия в производство и эксплуатацию.

Конструирование может осуществляться либо только человеком (вручную), либо с использованием ЭВМ.

Одним из наиболее трудных и творческих этапов конструирования является компоновка (от лат. *componere* — складывать) — размещение на плоскости или в пространстве различных элементов РЭС. Плотность компоновки РЭС определяется числом элементов в единице объема (элемент./см³) или площади (элемент./см²). Иногда поверхностная плотность компоновки выражается числом ИС, размещаемых на единице площади (ИС/см²). В некоторых случаях указывается число внешних выводов ИС; так, ИС с 16 выводами обозначается ИС₁₆.

Расширение областей использования и усложнение РЭС ведут к увеличению числа входящих в них элементов и компонентов, что повышает стоимость, габариты, массу, энергопотребление и снижает надежность РЭС. Вначале для улучшения этих параметров осуществляли миниатюризацию элементов (например, применяли электровакуумные лампы типа «дробь», «желудь», «пальчиковой» серии). Развитие интегральной гибридной и полупроводниковой технологии позволило резко уменьшить размеры элементов и перейти к микроминиатюризации.

Для дальнейшего улучшения параметров РЭС используют различные системотехнические, схемотехнические, конструкторские и технологические решения, в совокупности называемые комплексной микроминиатюризацией. Это увеличение степени интеграции ИС и модулей, разработка методов структурного резервирования, сложение мощностей маломощных источников излучения СВЧ,

отвод тепла с помощью «тепловых труб», защита от механических воздействий с помощью вязкоупругих компаундов, защита от влаги бескорпусных элементов в составе блока общей оболочкой, использование микромощных элементов на основе КМДП-структур и транзисторных пар, изготовленных в едином технологическом цикле, замена электромеханических узлов электронными и т. д. Актуальность комплексной микроминиатюризации не снижается, так как отношение объема, занимаемого элементами в интегральном исполнении, к объему РЭС составляет 1:10 и менее.

Классификация РЭС. В настоящее время существует большое число РЭС и их конструкций, которые можно классифицировать по: 1) функциональному назначению системы (самолетный метеонавигационный радиолокатор, ЭВМ управления робототехническим комплексом, слуховой аппарат на эффекте костной проводимости и т. д.); 2) функциональному назначению отдельных устройств (пульт станка с ЧПУ, индикатор РЛС); 3) частотному диапазону сигналов (низкие частоты — блок питания, устройство автоматики; высокие частоты — блок усиления видеосигнала, блок гетеродина устройства связи; СВЧ — малошумящий усилитель, усилитель мощности и т. д.); 4) по конструктивной сложности (ИС, плата, блок, шкаф, пульт, стойка); 5) типу производства (единичное, серийное, массовое).

Классификация по функциональному назначению часто является доминирующей, так как объект установки РЭС в решающей степени определяет специфику конструкции (защита от дестабилизирующих факторов, масса, форма, габариты, энергопотребление, стоимость, надежность).

Показатели качества РЭС. Эффективность и качество конструкции РЭС характеризуются *системой показателей* — критериев (от греч. *kriterion* — средство для суждения). Одним из важнейших показателей является *технологичность конструкции*, под которой понимается совокупность свойств конструкции изделия, обеспечивающая оптимизацию затрат при производстве, эксплуатации, ремонте с учетом заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Технологичность конструкции — понятие относительное. Например, конструкция, технологичная при единичном производстве, когда используются универсальное оборудование и высококвалифицированный персонал, нетехнологична при массовом производстве, основанном на применении специализированного оборудования, когда весь технологический процесс разбит на операции, которые могут выполняться персоналом сравнительно невысокой квалификации. Точно так же РЭС, технологичная для неавтоматизированного производства, может стать нетехнологичной в условиях гибкого автоматизированного производства, основанного на «безлюдной» технологии с применением манипуляторов и роботов.

Кроме технологичности каждая конструкция РЭС характеризуется рядом технических показателей, важность, номенклатура и значения которых зависят от назначения РЭС, стадии разработки, элементной базы. Для РЭС летательных аппаратов наиболее важным показателем является масса, для РЭС подводных лодок и танков — объем, для космических объектов — надежность, для наземных РЭС — затраты на изготовление и стоимость эксплуатации. Другие показатели выступают в качестве ограничений: для самолетных РЭС — это надежность, объем и форма; для танковых — надежность; для РЭС космических объектов — масса, надежность и габариты; для стационарных РЭС — занимаемая площадь и ремонтпригодность. *Показатель надежности* (ГОСТ 27.002—83) является комплексным, включающим такие свойства, как безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость.

Для конкретных видов РЭС и условий эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость. Для неремонтируемых объектов надежность включает в основном безотказность. Для ремонтируемых объектов важнейшим показателем надежности является ремонтпригодность. Каждое свойство содержит ряд показателей. Безотказность можно характеризовать вероятностью безотказной работы, средним временем наработки на отказ, потоком отказов, долговечность — различными показателями ресурсов и сроков службы (до ремонта, до описания и т. д.).

На различных этапах разработки и производства изделия используют свои показатели. Так, при исследовании возможности создания РЭС для использования на объекте с весьма ограниченным объемом (например, для радиоуправляемой модели корабля) главным свойством является объем, который определяет принципиальную возможность использования РЭС. На стадии разработки конструкции опытного образца этого РЭС на первое место выступает соответствие техническим требованиям, в частности по надежности, зависящее от правильности выбора конструкторско-технологических решений. При разработке конструкции серийного образца определяющим показателем становится стоимость, которая зависит от использования высокопроизводительных технологических методов, автоматизации, тщательности отработки технологических режимов.

Показатели качества на отдельных этапах конструирования и внедрения РЭС могут не только различаться, но и быть противоречивыми. Так, при автоматизированном конструкторском проектировании электрических соединений печатной платы противоречивыми являются требования минимальной суммарной длины связей и минимального числа пересечений при однослойной трассировке. Первое требование обуславливает плотность размещения связей, а это затрудняет трассировку без пересечений.

Номенклатура показателей РЭС, их количественные и качественные значения изменялись с развитием элементной базы. Такие показатели, как сложность РЭС (число элементов), масса, габариты, надежность, стоимость, энергопотребление, были актуальны для всех поколений РЭС. Однако количественные значения этих показателей непрерывно изменялись в сторону снижения массы, габаритов, стоимости и в сторону увеличения сложности и надежности. Для РЭС на дискретных элементах важнейшим показателем качества являлось число электровакуумных приборов, имевших низкую надежность, большие габариты, потребляемую мощность, стоимость. Поэтому число активных элементов старались уменьшить. При использовании элементов в интегральном исполнении (в составе ИС) в ряде случаев избыточность активных элементов полезна. Например, при использовании транзисторной структуры в качестве диодов или резисторов уменьшается площадь последних, а увеличение числа адресных формирователей в полупроводниковой памяти позволяет увеличить быстродействие (благодаря укорочению линий выборки) и повысить выход годных устройств памяти (в результате исключения неисправных регистров).

Показатели могут быть абсолютными и относительными. *Абсолютные показатели* характеризуют конструкции РЭС без учета достигнутого ранее уровня, а *относительные* — с его учетом. Примерами абсолютных показателей, сохранивших свое значение и поныне, являются масса, габариты. С возникновением интегральных схем появились новые абсолютные показатели: степень интеграции ИС, плотность компоновки РЭС, плотность теплового потока, удельная мощность, удельная масса, минимальная суммарная длина электрических связей.

Относительные показатели (уменьшение массы, объема, энергопотребления) стали особенно актуальными для РЭС в микроэлектронном исполнении.

Рассмотрим подробнее новые абсолютные и относительные показатели. *Степень интеграции* численно равна десятичному логарифму числа элементов, входящих в ИС. Интегральные схемы со степенью интеграции элементов больше третьей называют большими (БИС). Чем выше степень интеграции схемы, тем более компактное РЭС можно создать. В принципе с помощью полупроводниковой технологии можно создать сложное устройство на одной полупроводниковой пластине, что и ожидается к концу 80-х — началу 90-х годов.

Показатели *плотность теплового потока* ($\text{Вт}/\text{см}^2$) и *удельная тепловая мощность* ($\text{Вт}/\text{см}^3$) особенно актуальны для оценки параметров корпусированных микроэлектронных модулей (источники питания, быстродействующие цифровые узлы, выходные каскады передатчиков).

Удельная масса герметичных блоков, имеющих несущие конструкции из легких сплавов, обычно равна 1,2...1,5 г/см³. Эту характеристику полезно знать для ориентировочной оценки ожидаемой массы герметичного блока, если известен его объем.

Относительные показатели характеризуют достигнутый при новой разработке технический уровень конструкции по сравнению с существовавшим ранее. К ним относятся *коэффициенты уменьшения массы* K_m , *объема* K_V , *энергопотребления* K_ε :

$$K_m = \frac{m_1 - m_2}{m_1}, \quad K_V = \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \quad K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1},$$

где m_1 , V_1 , ε_1 — масса, объем и энергопотребление РЭС до использования новых микроэлектронных узлов; m_2 , V_2 , ε_2 — масса, объем и энергопотребление РЭС после использования новых микроэлектронных узлов. Коэффициенты K_m и K_V характеризуют эффективность использования компонентов с повышенной степенью интеграции, а также эффективность миниатюризации механических и электромеханических узлов; коэффициент уменьшения энергопотребления позволяет оценить резервы по уменьшению габаритов и массы РЭС за счет уменьшения габаритов и массы как источников питания, так и систем охлаждения.

Кроме приведенных относительных и абсолютных показателей существуют и другие, например коэффициент заполнения объема РЭС $K_{з0} = V_n / V_y$, где V_n — полезный объем, занимаемый элементами; V_y — общий объем устройства. Существуют показатели, характеризующие эстетические и эргономические свойства и др.

Эволюция конструкций РЭС. Первые устройства проводной телеграфной связи появились в середине прошлого века. Первый телеграфный аппарат был создан русским изобретателем П. Л. Шиллингом (1832), ряд аппаратов — русским физиком Б. С. Якоби (1840—1850). Первый в мире радиоприемник, изобретенный А. С. Поповым, был продемонстрирован им в 1895 г. Конструкция первых РЭС напоминала аппаратуру проводной связи (деревянный ящик, монтаж неизолированным проводом, контактирование с помощью винтов). Установка РЭС на суда и автомобили (1925—1935) привела к необходимости увеличения прочности и экранирования отдельных узлов с помощью металлического шасси. Увеличение серийности выпуска аппаратуры привело к созданию конструкторской иерархии. Для защиты аппаратуры танков и самолетов (1935—1945) были разработаны герметичные корпуса, которые устанавливались на амортизаторы. Требование минимизации массы и объема ракетной аппаратуры (1940—1950) привело к созданию микромодулей, печатных плат, полупроводниковых приборов, коаксиальных кабелей, полосковых линий, интегральных схем. Дальнейшее усложнение аппаратуры

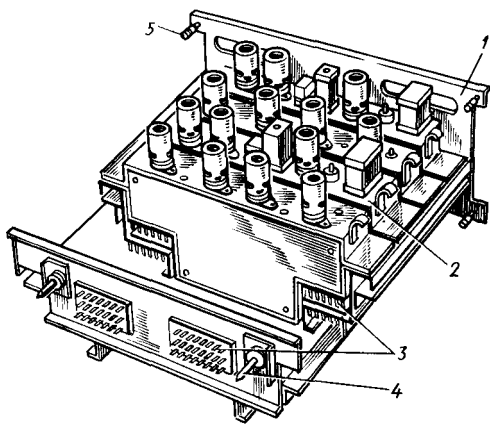
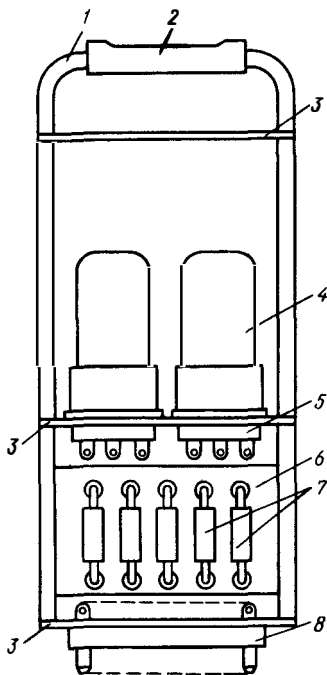


Рис. В.2. Конструкции РЭС первого поколения:

1—основание с передней и задней панелью; 2—функциональные модули с электровакуумными лампами; 3—разъемные соединители для подключения модулей и внешних связей; 4—направляющие штыри; 5—винты крепления блока в стойке

Рис. В.3. Компоновка ячейки аналоговой ЭВМ первого поколения:

1—рамка; 2—ручка; 3—поперечины; 4—электровакуумные лампы; 5—ламповая панелька; 6—печатная плата; 7—ЭРЭ; 8—соединители с плоскими контактами



привело в 60—70-х годах к появлению приборов функциональной микроэлектроники.

РЭС первого поколения (20—50-е годы) были построены с использованием электровакуумных ламп, дискретных ЭРЭ, проводных электрических связей; ко второму поколению РЭС (50—60-е годы) относят конструкции РЭС на печатных платах и дискретных полупроводниковых приборах; к третьему—конструкции на печатных платах и ИС малой степени интеграции (60—70-е годы). В конструкциях РЭС четвертого поколения применены БИС, многослойные печатные платы, гибкие печатные шлейфы, микрополосковые линии. В настоящее время развиваются РЭС пятого поколения, в которых находят применение приборы функциональной микроэлектроники. Широкое распространение этих РЭС ожидается к концу века.

Рассмотрим специфику конструкций аппаратуры первых четырех поколений. Аппаратура первого поколения имела блочную конструкцию. Каждый блок—осциллограф, вольтметр, радиоприемник, блок автоматики (рис. В.2), блок аналоговой ЭВМ (рис. В.3) и т. д.—имел определенное функциональное назначение. К недостаткам этой аппаратуры, в состав которой входили

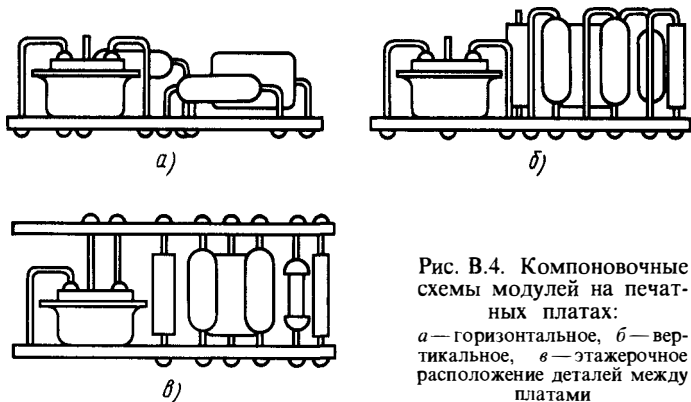


Рис. В.4. Компонентные схемы модулей на печатных платах:

а — горизонтальное, б — вертикальное, в — этажерочное расположение деталей между платами

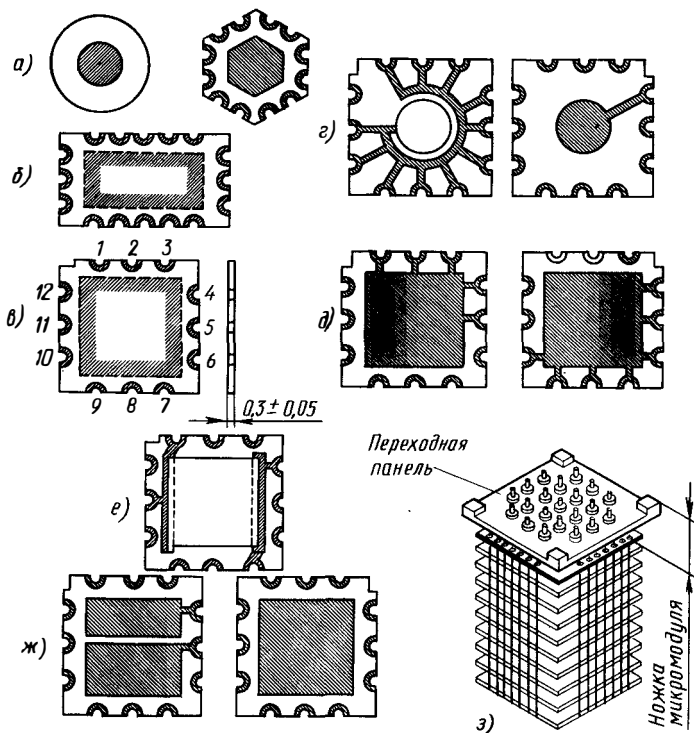


Рис. В.5. Характерная форма микроплат (а—в), примеры плат-полуфабрикатов (г—ж), этажерочный микромодуль с 28 ленточными соединениями (з)

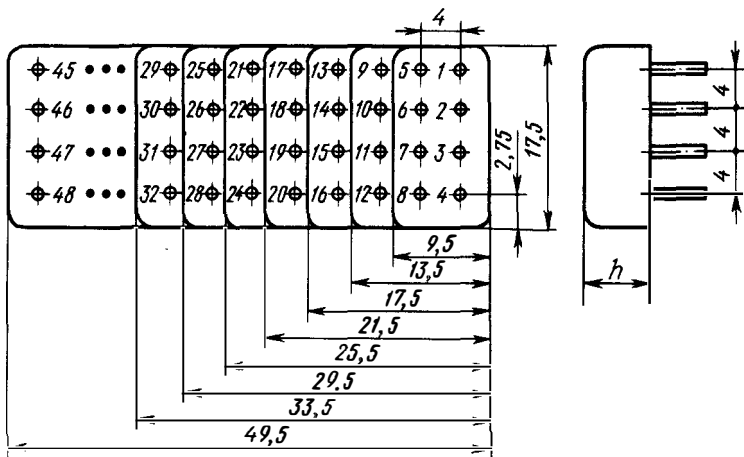


Рис. В.6. Унификация размеров плоских модулей ($h=3,5...10,5$ мм)

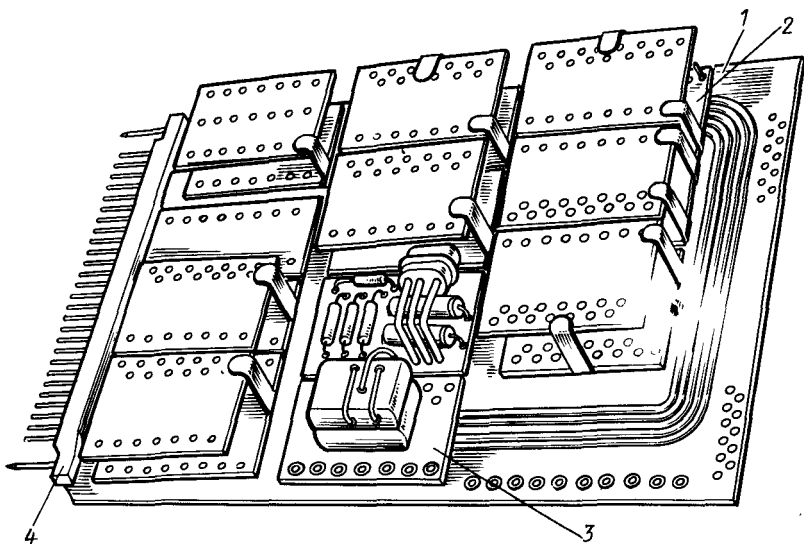


Рис. В.7. Компоновка ячейки ЦВМ второго поколения с использованием модулей на печатных платах:

1—двусторонняя печатная плата; 2—двухплатный модуль; 3—одноплатный модуль; 4—соединитель

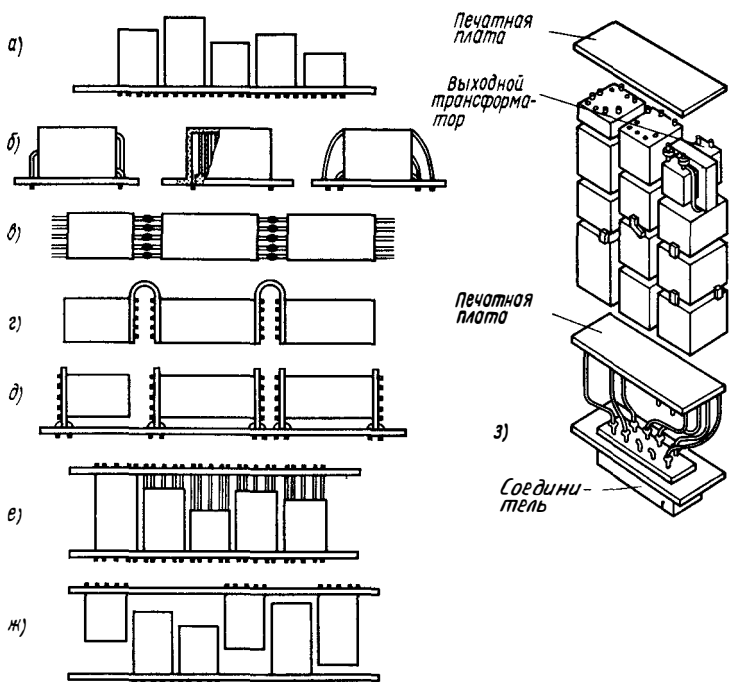


Рис. В.8. Варианты компоновки этажерочных микромодулей:

а — вертикальная; б — горизонтальная; в — «встык»; г — с использованием промежуточного монтажа; д — с торцовыми переходными печатными платами; е — двухплатная; ж — двухплатная с односторонним подключением модулей; з — компоновка приемника на этажерочных микромодулях

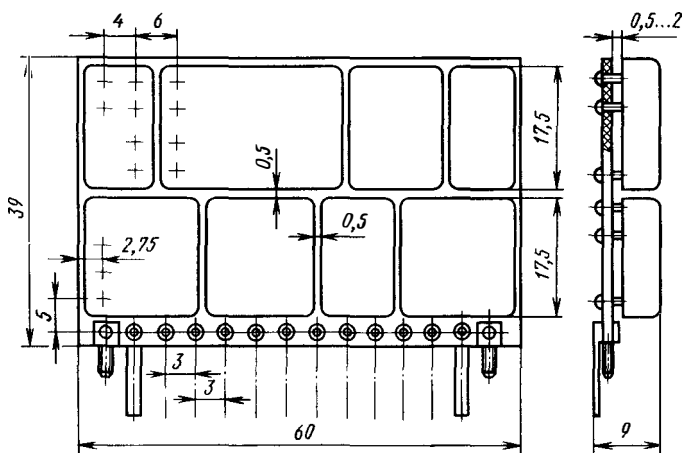


Рис. В.9. Компоновка функционального узла на плоских микромодулях

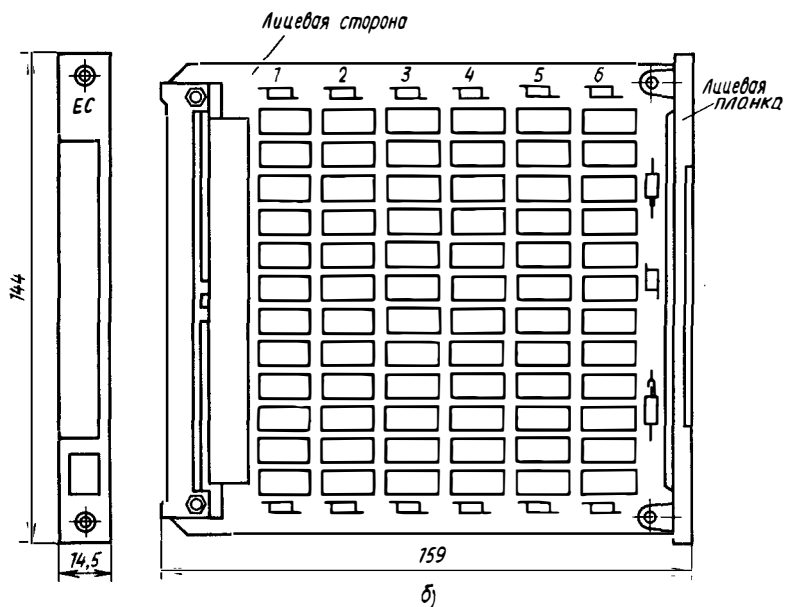
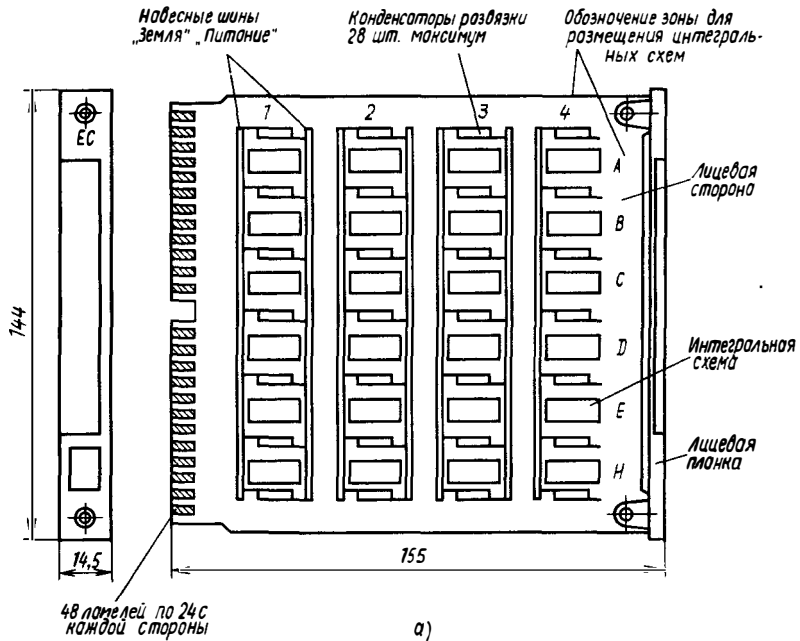


Рис. В.10. Логические типовые элементы замены ЕС ЭВМ на основе двусторонней (а) и многослойной (б) печатной платы

электровакуумные приборы и дискретные ЭРЭ, относятся малые плотности компоновки, степень унификации несущих конструкций, неприспособленность конструкции к механизации и автоматизации сборочно-монтажных работ.

Характерной особенностью аппаратуры второго поколения является применение модулей на печатных платах (рис. В.4), микромодулей этажерочной конструкции на керамических платах (рис. В.5), микромодулей плоской конструкции (рис. В.6). Из таких модулей компоновались более сложные узлы (рис. В.7—В.9). В модульных конструкциях удалось увеличить плотность компоновки как благодаря замене электровакуумных приборов полупроводниковыми, так и благодаря более плотной компоновке дискретных ЭРЭ. Это, в свою очередь, позволило пойти на некоторую избыточность и унифицировать размеры микромодулей, приняв их размеры в двух измерениях постоянными. Модули различной сложности стали отличаться размерами только в третьем измерении. Ремонтпригодность аппаратуры на модулях ниже по сравнению с блочной аппаратурой, так как при выходе из строя какого-либо элемента приходится заменять целый модуль.

Аппаратура третьего поколения выполняется на ИС первой и второй степени интеграции, являющихся функциональными модулями, из которых можно скомпоновать более сложные узлы. Конструктивно такие узлы представляют собой двустороннюю или многослойную печатную плату с установленными на ней ИС (рис. В.10). Подобные конструкции имеют высокую плотность компоновки, их функциональная сложность соответствует сложности блока первых поколений. Применение корпусированных ИС позволило повысить надежность, степень унификации, взаимозаменяемость, уменьшить габариты, массу, иногда стоимость устройства по сравнению с РЭС второго поколения. Однако использование корпусированных ИС приводит к значительной потере объема РЭС. При компоновке аппаратуры с использованием ИС первой и второй степени интеграции основной является проблема выполнения электрических связей между элементами. Ограничивающими факторами при повышении плотности компоновки плат являются шаг выводов ИС (2,5 мм) и минимальная ширина проводников и зазоров (0,15 мм).

Аппаратура четвертого поколения используется в бортовых и СВЧ РЭС (рис. В.11) и выполняется с использованием бескорпусных элементов, герметизируемых в составе блока. Плотность компоновки при этом увеличивается, но ремонтпригодность уменьшается, так как при выходе из строя одного элемента приходится при ремонте либо разгерметизировать блок, либо заменять его.

Изменение плотности компоновки РЭС различных поколений

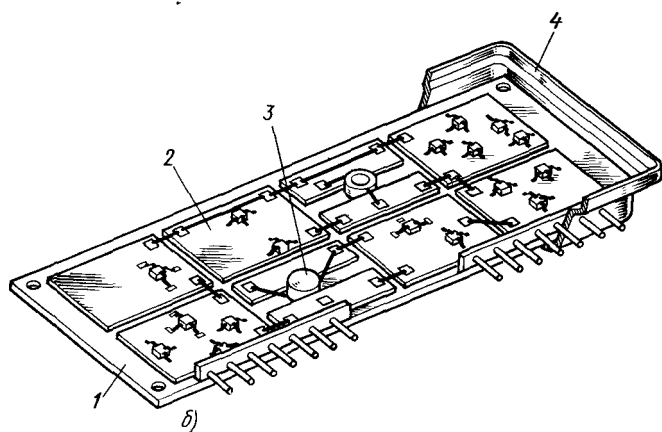
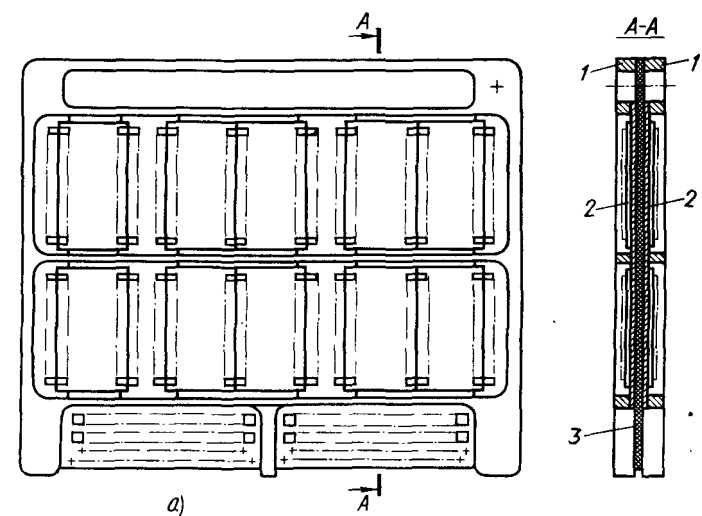


Рис. В.11. Конструкция узлов РЭС четвертого поколения:

a—ячейка бортовой ЭВМ на бескорпусных компонентах: 1—рамка; 2—микросборки; 3—печатная плата; *б*—приемник: 1—плата; 2—микросборка; 3—дискретный ЭРЭ; 4—корпус со снятой герметизирующей крышкой

Уровень разукрупнения	Электронные лампы (первое поколение)		Модуль (второе поколение)	
	обычные	миниатюрные	плоские	объемные
ИС (РЭМ 0):				
кристалл (подложка)	—	—	—	—
ИС, узел в корпусе	—	—	0,4 ...0,9	1,25...1,75
Ячейка (РЭМ 1)	—	—	0,1 ...0,3	0,7 ...0,9
Блок (РЭМ 2)	—	—	0,05...0,15	0,4 ...0,6
Шкаф, стойка (РЭМ 3)	0,01	0,05	0,02...0,04	0,1 ...0,15

приведено в табл. В.2, из которой следует, что дальнейшего резкого увеличения плотности компоновки следует ожидать после широкого внедрения приборов функциональной микроэлектроники. Кроме того, видно, что на плотность компоновки сильно влияет иерархичность конструкции.

Эволюция конструкций аппаратуры шла неразрывно с успехами в области технологии производства. Освоение электровакуумных приборов потребовало создания металлостеклянных спаев, разработки методов контроля герметичности приборов. Особенно большое влияние на конструкцию РЭС оказало освоение технологии печатных плат, интегральной полупроводниковой и гибридной технологии производства ИС и приборов функциональной микроэлектроники.

Дальнейшего совершенствования конструкций и методов конструирования РЭС следует ожидать в результате внедрения ЭВМ в конструирование и производство, дальнейшего расширения частотного диапазона электромагнитных сигналов, использования уже изученных и малоизученных физических явлений, новых материалов, расширения областей применения РЭС. Расширение использования ЭВМ для проектных конструкторских работ связывают с развитием САПР и ГПС.

Появления новых конструкций можно ожидать в связи с расширением частотного диапазона сигналов в оптическую область спектра. Одной из таких новых конструкций, вероятно, будет конструкция памяти сверхбольшой емкости (до 10^{20} бит), построенной с использованием голографии и лазерной техники.

Микромодули (второе поколение)		ИС малой степени интеграции (третье поколение)		БИС (четвертое, пятое поколение)	
этажерочные	плоские	гибридные	полупроводниковые	МДП—ЗУ	ЦМД—ЗУ
—	—	80...100	5000	$0,5 \cdot 10^6$	$(0,2...2) \cdot 10^6$
4...10	6...10	30...40	100...500	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4...2 \cdot 10^5$
1,2...3	2,5...3,5	3,5...10	10...50	$(1,5...2) \cdot 10^3$	$(1,5...10) \cdot 10^3$
0,5...1,6	1,5...2,5	3,5...4	2,5...10	—	—
0,15...0,45	0,35...0,5	0,5...0,9	0,5...2	—	—

Подобная память позволит создавать банки и базы данных с широкими возможностями и приблизит создание искусственного интеллекта.

Новые конструкции должны появиться и в связи с широким внедрением приборов функциональной микроэлектроники, основанных на хорошо изученных эффектах, а также за счет использования малоизученных в настоящее время эффектов (например, эффекта сверхпроводимости при нормальных или повышенных температурах). Создание новых конструкций возможно и в результате появления новых материалов, например сплавов, полученных в условиях невесомости, и сплавов с более совершенной кристаллической решеткой.

Большого количества новых конструкций можно ожидать от расширения областей использования РЭС, особенно в бытовой сфере: в измерительной, медицинской радио- и телевизионной технике. Новизна конструкций может быть обусловлена и использованием перспективных решений, многие из которых рассмотрены в данной книге.

Несмотря на расширение применения для конструкторского проектирования вычислительной техники и САПР, роль человека-конструктора не уменьшится, а возрастет, так как только человек может решать новые неформальные задачи. Поэтому в дальнейшем за чертежным прибором останутся только самые опытные конструкторы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое РЭС?
2. На какие диапазоны делятся электромагнитные колебания?
3. Чем отличаются понятия «элемент» и «компонент» ИС?
4. Каково соотношение элементов в микроэлектронном и дискретном исполнении в составе РЭС?
5. Что такое конструкция РЭС? Каковы ее особенности?
6. Что такое конструкторская иерархия РЭС?
7. Что такое конструирование?
8. Что такое компоновка?
9. Что такое миниатюризация, микроминиатюризация, комплексная микроминиатюризация?
10. Назовите показатели качества конструкции РЭС.
11. Что такое технологичность конструкции РЭС?
12. Как изменяется важность показателей качества конструкции для различных РЭС, на различных стадиях проектирования?
13. Как развивались конструкции РЭС?
14. Назовите поколения РЭС и их особенности.
15. Как связаны изменение конструкции РЭС и технология ее изготовления?
16. Каковы перспективы дальнейшего развития конструкций РЭС?

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭС

§ 1.1. Организация процесса конструирования РЭС

Конструирование является одной из основных частей процесса проектирования РЭС, а его цель — физическое воплощение компромиссного решения, выработанного в результате работы всех участников. В создании РЭС участвуют различные организации, подразделения, исполнители. Организации делятся на заказчика, исполнителя, субподрядчика.

Заказчик формулирует *технические требования* к РЭС и осуществляет приемку разработанного изделия.

Технические требования (ТТ) на разработку РЭС определяют показатели назначения (мощность, чувствительность, разрешающую способность и т. д.), а также содержат требования к конструкции: наименование, число и назначение основных частей; габаритные, установочные и присоединительные размеры; требования по взаимозаменяемости частей, унификации, типизации, стандартизации и преемственности. Кроме того, в ТТ входят требования по охране окружающей среды, помехозащищенности, составу запасного имущества, безопасности работы, эргономике и эстетике, условиям эксплуатации (виду объекта установки, уровням климатических, механических, радиационных и биологических воздействий, порядку обслуживания, квалификации обслуживающего персонала и т. д.).

Исполнитель на основании ТТ разрабатывает *техническое задание* (ТЗ), в котором содержатся экономические, производственные и другие требования, определяется порядок разработки и приемки изделия. *Субподрядчик* решает для исполнителя частные вопросы: разработку и поставку новых материалов, элементов, узлов, технологических процессов, методов измерений или проводит испытания, отработку на соответствие требованиям эргономики и т. д.

При проектировании конструкции РЭС в той или иной степени принимают участие различные подразделения предприятия: системотехнические (определение структуры РЭС, разбивка на наземную и бортовую части); схемотехнические (разработка схемы, разбивка ее на узлы); конструкторские (общая компоновка, выпуск конструкторской документации, сопровождение производства); технологические (установление

последовательности изготовления, отработка режимов, подготовка производства); производственные. Кроме того, в разработке принимают участие вспомогательные службы: надежности (рекомендации по структурной и информационной избыточности, проведение испытаний); снабженческие (поставка материалов, покупные изделия); патентные; автоматизированного конструкторского проектирования и т. д. Все эти подразделения состоят из различных специалистов. Координация работы предприятий, подразделений и специалистов осуществляется с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков.

Ввиду того что требования к параметрам разрабатываемых РЭС часто противоречивы (например, малая стоимость и высокая надежность), исходная информация для вновь создаваемых изделий не является достаточно полной, а исполнители при работе допускают ошибки, разработку РЭС и его конструкции проводят в несколько *стадий* (не менее двух): научно-исследовательская работа (НИР) и опытно-конструкторская (ОКР). Каждая стадия включает несколько *этапов*. В ходе выполнения работ на стадиях и этапах происходит постепенное уточнение принимаемых решений и нахождение оптимального. При этом устраняются ошибки, которые могут быть допущены как руководителями (ошибки планирования и др.), так и исполнителями (неправильный выбор технических решений, ошибки при выполнении конструкторской документации и т. д.). Причиной ошибок являются, как правило, недостаточная квалификация, недостаток информации, а также повышенная утомляемость работников при сжатых сроках разработки. Спецификой разработки РЭС является то, что на всех стадиях и этапах различные специалисты взаимодействуют друг с другом с самого начала разработки.

Основные этапы проведения НИР: 1) предплановый патентный поиск; 2) разработка и согласование с заказчиком технического задания, государственная регистрация НИР; 3) подготовительный этап — выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных технических заданий на основные части НИР; 4) основной этап — теоретические и экспериментальные исследования (выполнение теоретических изысканий, расчетов, математического моделирования), обработка результатов исследований, составление и оформление технической документации; 5) заключительный этап — обобщение результатов и оценка выполненной НИР (составление карты технического уровня, оценка полноты и качества проведенной НИР, подготовка к предъявлению работы к приемке); 6) приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

Этапы ОКР: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработка рабочей документации.

Техническое задание (ТЗ) составляется исполнителем на основании технических требований заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков. Объем экономических и производственных требований в этих ТЗ меньше, а технические требования более подробные, чем в основном ТЗ.

Техническое предложение—этап разработки, на котором исполнителем обосновывается принципиальная возможность создания РЭС с заданными по ТЗ характеристиками и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ. На этом этапе составляют частные ТЗ для различных подразделений предприятия, оформляется технический отчет, иногда выполняются конструкторские документы.

Эскизный проект—совокупность конструкторских документов, содержащих проработанные конструкторско-технологические решения, дающие общее представление об изделии, а также данные, определяющие возможность использования по назначению и основные параметры разрабатываемого изделия. На основании эскизного проекта разрабатывается технический проект.

Технический проект—это совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и технические данные для разработки рабочей документации. На этом этапе проводятся различные расчеты и обоснования.

Рабочая документация—это совокупность конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца, установочной серии, серийного образца. После заводских испытаний опытного образца конструкторской документации присваивается литера «О»; после государственных, межведомственных, приемочных и других видов испытаний—литера «О₁»; на последующих стадиях (после повторных испытаний изготовленных изделий)—литеры «О₂», «О₃» и т. д. Конструкторская документация на изделие для установочной серии имеет литеру «У»; после испытаний установочной серии—литеру «А». После корректировки документации испытательной (головной) серии конструкторской документации присваивается литера «Б», что дает право наладить серийное или массовое производство изделия. Документации на изделие для разового изготовления или нескольких изделий присваивают литеру «И».

В зависимости от сроков разработки, квалификации исполнителей, наличия прототипов и базовых несущих конструкций по согласованию с заказчиком отдельные этапы могут быть объединены. Это отражается в техническом задании.

Конструкторские документы (текстовые и графические) разрабатываются начиная с этапа эскизного проекта. На разных этапах имеются обязательные конструкторские документы и документы, выполняемые по усмотрению разработчика. Номенклатура документации, выполняемой на том или ином этапе,

называется *комплект* (табл. 1.1, столбцы). Необходимо отличать комплект конструкторской документации от комплекта — вида изделия (см. Введение). Наибольшую номенклатуру конструкторских документов имеет рабочая документация на сборочную единицу, но по объему наибольшее число документов может иметь комплекс изделия.

Таблица 1.1

Номенклатура конструкторских документов, разрабатываемых на различных этапах конструирования РЭС

Наименование документа	Шифр	Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация на изделия			
					детали	сборочные единицы	комплексы	комплекты
Чертеж детали	—	—	—	+	⊕	—	—	—
Сборочный чертеж	СБ	—	—	—	—	⊕	—	—
Чертеж общего вида	ВО	+	+	⊕	—	—	—	—
Теоретический чертеж	ТЧ	—	+	+	+	+	+	—
Габаритный чертеж	ГЧ	+	+	+	+	+	+	—
Монтажный чертеж	МЧ	—	—	—	—	+	+	—
Схемы	—	+	+	+	—	+	+	+
Спецификация	СП	—	—	—	—	⊕	⊕	⊕
Ведомость спецификаций	ВС	—	—	—	—	+	+	+
Ведомость ссылочных документов	ВД	—	—	—	—	+	+	+
Ведомость покупок изделий	ВП	—	+	+	—	+	+	+
Ведомость согласования применения изделия	ВИ	—	+	+	—	+	+	+
Ведомость держателей подлинников	ДП	—	—	—	—	+	+	+
Ведомость технического предложения	ПТ	⊕	—	—	—	—	—	—
Ведомость эскизного проекта	ЭП	—	⊕	—	—	—	—	—
Ведомость технического проекта	ТП	—	—	⊕	—	—	—	—
Пояснительная записка	ПЗ	⊕	⊕	⊕	—	—	—	—
Технические условия	ТУ	—	—	—	+	+	+	+
Программа и методика испытаний	ПМ	—	+	+	+	+	+	—
Таблицы	ТБ	+	+	+	+	+	+	+
Расчеты	РР	+	+	+	+	+	+	+
Патентный формуляр	ПФ	+	+	+	+	+	+	—

Примечание: ⊕ — обязательный документ; «+» — документ, составляемый по усмотрению разработчика; «—» — документ не составляется.

Взаимодействие конструкторов и технологов РЭС. Конструкторы и технологи, конструкторские и технологические подразделения взаимодействуют с самых ранних этапов до внедрения изделия в производство и эксплуатацию. На первых этапах решаются вопросы конструктивной и технологической преемственности изделий, выявляются оригинальные детали и узлы, необходимость в разработке новых техпроцессов. На более поздних этапах решаются вопросы компоновки с учетом требований удобства сборки, ремонта, контроля. Одновременно согласовываются параметры, подлежащие контролю, и допустимые отклонения на эти параметры. В ряде случаев в соответствии с технологическими требованиями конструкция может корректироваться: компоновка, значения параметров, допуски, материалы. В некоторых случаях может потребоваться доработка технологических процессов — повышение их стабильности или разрешающей способности; в ряде случаев может потребоваться разработка или освоение новых для данного предприятия технологических процессов (например, при замене монтажного основания источника питания в виде двусторонней печатной платы на основание с металлической основой, полиимидной пленкой или керамикой, что резко улучшает теплоотвод и позволяет сократить габариты изделия). Взаимодействие конструкторов и технологов особенно тесно при согласовании конструкторской документации с технологами и при оценке технологичности конструкции на всех этапах конструкторского проектирования.

§ 1.2. Радиоэлектронное средство как большая система

Качество конструкции РЭС, а также оптимальность самого процесса конструирования (сроки, трудозатраты) зависят не только от организации процесса конструирования, но и от методологии его проведения. Переход при конструировании РЭС на элементную базу МЭА (микроэлектронные изделия) привел не только к изменению исходных предпосылок (изменение элементной базы, расширение области использования РЭС), но и методов конструирования и показателей качества (см. Введение). Изменение методов конструирования современных РЭС по сравнению с аппаратурой первых поколений характеризуется: 1) более широким использованием системного подхода, что увеличило роль конструктора и технолога на всех этапах проектирования изделия; 2) снижением длительности цикла и трудоемкости конструкторских работ благодаря широкому использованию методов автоматизированного конструкторского проектирования; 3) более широким использованием стандартизации.

Конструкция РЭС как большой системы имеет следующие признаки: 1) высокую сложность (состоит из большого числа устройств, узлов и компонентов); 2) связь с внешней средой (в

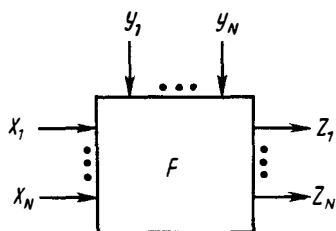
том числе с человеком-оператором); 3) иерархическую структуру (обладает свойством централизованного управления — подчинение низших уровней высшим).

Сложность конструкции РЭС обуславливается тем, что эти средства широко используются при решении сложных задач, встающих в различных областях народного хозяйства: для управления отдельными отраслями народного хозяйства, отдельными производствами, технологическим оборудованием (в том числе роботами и манипуляторами), космическими системами, в медицине, для записи и воспроизведения звука и изображения, в спорте, в информационно-библиографических системах и т. д. Это обуславливает и сложность состава РЭС, которые могут включать следующие системы: сбора информации (содержащие различные датчики и линии связи); приема и передачи информации; обработки и хранения информации; связи с человеком-оператором; питания; обеспечения нормальных режимов работы (защита от влаги, тепловых, механических, радиационных, биологических, электромагнитных воздействий). Обычно РЭС состоят из большого числа устройств, узлов и ЭРЭ, так как выполнение сложных РЭС в едином технологическом цикле часто невозможно по экономическим соображениям.

Обобщенная системная модель конструкции РЭС. Графически каждую конструкцию РЭС можно представить как систему, состоящую из изменяемых X и неизменяемых Y факторов (ограничений), показателей качества Z и связей F между факторами и показателями качества (рис. 1.1). K изменяемым в процессе конструирования факторам относятся, например, марки применяемых материалов, форма и размеры элементов конструкции, взаимное расположение компонентов и узлов, вид электрических связей, характер крепления компонентов, характер элементов усиления (ребер) и облегчения (выборки), способы теплоотвода, герметизации, характер базовой конструкции, внешнее оформление и т. д.

Ограничениями являются факторы, не изменяемые конструктором: ресурсные, системотехнические, схемотехнические, конструкторские, технологические, эксплуатационные. К *ресурсным* относятся материальные, временные, кадровые и энергетические ограничения. *Системотехническими ограничениями* являются такие, как тип РЭС: аналоговые или цифровые, наземные или бортовые, с информационным или структурным резервированием или без него, работающие в режиме разового, многократного, непрерывного, периодического использования и т. д. *Схемотехническими ограничениями*, задаваемыми электрической схемой, являются элементная база (быстродействие, токи, помехоустойчивость, термочувствительность, стабильность параметров и т. д.), число и типы функциональных узлов, требования к их взаимному расположению и т. д.

Рис. 1.1. Графическое представление системной математической модели конструкции



Конструкторские ограничения: масса и габариты; рекомендуемые типы базовых несущих конструкций, методы реализации электрических связей; ограничительные перечни на материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия; требования к внешнему виду; патентоспособность и т. д. *Технологические ограничения:* требование преемственности конструкций, тип производства, вид технологических процессов, время запуска в производство, повторяемость выпуска, номенклатура освоенных технологических процессов и их стабильность, требования по автоматизации и т. д. *Эксплуатационные ограничения:* объект установки, уровень дестабилизирующих факторов — механических, климатических, тепловых, радиационных, электромагнитных воздействий; технологический уровень ремонтной базы, квалификация обслуживающего персонала, требования по ремонтпригодности конструкции, время хранения, время эксплуатации (ресурс) и т. д.

Система показателей качества Z определяет пригодность конструкции для использования ее по тому или иному назначению, что регламентируется техническим заданием на разработку конструкции. Каждый показатель зависит от характера конструкции и ограничений: $Z = \varphi(F, X_i, Y_j)$.

§ 1.3. Системный подход при конструировании РЭС

Методология поиска оптимального варианта конструкции РЭС основана на использовании системного подхода. *Сущность системного подхода при конструировании* современных РЭС заключается в том, что отыскивается оптимальное (наилучшее) решение при одновременном учете нескольких различных групп факторов и ограничений, которые раньше (для аппаратуры первых поколений) учитывались на различных этапах проектирования (разработка структурной и принципиальной схем, конструирование, разработка технологического процесса). При этом структура РЭС, его конструкция и технология изготовления рассматриваются с точки зрения оптимальности всей системы.

Системный подход использовался и при конструировании аппаратуры первых поколений, например при минимизации объема блока, содержащего два (и более) трансформатора разной мощности. Трансформатор минимального объема имеет форму куба.

При наличии нескольких разных трансформаторов кубическая форма наибольшего трансформатора не позволяет эффективно использовать весь объем блока. Следовательно, блок имел оптимальный объем при неоптимальной форме отдельных трансформаторов.

Переход на элементную базу МЭА (микроэлектронные изделия) позволяет: 1) расширить возможности системного подхода; 2) распространить его на РЭС в целом, например изменить принципы организации РЭС — перенести выполнение части функций с наземной аппаратуры на бортовую; заменить в радиолокационной станции антенну с механическим сканированием луча на активную фазированную антенную решетку с электрическим сканированием луча; производить передачу информации не в аналоговой, а в цифровой форме; снизить стоимость и массогабаритные характеристики при одновременном повышении надежности путем замены механических и электромеханических компонентов электронными (в микроэлектронном исполнении), использования элементов в интегральном исполнении с новыми свойствами (транзисторных пар, изготовленных в едином технологическом цикле, жидкокристаллических индикаторов и т. д.). Все это позволяет улучшить показатели качества РЭС, но одновременно требует коренного изменения конструкции. В конечном счете структура РЭС и ее конструкция зависят от технологических возможностей производства. Поэтому при системном подходе подразумевается учет при конструировании не только схемотехнических, но и технологических факторов. Так, при проектировании полупроводниковой ИС разработчик должен оценить выгоду от использования транзистора как резистора или диода и, конечно, должен уметь рассчитывать взаимное влияние элементов.

Эффективность использования системного подхода при конструировании зависит от вида РЭС. Наиболее эффективен системный подход для проектирования цифровых устройств, обладающих регулярной структурой. Это позволяет осуществлять моделирование при отыскании оптимальной конструкторской иерархии с учетом задержки распространения сигнала, перекрестных помех, различных ограничений: технологических (например, нестабильности волнового сопротивления линий связи), эксплуатационных (внешних дестабилизирующих воздействий) и др. Для аналоговых устройств ввиду меньшей регулярности структур и большего разнообразия выполняемых функций (генератор, модулятор, компаратор и пр.), а также более широких диапазонов мощностей и частот сигналов труднее использовать системный подход. В целом использование системного подхода при конструировании РЭС повысило роль конструктора и технолога, которые стали принимать участие в создании РЭС с самых ранних этапов. Это, однако, предъявляет более высокие требования к конструктору и технологу РЭС, которые должны знать выгоды

«горячего» резервирования (например, «тройной» логики) или использования специальных корректирующих кодов, позволяющих работать при наличии части неисправных элементов (уже на этапе производства или при эксплуатации изделия).

Поиск оптимального варианта связан с определением экстремума одного или нескольких показателей качества. Различают локальный и глобальный экстремумы; локальных экстремумов может быть несколько, а глобальный существует только один. Часто для того, чтобы изделие удовлетворяло заданному показателю качества, достаточно нахождения локального экстремума. При этом получается не оптимальное, а просто приемлемое решение, но затраты времени и средств сокращаются на порядок или несколько порядков при незначительном проигрыше в качестве изделия. Сложность поиска глобального экстремума обусловлена следующими причинами: 1) сложностью РЭС (большое число возможных решений); 2) наличием, как правило, не одного, а нескольких показателей качества, которые часто противоречивы или имеют разную степень значимости; 3) тенденцией к сокращению цикла и стоимости новой разработки при одновременном повышении требований к качеству (надежности, стоимости, энергопотреблению и т. д.); 4) тенденцией к сокращению морального срока службы РЭС. Для облегчения поиска оптимального или просто приемлемого варианта конструкции РЭС используют отработанные (базовые) конструкции, определенные виды материалов и компонентов, стандартные технологические процессы и схемотехнические решения, известные физические принципы. Однако при поиске конструкции с параметрами, значительно лучшими достигнутых, ищут принципиально новые решения.

Виды работ конструктора. В работе конструктора тесно переплетены различные ее составляющие: творческая I (анализ и синтез различных вариантов); техническая II (расчеты, выпуск конструкторской документации); организационная III (руководство исполнителями, проверка, согласование конструкторской документации, передача в архив); производственная IV (сопровождение изготовления изделия); корректировочная V (изменение конструкторской документации в связи с исправлением ошибок, заменой материалов, усовершенствованием конструкции и т. д.). Для различных условий конструирования соотношение этих составляющих по трудоемкости (рис. 1.2) несколько различается: творческая — 5...25%, техническая — 10...50, организационная — 5...15, производственная — 10...50, корректировочная — 10...20%. Трудоемкость технической составляющей приведена для случая разработки конструкторской документации ручными (рутинными) спосо-
бами.

При использовании ЭВМ трудоемкость технической части может быть уменьшена.

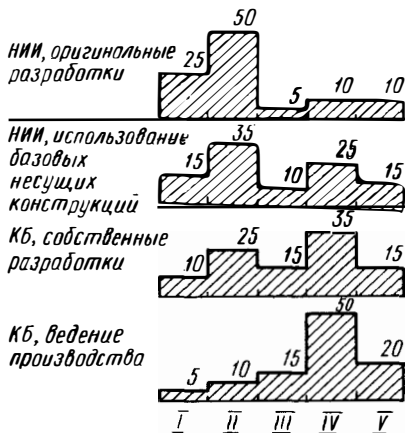


Рис. 1.2. Трудоемкость различных видов работы конструктора (примерные процентные соотношения)

Наиболее сложной и важной является творческая часть работы, при выполнении которой решаются две задачи: 1) анализ — изучение поведения системы с заданной структурой, т. е. изучение зависимости показателей качества от отдельных факторов и их взаимосвязи; 2) синтез — определение оптимальной структуры системы (конструкции) при заданных показателях качества и ограничениях. При анализе отыскивается (см. рис. 1.1) зависимость $Z = \varphi(X, Y)$, $F = \text{const}$. В результате анализа определяются: цели и задачи конструирования; существующие решения; возможные пути достижения поставленной цели (эскизная проработка); ориентировочная (долгосрочная) оценка путей достижения цели и выбор наиболее перспективного пути (обычно такая оценка осуществляется экспертами). При синтезе отыскивается функция вида $F = \varphi(X, Y, Z)$. На этом этапе осуществляется генерация некоторого числа новых вариантов конструкций. Это наиболее творческий этап. Чаще всего он осуществляется с помощью набора эвристических приемов, которые имеет каждый конструктор. На этом этапе наиболее полно проявляются интуиция, опыт и творческие способности конструктора, часто усиленные благодаря коллективному творчеству («мозговой штурм», «синектика» и др.) и использованию диалогового режима между человеком и ЭВМ. При генерации вариантов подбираются такие параметры компонентов и такие взаимосвязи, которые обеспечили бы получение конструкции заданного качества.

Как при анализе, так и при синтезе осуществляются оценки каждого варианта, т. е. для каждого параметра определяется функция $Z = \varphi(X, Y, F)$. При синтезе оценки должны быть более точными, чем при анализе, и должны обеспечивать прогнозирование ожидаемых результатов. Если вариант признается неприемлемым, то осуществляют синтез нового варианта и его оценку. Обычно

приемлемое решение получается после нескольких итераций, особенно при оптимизации по нескольким критериям.

В настоящее время наиболее полно разработаны методы анализа, а методы синтеза основаны, как правило, на использовании эвристических (неформальных) методов.

Анализ вариантов конструкции можно осуществить логико-расчетным методом, эвристическим методом и методом моделирования.

Эвристический метод — метод экспертных оценок — заключается в том, что группе специалистов-экспертов ставят ряд вопросов, касающихся современного состояния или перспектив развития. Этот метод целесообразно использовать в случае достаточно систематизированной информации о прошлом и в случае, когда научно-техническое развитие в большей степени зависит от принимаемых решений, чем от имеющихся технических возможностей.

Метод моделирования характеризуется тем, что анализ ведут не на самих объектах, а на их моделях, чаще всего математических (иногда физических).

В процессе конструирования используется как *мыслительная деятельность*, так и *физический труд*. Мыслительная деятельность конструктора имеет место на всех этапах работы, но доминирует в творческой части. Каждая новая конструкция обычно содержит компоненты уже существующих конструкций и новые компоненты. На ранних этапах разработки, когда необходимо определить (синтезировать) новые компоненты, чаще всего используют эвристические методы, основанные на интуиции и требующие проверки методом проб и ошибок. Эти методы позволяют произвести мысленную экстраполяцию за пределы известного. При использовании эвристического приема конструктор выступает как волшебник, деятельность которого невозможно формализовать (рис. 1.3).

Логико-расчетные методы основаны на использовании формализованных процессов, повторное применение которых дает сравнимые результаты. В этом случае конструктор может быть представлен вычислительной машиной, работающей по определенному алгоритму (рис. 1.3). Иногда эта часть работы может быть передана ЭВМ. Однако вычислительной машины, идентичной мозгу человека, не существует. Человек может мыслить словами, образами (предметами); средняя скорость мышления человека составляет 400 слов в минуту. Человеку присущи многоканальность обработки информации, ассоциативность и гибкость (неформальность) мышления, приспособленность к широкому диапазону изменения информации, высокая надежность выделения полезной информации на фоне помех, способность принятия решения в нестандартных ситуациях, учет вероятности событий и предсказания их развития (прогнозирование).

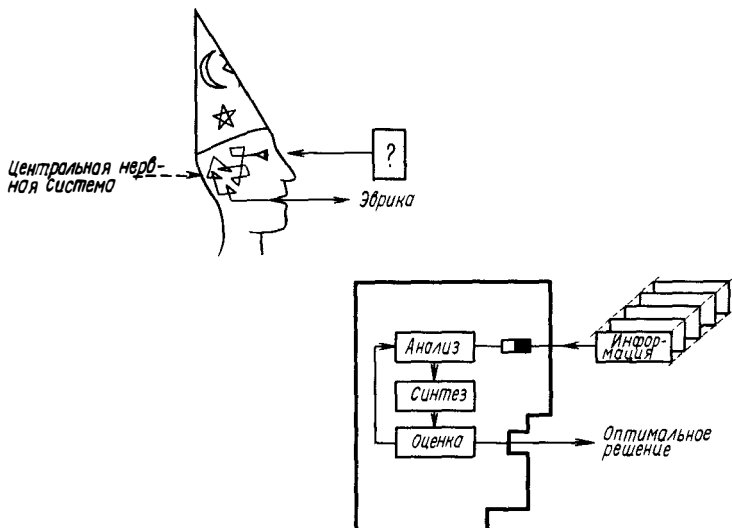


Рис. 1.3. Представление мыслительной деятельности конструктора

Логико-расчетный метод интерполяции и экстраполяции основан на переносе динамики и состояний, имевших место в недалеком прошлом, на настоящее и будущее. Этот метод наиболее применим в случаях, когда не ожидается скачкообразных изменений и не требуется длительного прогноза.

Логико-расчетные методы используют на завершающих этапах конструирования, когда задача сформулирована и необходимо ускорить детальные и многократно повторяющиеся операции проектирования (инженерные расчеты прочности, помехо- и теплоустойчивости, влагозащиты) или выбрать оптимальный вариант. Использование логико-расчетных методов на начальных этапах проектирования чревато потерей гибкости принятия решения в условиях неопределенности исходных данных. Так как при постоянно возникающих новых задачах эта неопределенность имеет место, то очевидно, что роль эвристических методов и приемов в будущем не уменьшится. Необходимо отметить, что как эвристические, так и логико-расчетные методы имеют, как правило, творческий характер.

Различают следующие этапы мыслительной деятельности человека: 1) подготовка, накопление знаний по данному вопросу, формулировка задачи (анализ и начальный этап синтеза); 2) концентрация усилий — упорная работа с целью синтеза нового решения (генерация вариантов, их оценка); 3) передышка — период умственного отдыха, отвлечение от решаемой задачи; 4) озарение (открытие, эврика) — получение новой идеи или изменение уже известной, что и ведет к получению искомого решения; 5) доведение работы

до конца, обобщение, оценка результатов. Характерным является то, что озарение (открытие) обычно следует за передышкой, а также неформализуемый характер эвристической деятельности.

Трудности мыслительной работы заключаются в большем утомлении от напряженного умственного труда, чем от физического, а также невозможности охвата больших объемов информации. Первая трудность связана с физиологическими возможностями человека, который легче переносит физические нагрузки, чем умственные, вторая обусловлена большим объемом информации и ее рассредоточенностью. Часто легче изобрести что-то заново, чем найти старое решение. В результате снижается доля крупных изобретений, сужаются темы диссертаций, облегчаются требования к конструкциям и т. д.

Весь комплекс задач, решаемых конструктором при синтезе конструкции, можно разделить на две группы: 1) генерация возможных вариантов конструкции (комбинация сочетаний исходных факторов, ограничений и связей между ними); 2) анализ и оценка каждого варианта конструкции для выбора наилучшего.

Генерация новых вариантов является одним из самых творческих этапов работы конструктора. Методы генерации вариантов прошли в своем развитии ряд этапов и продолжают развиваться в настоящее время. Первыми конструкторами были кустики и ремесленники. Основным способом их конструирования был метод «проб и ошибок», заключающийся в экспериментальной переделке отдельных частей изделия и оценке результатов этих переделок. Вся информация о конструкции содержалась в самой конструкции и голове ремесленника. В результате использования этого метода в течение веков создавались шедевры (предметы античного мира и т. д.). Основным недостатком метода была нераздельность экспериментирования (конструирования) и производства. Это обуславливало высокую стоимость хорошей конструкции и большие затраты времени на ее создание. Так как качество конструкции зависело от искусства ремесленника, то хорошие конструкции были уникальны; число их было невелико, стоимость высока. Отсутствие технической документации вело к тому, что, например, еще в середине XVIII в. изделия военной техники воспроизводились по образцу, который возили с завода на завод.

Создание в середине XIX в. *чертежей* ознаменовало новый этап в развитии методов конструирования, так как позволило производить экспериментирование на масштабном чертеже и тем самым отделить его от производства. Чертежный метод конструирования позволил также осуществить разделение труда не только между конструкторами и производственниками, но и среди самих конструкторов и самих производственников. Это способствовало объединению усилий групп людей и созданию более сложных изделий в более короткие сроки с меньшими затратами средств и времени (экспериментирование на бумаге), с более высоким ка-

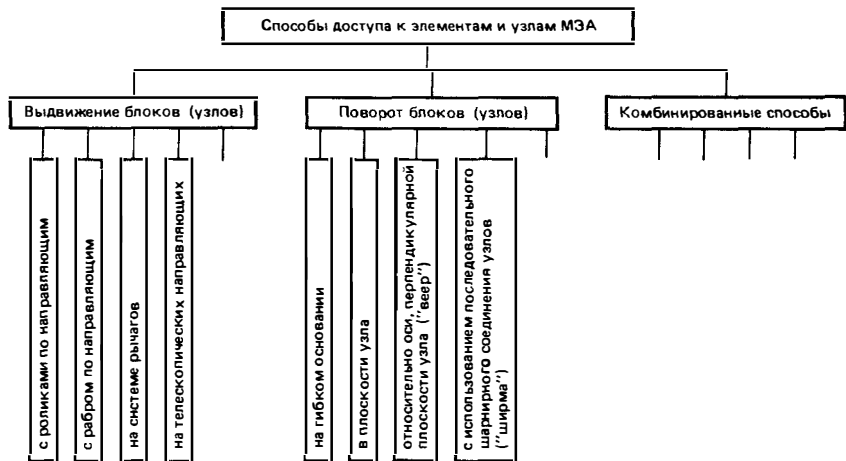


Рис. 1.4. Пример диаграммы идей при обеспечении ремонтпригодности РЭС

чеством благодаря специализации конструкторов. Сократить время конструирования позволило то обстоятельство, что, используя чертеж, конструктор может игнорировать почти все поле поиска и сконцентрировать внимание на тех небольших его участках, где можно ожидать приемлемых решений. С помощью чертежа конструктор может изменить структуру изделия в целом вместо того, чтобы, подобно ремесленнику, вносить в него мелкие коррективы. Кроме того, появилась возможность фиксации информации. Сложность современной техники, в частности РЭС, большое число факторов, учитываемых при конструировании, и возможных вариантов конструкции поставили вопрос о разработке новых методов, позволяющих осуществить еще большую концентрацию усилий конструкторов, еще большее разделение их труда при одновременном увеличении эффективности контроля процесса конструирования благодаря формализации выбора наилучших решений. Это привело к созданию новых методов конструирования, основанных на использовании таких разделов науки, как системотехника, методы исследования операций, теория решений, сетевое планирование, эргономика, техническая эстетика, и многих других из новейших отраслей науки, техники, искусства, прежде всего методов генерации идей.

Новые методы генерации идей основаны на использовании уникальных возможностей человеческого мышления и усилении специализации и концентрации усилий конструкторов. К ним, в частности, относятся диаграмма идей, матрица идей, ассоциация, инверсия, метод мозгового штурма, синектика.

Использование *диаграммы идей* основано на том, что очень трудно думать одновременно над несколькими проблемами, хотя

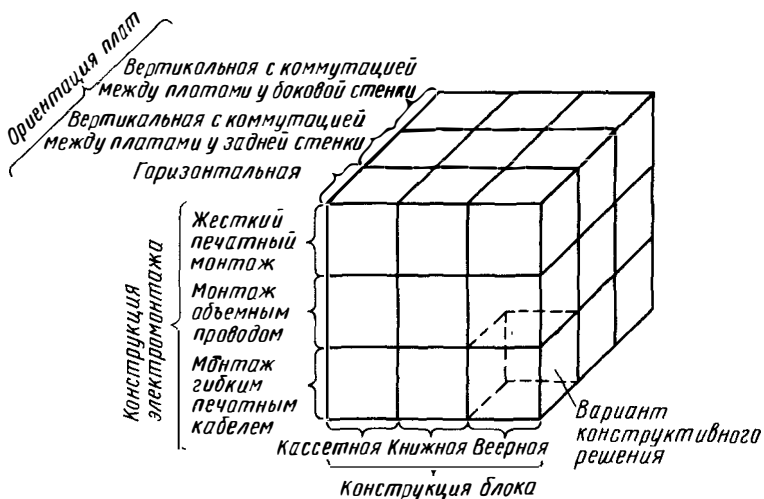


Рис. 1.5. Пример матрицы идей при выборе конструкции блока

глаз человека может воспринимать одновременно бесконечно большое число предметов и отличать их друг от друга. Это позволяет представить возможные варианты конструкции РЭС в виде некоторой диаграммы (рис. 1.4) с целью последовательного анализа наиболее перспективных вариантов. При этом может быть обнаружена возможность создания новой конструкции путем нахождения неиспользованных вариантов или новых сочетаний различных вариантов.

Матрица идей есть средство учета различных вариантов путем упорядоченного их перебора. Допустим, что на выбор конструкции РЭС влияют три группы факторов: ориентация плат, конструкция электро монтажа, конструкция блока (рис. 1.5). В этом случае матрица идей может быть представлена в виде куба, каждое ребро которого содержит факторы одной группы. Каждый элементарный кубик является вариантом конструкции. В данном случае их 27. Введение ограничений позволяет сократить область возможных решений. Например, выбрав горизонтальную ориентацию плат и жесткий печатный монтаж, можно уменьшить число возможных вариантов конструкции до трех (по числу видов конструкции блока).

Метод ассоциации основан на способности человека так преобразовывать полученные ранее знания, чтобы их можно было использовать для новых условий. Примером является использование медицинского шприца для подачи герметизирующего компонента в труднодоступные места при производстве РЭС или конструкция обтекателей антенны РЛС в виде ячеистой структуры (типа пчелиных сот).



Рис. 1.6. Неправильное взаимодействие руководителя и члена группы при сеансе мозгового штурма

плоотвод (габариты РЭС при этом могут даже снизиться за счет уменьшения габаритов системы охлаждения).

Метод мозгового штурма основан на возможности получения новых идей путем творческого сотрудничества участников организованной группы и проводится в виде беседы, когда каждый свободно выдвигает предложения, а критика их запрещена. Этот метод наиболее эффективен на начальных этапах конструирования, когда задание полностью еще не определено. Наилучшие результаты получаются, когда группа в 5...10 человек работает не более 1 ч. Для проведения сеанса мозгового штурма нужны руководитель, инициатор и магнитофон. Руководитель ни в коем случае не должен делать критических замечаний (рис. 1.6). Инициатором может быть один из участников группы. Если сеанс мозгового штурма оказался безуспешным, то основная вина в этом лежит на руководителе. Участники мозгового штурма тщательно подбираются заранее.

Метод синектики основан на увеличении продуктивности умственной деятельности человека при использовании аналогий. Обычно решение ищет группа специалистов. Например, руководитель группы ставит задачу обеспечить ремонтпригодность конструкции РЭС в условиях невесомости. Для имитации этого в наземных условиях предлагается выполнить отверстие в куске пенопласта, подвешенного на нитке. Традиционные методы выполнения этой работы с помощью дрели не подходят. В конце концов кто-то из членов группы предлагает прожечь отверстие сигаретой. Далее группа исследует возможность использования этого принципа для реализации конструкции, ремонт которой осуществляется электронным лучом.

Метод инверсии предусматривает рассмотрение задачи с противоположных позиций по отношению к принятым, например: сравнение параметров конструкции начиная не с нижнего значения, а с верхнего; определение не формы блока в зависимости от отведенного для него объема, а наоборот; не уменьшение, а увеличение избыточности адресных формирователей полупроводниковой памяти (при этом быстродействие из-за уменьшения длины линий увеличится); обеспечение температурной стабильности не охлаждением, а нагреванием кварцевой пластины до определенной температуры; не увеличение плотности компоновки ЭРЭ на плате, а уменьшение ее, что позволяет улучшить ремонтпригодность и облегчить те-

§ 1.4. Использование ЭВМ при конструировании и производстве РЭС

Необходимость дальнейшего совершенствования методов конструирования связана с тем, что из всего времени на конструкторское и технологическое проектирования в среднем только 10% времени конструкторов и технологов тратится на творческую работу, а 90% уходит на поиск нужной информации, проведение расчетов, оформление документации, ее согласование, изменение и исправление. Так, при разработке топологии ИС вручную конструктор делает в среднем одну ошибку на сто координат, определяющих топологию рисунка. Это становится особенно ощутимым при разработке СБИС, число элементов которых достигает $10^6 \dots 10^7$, а число координат топологии рисунка на один-два порядка больше.

Достижения в области разработки вычислительных систем, создание автоматизированных систем проектирования (САПР) и управления (АСУ) подготовили предпосылки не только для освобождения человека от малопродуктивной ручной (рутинной) работы, но и для создания комплексного автоматизированного предприятия, структура которого представлена на рис. 1.7. Функционирование таких предприятий связано с полной перестройкой деятельности конструкторов и технологов, отмиранием ряда их традиционных функций, необходимостью приобретения конструкторами и технологами новых профессиональных знаний на базе всестороннего овладения ЭВМ.

Одной из основных систем такого предприятия является система автоматизированного проектирования (САПР), которая представляет собой сложный комплекс технических средств, операторов и обеспечения: методического (правил отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования), математического (совокупности математических методов, алгоритмов и математических моделей), лингвистического (машинных языков, терминов, определений), информационного (баз данных и систем управления ими), организационного (состава проектных подразделений и связей между ними).

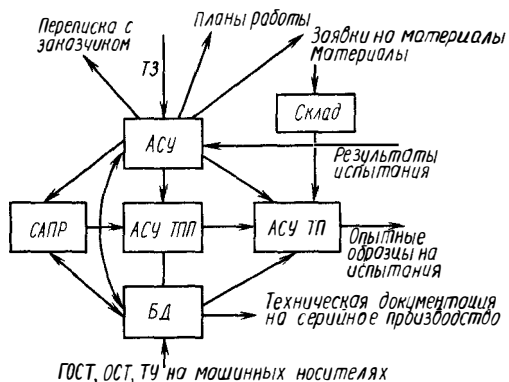


Рис. 1.7. Структура комплексного автоматизированного предприятия

При проектировании каждое РЭС можно рассматривать в нескольких аспектах: функциональном, конструкторском, технологическом. При функциональном проектировании рассматриваются вопросы организации системы РЭС, ее функционально-логической структуры, обоснования схмотехнических решений. При конструкторском проектировании осуществляется распределение элементов по уровням разукрупнения РЭС, размещение элементов и трассировка электрических связей на каждом уровне, выполняются расчеты (тепловые, прочностные и пр.), выпускаются конструкторская текстовая и графическая документации, а также программы управления технологическими автоматами (графопостроителями, микрофотонаборными установками, фрезерными и сверлильными станками, сварочно-монтажными робототехническими комплексами, контрольными автоматами) на перфолентах или магнитных лентах.

Сложность решаемых задач обуславливает иерархичность структуры САПР, которые могут иметь следующие уровни технических средств: центральный вычислительный комплекс (ЦВК), автоматизированное рабочее место (АРМ), технологический комплекс (ТК) периферийного программно-управляемого оборудования (технологические автоматы). САПР могут быть одноуровневыми, двухуровневыми и трехуровневыми. Одноуровневые САПР организуются на основе ЦВК или АРМ, двухуровневые используют системы ЦВК—АРМ, ЦВК—ТК, АРМ—ТК. Наибольшие возможности имеют трехуровневые САПР на основе технических средств ЦВК—АРМ—ТК.

САПР на основе ЦВК обычно работают в автоматическом режиме, а на основе ЦВК—АРМ или АРМ—ТК—в диалоговом (интерактивном). Диалоговые системы являются более гибкими. В полностью автоматических системах доля полностью разведенных печатных трасс составляет 80...85%, а в интерактивных—92...98%. Однако интерактивные системы требуют использования программ контроля ошибок, которые могут быть внесены человеком.

В качестве технических средств на уровне ЦВК обычно используют быстродействующие универсальные ЭВМ со штатным набором периферийных устройств (ЕС-1065, БЭСМ-6 и другие) или быстродействующие мини-ЭВМ («Электроника-82»). На уровне АРМ используются (рис. 1.8) мини-ЭВМ (СМ-3, СМ-4, М-400, «Электроника-100/25», «Электроника-79», «Электроника-80» и др.) и микроЭВМ («Электроника-60» и др.) (рис. 1.9, 1.10).

В настоящее время для проектирования РЭС используется ряд САПР (ПРАМ-1—ПРАМ-9, КОМПАС-82 и др.). Для примера рассмотрим возможности САПР ПРАМ-5.3, которая осуществляет конструкторское и технологическое проектирование электронных аналоговых схем микросборок, печатных плат, устройств функциональной микроэлектроники на поверхностных

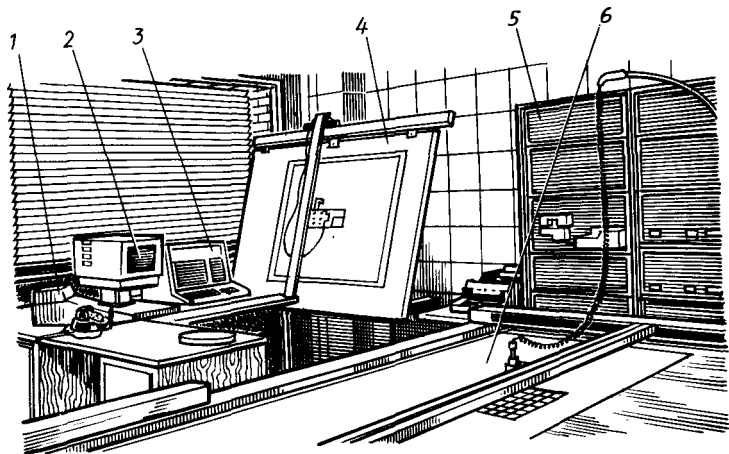


Рис. 1.8. Внешний вид системы «Кулон»:

1—пульт управления; 2—графический дисплей; 3—алфавитно-цифровой дисплей; 4—кодировщик графической эскизной информации; 5—мини-ЭВМ «Электроника 100/25»; 6—графопостроитель

акустических волнах, маршрутных и операционных технологических процессов изготовления плат микросборок, прецизионных фотошаблонов устройств функциональной микроэлектроники, текстовых документов любых форм, программ на перфолентах для управления технологическими автоматами, графической конструкторской документации. В одноуровневом варианте САПР в качестве технической базы используется ЕС ЭВМ стандартной конфигурации с оперативной памятью не менее 512 Кбайт. В двухуровневом варианте используется дополнительно АРМ. В качестве технологических автоматов используются графопостроители, координатографы, программно-управляемые фрезерные и сверлильные станки, установки тестового контроля печатных плат и узлов.

При автоматизированном конструкторском проектировании можно выделить этапы обработки информации, подробно изложенные в разделе «руководство пользователя» каждого пакета прикладных программ, входящего в САПР: 1) ввод и синтаксический анализ информации о проектируемом объекте; 2) формирование базы данных проектирования; 3) формирование исчерпывающей информации об объекте проектирования в виде, удобном для выполнения проектных процедур; семантический контроль ее; 4) выполнение проектных процедур; 5) занесение проектной информации в архив; 6) выпуск документации.

Ввод и синтаксический анализ (контроль) информации о проекте включает следующие процессы: 1) ввод в ЭВМ информации о проекте и перекодировка его во внутримашинное представление;

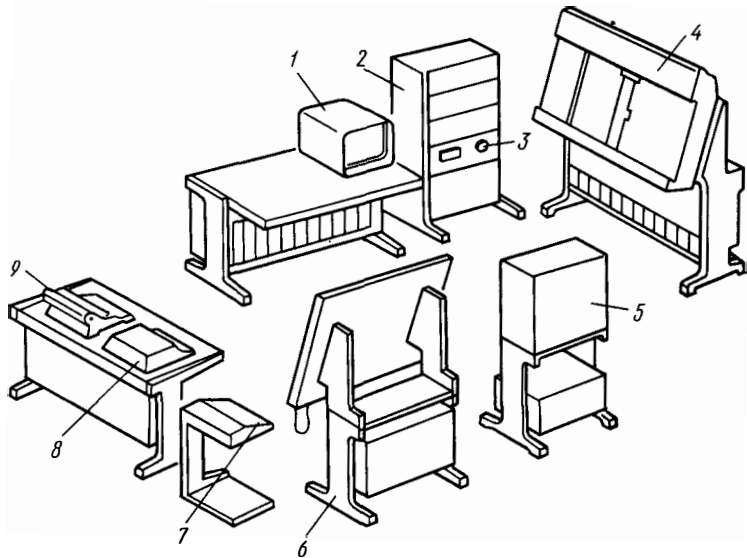


Рис. 1.9. Структура АРМ конструктора:

1— устройство преобразования графической информации; 2— лентотека; 3— фотосчитывающее устройство; 4— графопостроитель; 5— лентотека и перфоратор; 6— полуавтомат кодирования графической информации; 7— клавиатура символов; 8— клавишная ЭВМ; 9— электрическая пишущая машинка

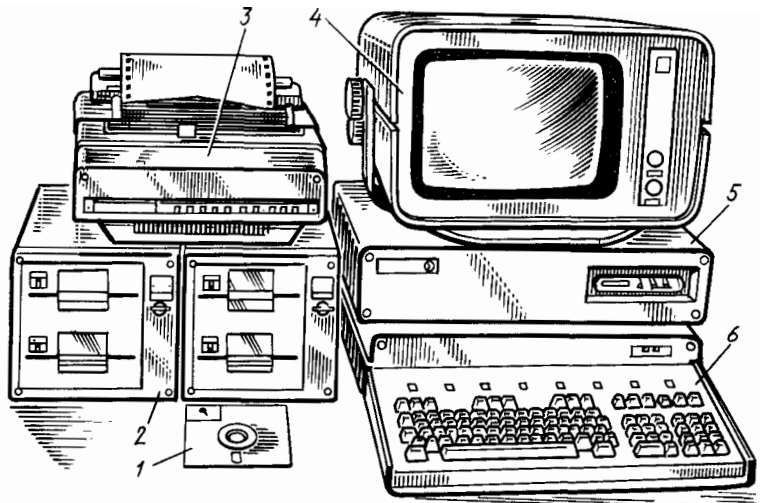


Рис. 1.10. Диалоговый вычислительный комплекс ДВК-2М:

1— гибкий магнитный диск; 2— блок накопителя информации (НГМД); 3— устройство печати на термочувствительной бумаге; 4— дисплей; 5— процессор; 6— съемный переносной пульт управления комплексом

при этом осуществляется контроль правильности кодирования вводимой информации; 2) запись вводимой информации в базу данных САПР в виде, удобном для последующего анализа; при этом контроль в основном связан с полной вводимой информацией и ориентирован на конкретную конфигурацию вычислительных средств; 3) синтаксический контроль (анализ), когда распознается принадлежность входного теста формализованному языку и формируется определенный набор таблиц, используемых на последующих этапах проектирования.

Формирование базы данных проектирования требует ввода трех видов информации: 1) определяющей структуру и назначение системы проектирования (выбор комплекса программных и аппаратных средств)—перечень сведений о технологии производства, форме документов, комплектующих изделиях, характере аппаратуры для выполнения документации (алфавитно-цифровое печатающее устройство, графопостроитель, координатограф и т. д.); 2) о типе изделия, его параметрах, стандартных узлах, форме документов и т. д.; обычно эти сведения хранятся в базе данных САПР; 3) определяющей сущности проектируемого объекта с учетом его отличительных особенностей; эта информация является переменной для различных объектов (перечень элементов, схема соединений, сведения о фиксированных цепях и местах, запрещенных для трассировки, и т. д.). При этом учитываются *ограничения на конструкцию, обусловленные используемой САПР* (тип ЭВМ, емкость оперативной памяти, быстродействие алгоритмов). Например, для САПР ПРАМ-5.3/ДПП, предназначенной для автоматизированного конструкторского проектирования двусторонних печатных плат, необходимо учитывать максимальное число элементов на плате (до 254), габаритов элементов (не более 127), контактов одного элемента (не более 254) цепей схемы (не более 32 768), максимальные габариты платы (не более 511 × 511 шагов сетки трассировки—261121 условных квадратов) и размеры контактных площадок, ширину проводников и зазоров и т. д.

Для пакета прикладных программ «Проводник», входящего в состав САПР ПРАМ-1.2 и предназначенного для проектирования электрических соединений блоков и шкафов, к основным ограничениям относятся тип проводников (одиночные или бифилярные), метод контактирования (накрутка), вид блоков (одно- или многорядные), число ячеек в ряду (до 30), число рядов ячеек (до 8), число контактов соединителя (до 300), число сигнальных цепей блока (до 9900) и т. д. При изменении или модернизации алгоритма, замене на более быстродействующую ЭВМ с большей емкостью памяти ограничения могут меняться.

Формирование информации для обеспечения процесса проектирования состоит в преобразовании символьного представления объекта в структуры данных, удобные для последующего проектирования. Этот процесс называется транслированием.

Проектные процедуры включают последовательность операций, решающих конкретную задачу (компоновку, размещение, трассировку и т. д.). Проектная информация записывается в архив и выпускается конструкторская документация (сборочный чертеж, спецификация, ведомость покупных изделий, таблица цепей, эскиз и таблица размещенных элементов, эскиз трассировки и таблица неразведенных цепей, перечень элементов электрической схемы, перфолента для изготовления фотошаблонов, перфолента для сверлильного станка, перфолента для контрольного оборудования, перечень сформированных документов, таблица замен эквивалентных контактов, матрица соединений элементов схемы, архивный набор данных).

Для иллюстрации возможностей автоматизированного конструкторского проектирования рассмотрим затраты времени на проектирование печатной платы на АРМ 15УТ-4-017. Плата имеет размеры 240 × 320 мм, на ней установлено 244 элемента, которые объединены с помощью 782 электрических соединений. Общее время на проектирование составило 101 ч 4 мин, в том числе на подготовку исходных данных 52 ч, на ввод и редактирование данных 5 ч 12 мин, на автоматическое размещение элементов 3 ч 52 мин. Улучшение размещения компонентов и доработка электрических связей проводились в интерактивном режиме, поэтому затраты времени на размещение и доработку электрических соединений зависят и от квалификации оператора. При проектировании такой платы вручную затраты времени в 3 ... 4 раза больше. При выполнении проектирования на более мощной системе «Кулон-4», использующей ЭВМ «Электроника-82», затраты времени в несколько раз меньше.

Автоматизированные системы технологического проектирования развиты меньше, что объясняется трудностью формализации и алгоритмизации технологических задач (отсутствием достаточно четкой информации о технологических процессах). Тем не менее с развитием гибких производственных систем (ГПС) разрабатывается система кодирования технологической информации о деталях и узлах РЭС, а также требования к ним, накладываемые ГПС.

Влияние ГПС на конструкцию РЭС. Под ГПС понимается производственная единица (линия, участок, цех, завод), функционирующая под действием многоуровневой автоматической системы управления, обеспечивающей также программную перестройку технологического процесса при смене объекта производства. Для ГПС не требуется обычной сопровождающей документации, ее заменяет программа, записанная на машинных носителях (перфолентах, магнитных лентах). Экономический эффект при использовании ГПС достигается в результате: 1) увеличения сменности работы в 2 ... 2,5 раза, коэффициента использования оборудования до 0,85 ... 0,9; 2) сокращения количества обору-

дования в 6 ... 7 раз; производственных площадей в 4 ... 5 раз; числа работающих — в 3 раза, снижения себестоимости за счет увеличения производительности труда в 2 ... 2,5 раза; 3) уменьшения доли тяжелого ручного труда и лучшего использования интеллектуальных способностей человека. Повышение производительности труда делает экономически выгодным использование ГПС при мелко- и среднесерийном производстве.

При использовании ГПС к конструкциям элементов и узлов РЭС предъявляется ряд требований. Необходима совместимость ГПС с САПР, АС ТПП и др. Важнейшим требованием является типизация и унификация деталей, элементов и сборочных узлов. Основой технологической унификации является классификация деталей по технологическим признакам: форме, габаритам, типоразмерам, применимости в изделии, рядам параметров, требованиям к точности обработки и шероховатости рабочих и установочных поверхностей и т. д. В результате сравнения детали с классификатором ей может быть присвоен определенный классификационный шифр, на основании которого составляется программа управления ГПС.

Чтобы конструкция, предназначенная для изготовления на ГПС, была технологичной, требуется учесть ограничения, обусловленные спецификой автоматизированного оборудования; допустимые типоразмеры деталей и компонентов, варианты и точность их взаимной ориентации, наличие элементов фиксации относительно оборудования, зон для размещения рабочих и фиксирующих органов манипуляторов и т. д. Например, *для робототехнического комплекса сборки печатных плат необходимо учитывать:* конструкцию устанавливаемых на плату элементов (ИС со штыревыми или планарными выводами, тип корпуса, наличие ключа для ориентации; электрорадиоэлементы с осевыми выводами и т. д.); вид формовки и обрезки выводов элементов, характер облуживания — с дозировкой припоя или без нее, характер крепления — загибкой выводов, за счет трения, клейкой и т. д.; типоразмер печатной платы; требования на параметры контактных площадок печатных плат при облуживании; точность ориентации компонентов относительно печатной платы (0,05; 0,02; 0,1 мм и т. д.); характер ориентации компонентов относительно платы (одинаковая или с вариантами); размер свободной зоны для размещения направляющих (например, 5 мм); размер свободной зоны между элементами для размещения рабочих органов манипуляторов (например, по 2 мм на каждую сторону); диаметр и расположение фиксирующих отверстий на плате и т. д.

При установке бескорпусных элементов желательно использовать систему организованных выводов (жестких, на полиимидном носителе и т. д.); обеспечивать фиксацию элементов путем одинаковой их ориентации, системы посадочных мест,

реперных меток и т. д., устанавливать гибкие печатные шлейфы с помощью штырей, использовать вакуумные захваты и т. д.

Надежность работы автоматизированного оборудования требует стабильности размеров компонентов (прогиба плат, усадки полиимидных пленок и керамических структур, полимерных корпусов и т. д.). Особого внимания требует обеспечение возможности подключения к изготавливаемому узлу автоматизированного контрольно-измерительного оборудования. Иногда — при односторонней установке компонентов — площадки для подключения контактных устройств выполняются со стороны, противоположной той, на которой установлены компоненты. Конструкция печатного узла должна обеспечивать возможность групповой пайки.

Детали, подлежащие механической обработке на робототехнических комплексах, должны быть типовыми (нетиповые детали используются только в технически обоснованных случаях); деталь может заменять узел из нескольких деталей, что позволяет избежать операции сборки, но расход материала при этом увеличивается. При использовании робототехнических комплексов должны быть учтены параметры заготовки (габариты, масса, материал, твердость, сечение — круг, квадрат, шестигранник); количество и тип обрабатывающего инструмента (резцы, сверла, зенковки, фрезы и т. д.); количество и тип оснастки (зажимные патроны, схваты, измерительные приспособления и т. д.); варианты крепления деталей (по краям, посередине, за внешнюю или внутреннюю поверхность); характер элементов крепления на станке (пазы, выступы, отверстия); возможность контроля без снятия со станка; количество и тип операций, выполняемых на станке без съема, возможности этих операций по форме обрабатываемой поверхности (внешний диаметр, внутренний диаметр, длина, плоскость, конус, фаска, резьба, канавка, торец; взаимное расположение этих форм); допустимое число установов изделия, минимизация их числа; неточность, обусловленная несколькими установками; возможность совмещения конструктивных и технологических баз; стандартизация конструктивного исполнения элементов детали (фасок, пазов, отверстий и т. д.); расположение размерных цепей с учетом последовательности обработки элементов, недопущение начала размерной цепи от элемента, который обрабатывается последним.

Для обеспечения технологичности изделий, изготавливаемых с использованием *сборочно-монтажных ГПС*, необходимо выполнять следующие рекомендации: 1) если изделие невозможно собрать за один установ, то его целесообразно разбить на блоки, которые можно собирать одновременно и независимо; 2) максимально использовать ранее освоенные детали; 3) уменьшать число крепежных деталей, использовать соединения, максимально пригодные для автоматизированной сборки (запрес-

совку, клейку, пластическое деформирование, контактную сварку, упругие защелки и т. д.); 4) обеспечивать доступ к деталям устройств захвата, крепления, контроля; 5) упрощать форму деталей и узлов, что облегчает ориентацию, базирование, крепление, изготовление; 6) иметь удобные базовые поверхности и ключи для автоматической ориентации, это исключает необходимость переориентации базовой детали при сборке; 7) допуски и геометрические характеристики деталей и их поверхностей должны обеспечивать сборку по методу полной взаимозаменяемости; 8) на соединяемых деталях целесообразно выполнять центрирующие элементы (фаски, скосы, закругления кромок и т. д.); 9) если при сборке сопрягаемые поверхности не удастся использовать в качестве базовых, то на относительное положение этих поверхностей необходимо установить такие допуски, при которых погрешность базирования будет меньше влиять на положение сопрягаемых поверхностей.

Гибкая производственная система должна быть совместима (информационно, программно, аппаратурно) с САПР, АСУ ТПП, АСУ ТП и др. Информационная совместимость предусматривает создание единого банка данных, что весьма трудоемко. Кроме того, значительных усилий требует поддержание банка данных в работоспособном состоянии (исключение устаревших данных, внесение новых). Программная совместимость требует разработки трансляторов, позволяющих совместить программы, написанные на разных языках для различных частей машинного комплекса. Аппаратная совместимость особенно важна при унификации носителей информации в различных частях машинного комплекса (перфоленты, магнитные ленты, магнитные диски и т. д.), при вводе информации с дисплея (алфавитно-цифрового или графического) и клавишного пульта.

§ 1.5. Функциональная математическая модель конструкции РЭС

Особенностью современного подхода при конструировании РЭС является не только то, что в результате должен быть получен оптимальный вариант конструкции, но и то, что конструирование должно быть проведено в минимальные сроки и с минимальными затратами. Для этого в ряде случаев целесообразно использовать математическую модель конструкции и проводить ее анализ на ЭВМ. Под математической моделью физического объекта (моделью) понимается совокупность математических объектов (чисел, переменных, векторов, множеств и т. п.) и отношений между ними, отражающая свойства проектируемого объекта.

В настоящее время нет четкой классификации математических моделей. Однако при проектировании РЭС различают структурные, функциональные и технологические модели. По способу

получения модели делят на теоретические и эмпирические (экспериментальные). Теоретические модели создают на основе изучения физических закономерностей, а эмпирические — на основе внешних проявлений свойств объекта. Теоретические модели часто получить затруднительно ввиду сложности изучаемого явления и необходимости длительной работы значительного количества высококвалифицированных разработчиков. В ряде случаев это экономически невыгодно, так как усилия на приобретение новых знаний только тогда оправданы, когда убытки от незнания превышают затраты на приобретение знаний.

Одним из наиболее эффективных экспериментальных методов является получение модели с использованием многофакторного регрессионного анализа, основанного на планировании эксперимента. При построении математической модели конструкции РЭС эксперимент может быть пассивным (модель получается в результате анализа конструкторской документации существующих разработок) и активным (модель получается в результате изготовления и анализа минимального числа конструкций).

В обоих случаях для эксперимента выбираются образцы конструкций с минимальным числом факторов, варьируемых на двух фиксированных уровнях. Строится план эксперимента, в котором кроме сочетания уровней факторов отмечаются значения соответствующих этим сочетаниям показателей качества, число которых не ограничивается. Путем математической обработки результатов эксперимента находятся коэффициенты регрессии, связывающие факторы и показатели. В результате получается математическая модель в виде полинома первой, неполной второй или второй степени (более высокая степень полинома практически не нужна).

Примером функциональной математической модели конструкции, полученной с использованием многофакторного регрессионного анализа, является модель конструкции спирального проволочного радиатора (рис. 1.11), который используется для усиления теплоотвода от блоков с высокой плотностью компоновки мощных ИС. Спирали 2 припаиваются припоем 3 к теплоотводящим

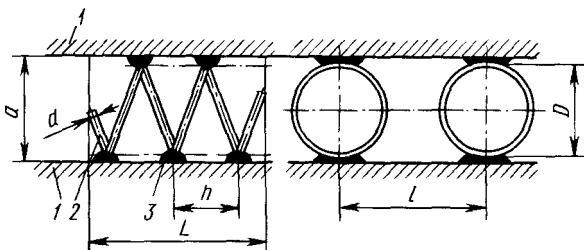


Рис. 1.11. Спиральный радиатор:
1—охлаждаемая поверхность; 2—спираль; 3—паяный шов

пластинам l , которые имеют хороший тепловой контакт с охлаждаемыми ИС. Охлаждение спиралей осуществляется потоком воздуха. Необходимость разработки экспериментальной модели обусловлена сложностью получения теоретической модели, достаточно точной для оптимизации конструкции теплоотвода, в связи с трудностями, возникающими при описании тепловых процессов с учетом аэродинамических параметров системы воздушного теплоотвода.

На основании априорных сведений для анализа были выделены следующие факторы: 1) длина спирали L ; 2) шаг намотки спирали h ; 3) расстояние между центрами соседних спиралей l ; 4) диаметр проволоки спирали d ; 5) расстояние между теплоотводящими поверхностями a ; 6) площадь теплоотводящих пластин S ; 7) число спиралей n ; 8) диаметр спирали D ; 9) толщина теплоотводящих пластин; 10) материал теплоотводящих пластин; 11) скорость воздушного потока V ; 12) выделяемая ИС тепловая мощность; 13) материал проволоки. Для уменьшения числа опытов число факторов было уменьшено путем выделения наиболее влияющих (критических). Пять факторов были переведены в ограничения из конструктивных соображений. Так, скорость воздушного потока в эксперименте была принята равной 3,9 м/с, пластины выполнены из латуни толщиной 0,5 мм, диаметр спирали выбран равным 8,5 мм, материал проволоки — сталь. Для уменьшения числа экспериментальных образцов и упрощения модели факторы S и n были исключены как несущественные в ходе отсеивающего эксперимента, проведенного на десяти образцах.

Оставшиеся пять факторов варьировались на двух дискретных уровнях: $d=0,5$ и $0,3$ мм; $h=1,8$ и $0,65$ мм; $L=40$ и 20 мм; $l=25$ и 12 мм; $a=7$ и 5 мм (значения a получались при деформации спирали с начальным диаметром 8,5 мм до 7 и 5 мм). Конструктивно изменялись четыре фактора (d , h , L , l). Для проведения эксперимента по полному факторному плану было изготовлено 16 (2^4) радиаторов. В качестве критерия качества конструкции была выбрана эффективность радиатора $\eta=(T_1-T_2)/T_1$, где T_1 и T_2 — температура теплоотводящей поверхности без радиатора и с радиатором соответственно. Полученная модель имеет вид

$$\eta = 4,5 + 39,2(d - 0,4) + 1,06(h - 1,22) + 0,18(L - 30) - 0,43(l - 18,5) + 1,26(d - 0,4)(L - 30) - 3,66(d - 0,4)(l - 18,5) - 0,2(h - 1,22)(l - 18,5) - 0,06(L - 30)(l - 18,5)$$

и позволяет найти зависимость эффективности проволочного радиатора от сочетания номинальных значений конструктивных факторов и от их технологического разброса. В первом случае расчет ведется при детерминированных значениях конструктивных факторов, во втором — при изменении этих факторов в пределах

технологических допусков по тому или иному вероятностному закону (чаще всего гауссовскому). Во втором случае анализ модели производится методом статистических испытаний (Монте-Карло) с использованием датчика случайных чисел и ЭВМ.

§ 1.6. Стандартизация конструкций РЭС

Стандартизация является важным звеном в системе управления техническим уровнем и качеством продукции, в том числе РЭС. Особое значение стандартизация приобретает в условиях перевода народного хозяйства на интенсивные методы, ускорения темпов научно-технического прогресса, сокращения сроков морального износа конструкций (РЭС гражданского назначения—до 6...8 лет; технологического оборудования—до 4...5 лет; изделий специального назначения—до 2...3 лет), что требует сокращения сроков конструирования и внедрения при одновременном улучшении качества конструкций.

По определению Международной организации по стандартизации, *стандартизация*—это процесс установления и применения правил с целью упорядочения деятельности в данной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии, с соблюдением функциональных условий и требований безопасности. Она основывается на результатах развития науки, техники, практического опыта, определяет основу не только настоящего, но и будущего развития и должна быть неразрывна с прогрессом. Это определение отражает все многообразие функций стандартизации, характеризует ее как деятельность, направленную на упорядочение, а не только на соблюдение каких-то правил и условностей.

Задачи стандартизации: превращение стандартов в средство внедрения новой техники; улучшение качества сырья, материалов и готовых изделий; применение стандартизации для управления техническим уровнем продукции и ее качеством; создание крупных межотраслевых систем стандартов, обеспечивающих оптимальные условия для проведения сложных работ в различных отраслях народного хозяйства.

Формы стандартизации: комплексная, опережающая и стандартизация межотраслевых систем. По определению Постоянной комиссии СЭВ по стандартизации, *при комплексной стандартизации* осуществляется целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимоувязанных требований как к объекту стандартизации в целом, так и к его основным элементам в целях обеспечения оптимального решения конкретной проблемы. При этом стандартизации подлежит не только сам объект производства (его конструкция), но и материалы, полуфабрикаты, оснастка, оборудование, технологические процессы.

Опережающий характер стандартизации достигается разработкой стандартов на изделия, которые не начали проектироваться, внедряться, изготавливаться серийно. Особое внимание при этом обращается на организацию внедрения опережающего стандарта, для чего одновременно с его разработкой готовят директивный документ о внедрении, план организационно-технических мероприятий, перечень предприятий, на которых будет внедрен стандарт. Контроль осуществляется базовыми и головными организациями отрасли, а также Госстандартом СССР.

Стандарт считается внедренным на предприятии, если установленные им нормы, требования и правила отражены в действующей технической документации, полностью выполняются в производстве и выпускаемая продукция полностью им соответствует. Направление стандартизации при переходе от опытного образца к серийному смещается от стандартизации объекта производства к стандартизации оборудования, технологической оснастки, технологических процессов.

Межотраслевая стандартизация широко применяется в СССР и странах — членах СЭВ. Ярким примером этого является осуществление принципа стандартизации в самой стандартизации: создана Государственная система стандартизации, представляющая комплекс взаимоувязанных стандартов. Кроме того, существует ряд крупных межотраслевых систем: Единая система конструкторской документации (ЕСКД); Единая система технологической документации (ЕСТД); Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП); Система стандартов в области автоматизированного проектирования и др.

В настоящее время существует большое число стандартов, вид которых зависит от нескольких групп факторов:

способа реализации стандарта — документа, содержащего нормы (требования), подлежащие выполнению, основной единицы или физической константы (ампер, абсолютный нуль температуры), предмета для физического сравнения (метр);

категории стандарта по масштабу охвата народного хозяйства: государственный стандарт, отраслевой стандарт, стандарт предприятия, республиканский стандарт, международный стандарт (СТ СЭВ);

вида стандарта по назначению для конкретного изделия — технические условия, параметры (размеры, напряжения и т. д.), марки материалов, сортамент, методы испытаний, правила приемки, типовой технологический процесс и т. д.;

вида стандарта по методическим признакам — организационно-методический, общетехнический (ЕСКД), проектно-конструкторской, производственно-технический.

При конструировании используют стандарты в виде документа, содержащего нормы (требования), подлежащие выполнению. Рассмотрим стандарты по масштабу охвата народного хозяйства.

Государственные стандарты СССР (ГОСТ) устанавливаются преимущественно на продукцию массового или серийного производства, имеющую межотраслевое применение. В частности, ГОСТ определяют терминологию, требования по устойчивости РЭС к механическим, климатическим, радиационным воздействиям, параметры некоторых конструкционных систем РЭС.

Отраслевые стандарты (ОСТ) устанавливаются на те виды продукции, которые не являются объектами государственной стандартизации,—на нормы, правила, требования, понятия и обозначения, регламентация которых необходима для обеспечения оптимального качества продукции данной отрасли, а также для упорядочения производства, обеспечения координации производственно-технической деятельности предприятий отрасли. Отраслевые стандарты могут также устанавливать ограничения (по номенклатуре, типоразмерам, нормам, требованиям и т. д.) или развивать государственные стандарты применительно к особенностям отрасли, если это не нарушает параметрических (например, размерных) рядов, не снижает качественных и эксплуатационных показателей, установленных государственными стандартами. Объектами отраслевой стандартизации, в частности, могут быть: отдельные виды продукции ограниченного применения, технологическая оснастка, предназначенная для производства и применения в данной области, сырье, материалы, полуфабрикаты внутриотраслевого применения, отдельные виды товаров народного потребления. Отраслевыми стандартами определяются размеры многих конструкционных систем РЭС и элементов.

Республиканские стандарты (РСТ) устанавливаются по согласованию с Государственным комитетом стандартов СССР и с соответствующими министерствами и ведомствами по закрепленным группам продукции, изготавливаемой предприятиями министерств и ведомств союзных республик. Республиканские стандарты устанавливаются также на товары народного потребления. Как правило, при конструировании РЭС специального назначения РСТ не используются.

Стандарты предприятий (СТП) устанавливаются на нормы, правила, требования, методы и другие объекты, имеющие применение только на данном предприятии. Объектами стандартизации на предприятии могут быть детали, узлы и агрегаты изготавливаемых (разрабатываемых) изделий, нормы для разработки продукции предприятия и методы расчета, нормы в области организации и управления производством предприятия, технологические нормы и требования, типовые технологические процессы, оснастка, инструмент и т. д. Стандарты предприятия могут носить характер ограничений или развития (по номенклатуре, типоразмерам, применяемым материалам и т. п.) государственных, отраслевых, республиканских стандартов применительно к особенностям данного

предприятия при условии, что это не ухудшает показателей, установленных государственными, отраслевыми или республиканскими стандартами.

Особое место в системе стандартизации занимает совместная работа, проводимая странами—членами СЭВ для дальнейшего повышения эффективности производства, удовлетворения потребностей людей, производства товаров с показателями качества выше мирового уровня. Это достигается путем сокращения сроков разработки и внедрения отечественных стандартов (уменьшения объема работ по разработке новых стандартов благодаря использованию опыта социалистических стран) и обеспечения специалистов информацией о передовом зарубежном опыте. К объектам международной стандартизации в области РЭС относятся термины и определения, требования к материалам, элементам (соединителям, ИС и т. д.), аппаратуре для радиовещания, телевидения, записи и воспроизведения информации, средствам измерения и автоматизации, ЭВМ и т. д.

Особая роль отводится стандартизации с внедрением автоматизированных систем управления (АСУ, АСУ ТП) и необходимостью выпуска продукции на уровне лучших мировых образцов. Для успешного выполнения этих задач требуется дальнейшее совершенствование самой стандартизации. Так, система присвоения десятичных номеров конструкторским документам недостаточно удобна, так как составлена по геометрическим признакам изделий, без учета их функционального назначения. Поэтому платы бытовых РЭС и РЭС специального назначения имеют одинаковый десятичный номер, хотя технологическая характеристика их разная. Это затрудняет управление производством с использованием АСУ.

В настоящее время число ГОСТов достигает 20 000, ОСТов и СТП—еще больше, что затрудняет поиск информации при разработке конструкции и контроль на соответствие требованиям стандартов. Технический уровень и качество продукции на внутреннем и мировом рынке постоянно повышаются. Поэтому стандарты не являются чем-то неизменным. Устаревшие стандарты аннулируются, вместо них вводятся новые. Все изменения отражаются в специальных периодических изданиях Госстандарта СССР, к которым в первую очередь относятся Указатель государственных стандартов СССР (ежегодник), Указатель отраслевых и республиканских стандартов (ежегодник), Информационный указатель ГОСТ СССР (ежемесячник), Информационный указатель отраслевых и республиканских стандартов (выходит раз в два месяца), Информационный указатель технических условий (ежемесячник). В указателях содержатся номера и названия стандартов, действующих в текущем году. Все изменения отражаются в информационных указателях.

§ 1.7. Конструкционные системы РЭС

Несущие конструкции предназначены для размещения компонентов РЭС и обеспечения их функционирования в реальных условиях эксплуатации. Использование несущих конструкций позволяет улучшить компоновку, теплоотвод, экранирование и заземление, а также повысить надежность и технологичность составных частей и изделия в целом.

Одним из самых важных объектов стандартизации являются конструкционные системы РЭС, представляющие совокупность базовых несущих конструкций, находящихся в определенной соподчиненности на основе единого модуля и оптимальной технологии производства. Они предназначены для создания оптимальных компоновок РЭС с учетом функциональных, механических, тепловых факторов, требований эргономики и ремонтпригодности.

Существует большое число конструкционных систем РЭС, предназначенных для различных видов аппаратуры, в том числе базовые несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры, система унифицированных типовых конструкций государственной системы приборов и средств автоматизации, базовые несущие конструкции ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ, стойки аппаратуры систем передачи информации по проводным линиям связи, конструкционная система телевизионной студийной аппаратуры, шкафы и корпуса блоков электронных измерительных приборов, блочные унифицированные конструкции на основе плат в дюймовой системе, конструкционная система самолетной аппаратуры, базовые несущие конструкции судовой аппаратуры и т. д.

Существует также ряд конструкционных систем стран — членов СЭВ. Все эти конструкционные системы появились в разных ведомствах в разное время до принятия ГОСТ 26 632—85 и имели разное число и название уровней разукрупнения из числа (ряда): элемент (ЭРЭ, ИС, соединитель и т. д.), плата (ячейка, корпус частичный, типовой элемент замены), блок (кассета, каркас, кожух, корпус комплектный, панель, крейт), шкаф (стойка, тумба, пульт, стол, блок комплексный). Старые названия остались в технической литературе прежних выпусков, например корпус частичный — базовая конструкция (рис. 1.12) с несущими элементами в виде платы и передней панели или стержней, соединяющих переднюю и заднюю панели, предназначенная для размещения компонентов, плат и других изделий; корпус комплектный — базовая конструкция (рис. 1.13) с несущими элементами в виде боковых стенок или стержней, соединяющих переднюю и заднюю балки и рамки, предназначенная для размещения плат, частичных корпусов и других изделий; корпус комплексный (рис. 1.14) — базовая конструкция, предназначенная в основном для размещения комплектных корпусов в соответствии с техническими

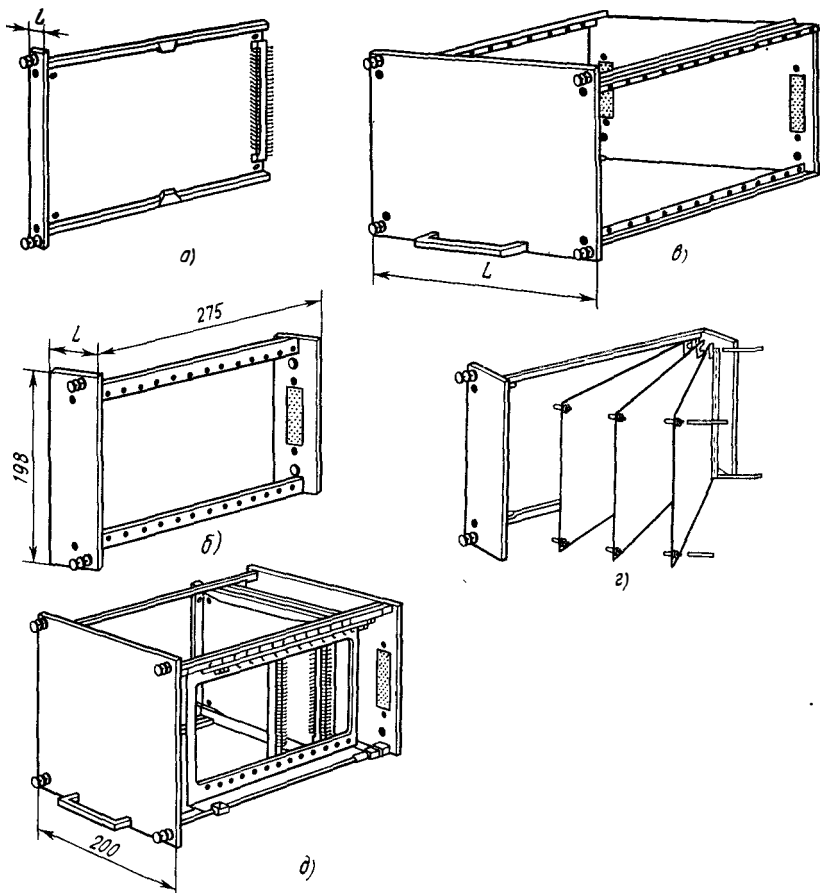


Рис. 1.12. Схема конструкций частичных корпусов:
 а — для размещения одной платы; б, в — для крупногабаритных ЭРЭ и источников питания;
 г — для «книжной компоновки»; д — для «разъемной» компоновки (платы вставляются сбоку)

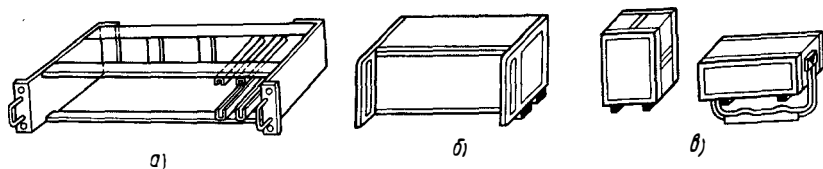


Рис. 1.13. Схема конструкций комплектных корпусов:
 а — блочный (комплектный); б — настольного комплектного блока; в — корпуса малогабаритных комплектных блоков для измерительных приборов

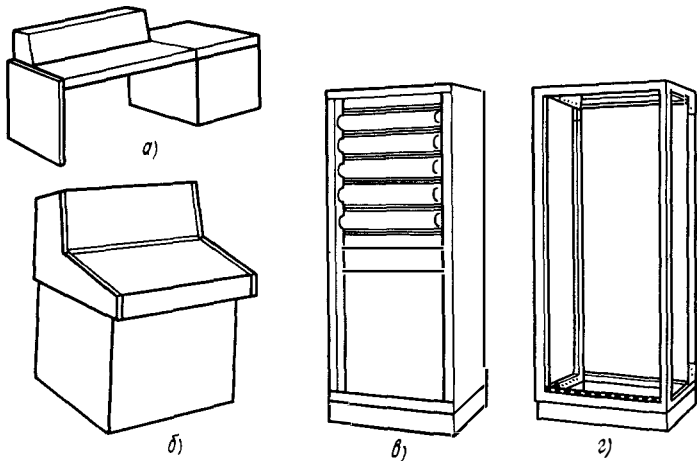


Рис. 1.14. Корпуса комплексных блоков:
 а, б — пульты; в, з — закрытая и открытая стойки

требованиями; выполняется в виде шкафа, стойки, стола или тумбы; кожух — конструкция (рис. 1.15) с несущими элементами в виде боковых стенок, соединенных крышками, предназначенная для компоновки плат, ячеек, частичных и комплектных корпусов.

Конструкционные системы РЭС и уровни их разукрупнения характеризуются размерами на основе единого модуля — 2,5 мм при использовании метрической системы мер и 2,54 мм для дюймовой системы; допустимой рассеиваемой мощностью, габаритами, массой, механической прочностью, защищенностью от климатических воздействий, конструкцией электрических соединений, наличием или отсутствием магистральности, соответствием международным стандартам, стоимостью. Параметры конструкционных систем чаще всего приведены

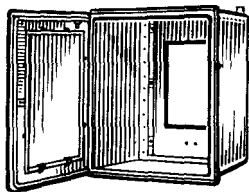


Рис. 1.15. Навесной кожух

в отраслевых стандартах.

Конструкция корпусов ИС. Параметры конструкционных систем РЭС в значительной степени определяются типом и параметрами элементов (ИС, ЭРЭ), используемых в модулях нулевого уровня (РЭМ 0). Поэтому другим важным объектом стандартизации является конструкция корпусов ИС. Различают корпусные и бескорпусные элементы, в том числе на носителях (пленочных, керамических, полимерных).

Корпусированные элементы используются в основном в негерметичных конструкциях. Их достоинством является защищенность элементов ИС от дестабилизирующих факторов, а к недостат-

Корпуса интегральных схем

Тип корпуса	Форма	Расположение выводов		Шаг выводов e , мм
		относительно проекции тела корпуса	относительно плоскости основания	
1	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное	2,5
2	»	За пределами проекции тела корпуса	»	2,5; 1,25
3	Круглая	В пределах и за пределами тела корпуса по окружности	»	Под углом $360^\circ/n$ n — число выводов круглого корпуса)
4	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Параллельное	2,25; 0,625
5	»	В пределах проекции тела корпуса	Без выводов	1,25

кам — увеличение габаритов, массы и стоимости из-за наличия корпуса и усложнения сборки, ухудшение теплоотвода, а также электрических параметров (из-за увеличения длины выводов, их сопротивления и индуктивности, межвыводной емкости). Однако применение корпусированных ИС не исключает необходимости защиты от дестабилизирующих факторов других элементов РЭС (проводников печатных плат, электрических соединителей, электрических соединений из объемного провода).

В настоящее время используют пять типов корпусов (табл. 1.2). Они различаются формой, видом и расположением внешних выводов, которые бывают штырьковыми и планарными, расположенными с шагом 2,5; 1,25; 0,625 мм с двух сторон корпуса, по всем его сторонам или по всему основанию (рис. 1.16). Корпуса имеют 18, 24, 28, 40, 48, 52, 64 вывода. Наиболее распространенными являются 40-выводные корпуса с расположением выводов в два ряда (рис. 1.17). В зарубежной литературе корпуса с двухрядным расположением внешних выводов называются DIP-корпусами (dual — in — line — package).

Разработка микропроцессоров на 16 и 32 разряда требует увеличения числа внешних выводов ИС. Увеличение разрядности позволяет увеличить быстродействие вычислительной системы и объем адресуемой памяти. Ожидается появление корпусов микросборок с числом выводов 68, 128, 256, 512 и более. Однако площадь 40-выводного корпуса с двумя рядами выводов в несколько раз превышает площадь расположенного в нем кристалла. Это объясняется тем, что при шаге расположения выводов 2,5 мм длина корпуса с двухрядным расположением выводов получается очень боль-

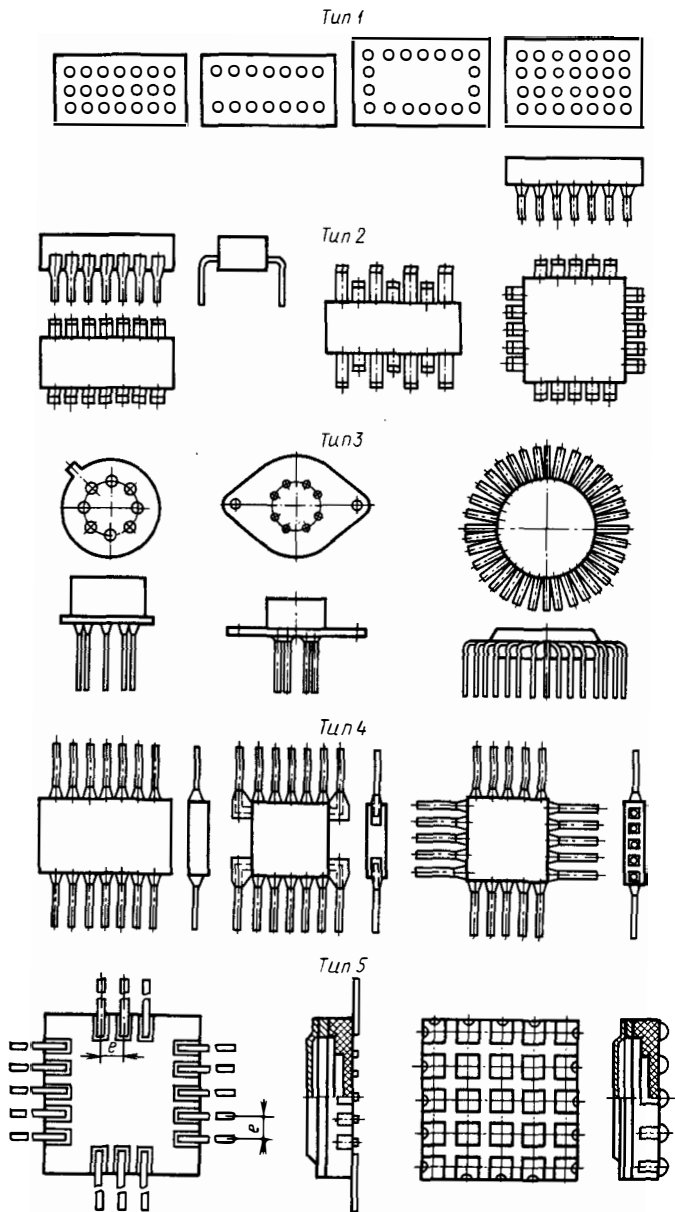


Рис. 1.16. Типы корпусов ИС (e — шаг расположения выводов)

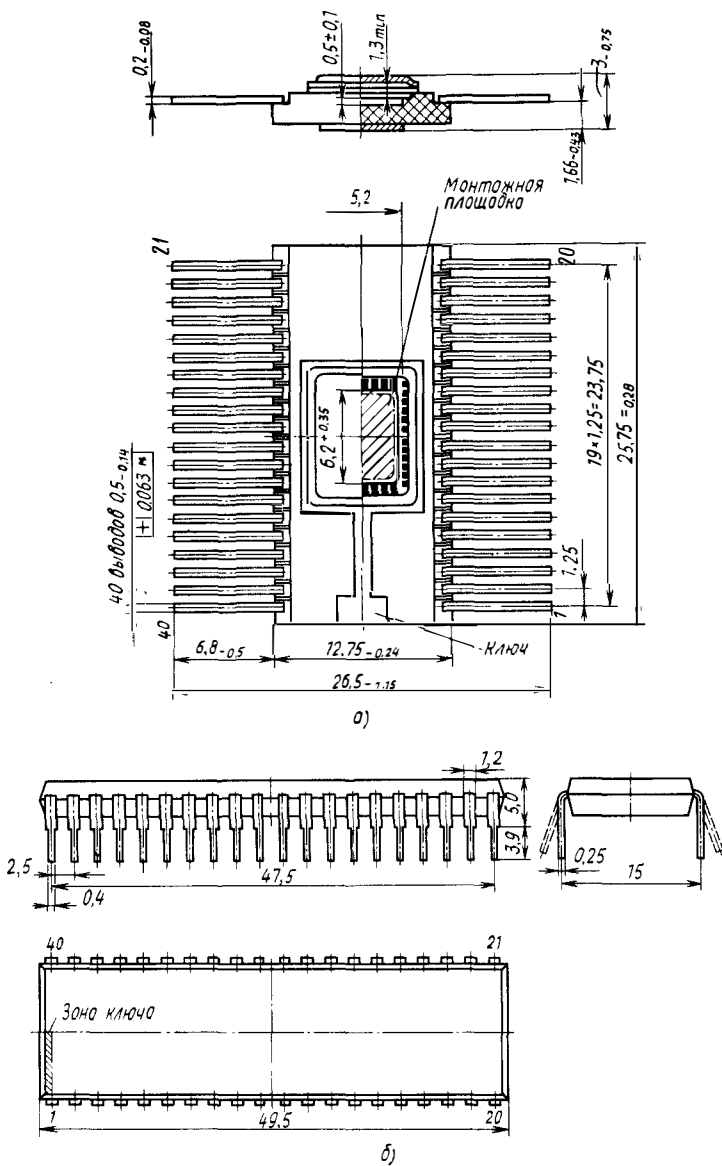


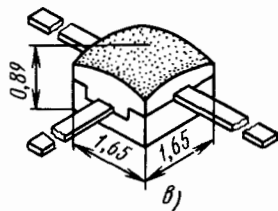
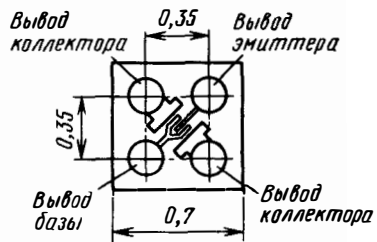
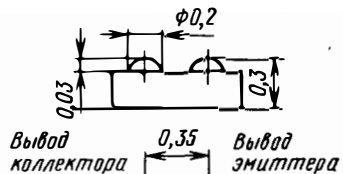
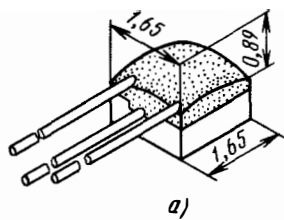
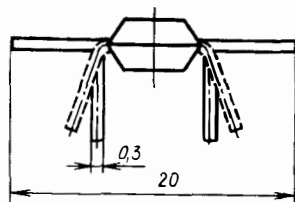
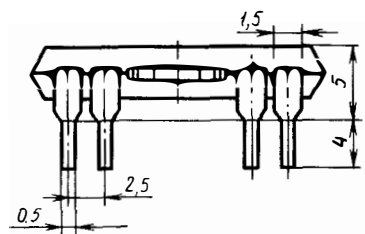
Рис. 1.17. Конструкция металлокерамического корпуса 4122.40-2 (а) и пластмассового корпуса типа 2123.40-2 (б)

Сравнительные характеристики периферийных и матричных микрокорпусов (рис. 1.16, тип 5)

Число выводов	Периферийный корпус		Матричный микрокорпус			
	$e = 1$ мм		$e = 2$ мм		$e = 2,5$ мм	
	Размеры, мм	Площадь, мм ²	Размеры, мм	Площадь, мм ²	Размеры, мм	Площадь, мм ²
16	6,8 × 6,8	46,2	7 × 7	49	11 × 11	121
24	9,5 × 7,9	75	9 × 9	81	13,5 × 13,5	182
48	14,5 × 14,5	210	13 × 13	169	18,5 × 18,5	342
64	18,6 × 18,6	346	15 × 15	225	21 × 21	441
100	28 × 28	784	19 × 19	361	26 × 26	676
144	38 × 38	1444	23 × 23	529	31 × 31	961
196	52 × 52	2700	27 × 27	729	36 × 36	1296

шой. Кроме того, из-за значительной длины выводов недопустимо (для быстродействующих схем) увеличиваются омическое сопротивление выводов (более 0,5 Ом) и паразитная емкость (более 5 пФ). Выходом из положения является использование корпусов типа 5 с выводами, расположенными по периметру (периферии) или по всей площади основания (см. рис. 1.16, тип 5; табл. 1.3). Такие корпуса в нашей стране называют микрокорпусами (периферийными и матричными), а за рубежом — кристаллодержателями или кристаллоносителями. В тех случаях, когда корпус выполнен из материала с малой теплопроводностью (например, из полимерного материала), в него могут быть введены теплоотводящие шины (рис. 1.18).

Бескорпусные элементы являются объектом отраслевой стандартизации. Они имеют малые габариты (рис. 1.19) и массу и используются в составе микросборок или герметизированных блоков (часто для бортовых РЭС и РЭС СВЧ). Выводы бескорпусных элементов выполняются в виде контактных площадок, могут быть проволочными или балочными. В ряде случаев бескорпусные элементы располагаются на ленточном пленочном носителе (рис. 1.20), что облегчает их контроль, электротренировку, автоматизацию сборки и монтажа. Лентой-носителем служит тонкая (толщиной 0,05...0,15 мм) пластмассовая (полиимидная, полиэфирная и др.) одно-, двух-, трехслойная пленка (лента) шириной 8...70 мм. Полиимидные ленты обладают высокой термостойкостью (возможен их кратковременный нагрев до 400° С), а также стабильными физическими и химическими свойствами при воздействии кислот. Кроме того, их можно подвергать селективной химической обработке и использовать в качестве подложек для вакуумного напыления металлических пленок. Полиэфирные пленки Mylar на основе полиэтилентереф-



б)

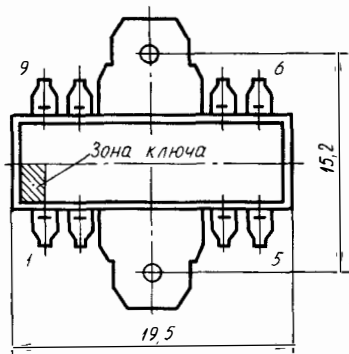
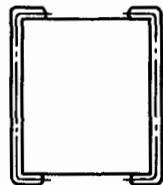
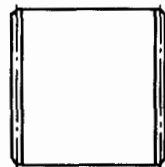
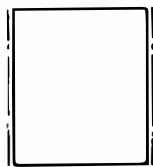


Рис. 1.18. Полимерный монокристаллический корпус типа 201.9-1 с теплоотводящей шиной



а)

б)

в)

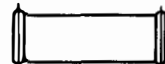
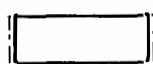


Рис. 1.19. Бескорпусный транзистор с гибкими (а), шариковыми (б) и балочными(в) выводами; нелуженый (а) и луженые (д, е) бескорпусные конденсаторы

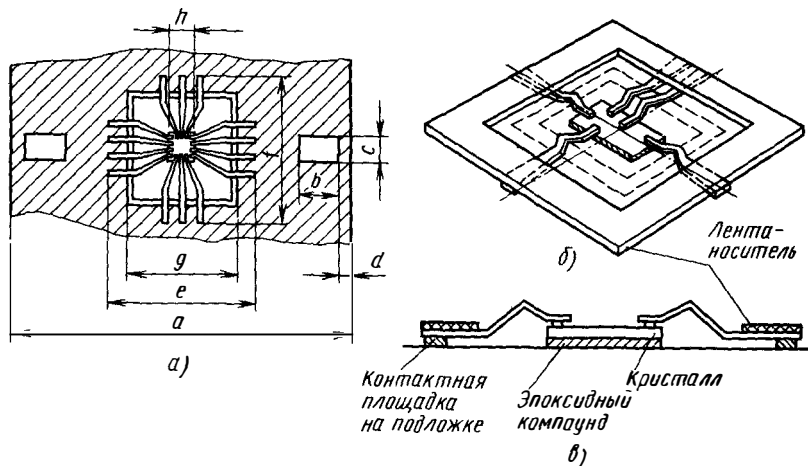


Рис. 1.20. Пленочный (ленточный) носитель с кристаллом: a —размещение кристалла на ленте-носителе до обрезки; b —после обрезки внешнего контура; e —установка на подложку; a —ширина ленточного носителя, b и c —размеры отверстия перфорации; d —расстояние от края ленты до перфорации; e и f —размер рисунка металлизации; g —размер отверстия под кристалл; h —размер стороны кристалла

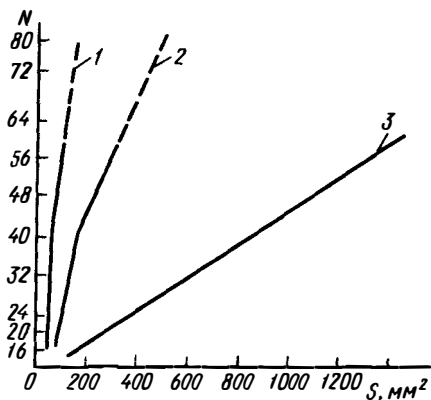
Таблица 1.4

Сравнительные параметры выводов различных корпусов

Параметр	Число выводов	Корпус с двумя рядами выводов		Микрокорпус		Бескорпусная ИС	
		самый длинный вывод	самый короткий вывод	самый длинный вывод	самый короткий вывод	на полиимидном носителе	с выводами из объемного провода
Индуктивность выводов, нГн	16	6,40	1,62	1,13	0,73	0,05 ... 0,1	0,01 ... 0,03
	28	14,77	1,62	1,8	1,15	До 0,26	До 0,03
	40	24,94	1,62	2,9	1,87	До 0,4	»
	64	49,14	2,34	6,44	4,21	До 0,5	»
Межвыводная емкость, пФ	16	0,74	0,25	0,13	0,09	0,01 ... 0,03	Менее 0,01
	28	1,48	0,25	0,19	0,13	0,02 ... 0,04	»
	40	2,13	0,25	0,27	0,19	0,03 ... 0,05	»
	64	4,12	0,33	0,52	0,36	До 0,06	»
Сопротивление выводов, Ом	16	0,242	—	0,114	0,108	0,02	0,002
	28	0,319	—	0,139	0,136	0,04	0,002
	40	0,644	—	0,147	0,109	0,08	0,002
	64	1,00	—	0,222	0,222	0,08 ... 0,1	0,002

талата в 10 раз дешевле полиимидных и более устойчивы к воздействию влаги и высокой температуры. Для организации системы выводов используют фольгированные ленты. Медная

Рис. 1.21. Влияние числа внешних выводов N и типа корпуса ИС на площадь посадочного места S :
 1 — полиимидный ленточный носитель; 2 — керамический микрорамка; 3 — корпус с двухрядным расположением внешних выводов



фольга толщиной 35 мкм закрепляется клеем на предварительно нанесенном адгезионном слое толщиной 10...25 мкм. Травлением получают систему «паучковых» выводов (рис. 1.21) шириной 60...100 мкм и покрывают их защитным слоем золота.

Сравнительные данные различных типов корпусов приведены на рис. 1.21 и в табл. 1.4.

§ 1.8. Специфика конструкторской документации, выполненной с помощью автоматизированных методов

Комплектность конструкторской документации, выполненной на различных этапах разработки конструкции, представлена в табл. 1.1. Требования к оформлению конструкторской документации регламентируются ГОСТами и ОСТами. Часть документов или весь комплект могут выполняться автоматизированными методами с использованием ЭВМ. Эта документация имеет некоторую специфику, связанную с возможностями графических и печатающих устройств, обеспечением микрофильмирования, размножения, хранения, выполнения на машинных носителях (перфолентах и магнитных лентах).

Графическая конструкторская документация выполняется с помощью стандартных периферийных устройств ЭВМ: чертежно-графических автоматов (графопостроителей) в основном планшетного (иногда рулонного) типа или на АЦПУ. Специфика такой документации отражена в ряде нормативных документов. При выполнении конструкторской документации на графопостроителях основными форматами документов являются А3 и А4, в качестве носителей используется бумага или калька. Рисунок строится преимущественно из прямых линий. Допускается наклон линий на любой угол с шагом 15° . Толщина сплошной основной линии $S=0,5...1,0$ мм, сплошной тонкой линии — от

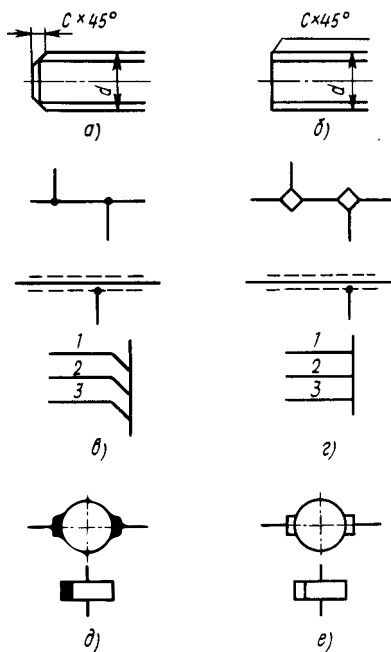


Рис. 1.22. Фрагменты чертежей, выполненные на графопостроителе:

a — полное изображение детали; *б* — упрощенное изображение детали; *в* — условное изображение схемы; *г* — упрощенное условное изображение схемы; *д* — полное изображение схемы с зачернением; *е* — упрощенное изображение схемы без зачернения

$S/3$ до $S/2$. Толщина линии 1,0 мм получается за несколько проходов. Минимальное расстояние между линиями больше или равно 0,5 мм. Отклонение толщины линий не должно превышать $\pm 0,2 S$. Используется полное, упрощенное или условное изображение предмета (см. рис. 1.22), зачернение областей исключается (рис. 1.22, *e*).

В качестве конструкторской документации на печатную плату допускается использовать изображение фотошаблона (рис. 1.23). При выполнении графической документации на АЦПУ, использующих перфорированную по краям рулонную бумагу, форматы могут отличаться от А3 и А4 на размер шага печати, иметь краевые поля и в этом случае обозначаются А3М, А4М. Размещение форматов на рулонной перфорированной бумаге для АЦПУ с шириной строки 128 или 132 символа приведено на рис. 1.24. Линии изображения строятся с помощью различных символов (тире, двоеточие и т. д.). Дополнительные графы могут заполняться вручную. При выполнении графических чертежей на АЦПУ допускается: упрощенно изображать элементы сборки деталей (рис. 1.25); не указывать позиции в сборочном чертеже при наличии информации о типе элементов на чертеже; изображать графические элементы линиями одной толщины из символов АЦПУ; использовать нестандартный масштаб (например, увеличенный); выполнять графические элементы с отклонением от масштаба; выполнять некоторые элементы (дополнительные графы, надписи) вручную; все текстовые надписи выполняются только горизонтально; геометрические формы должны быть преимущественно прямоугольными.

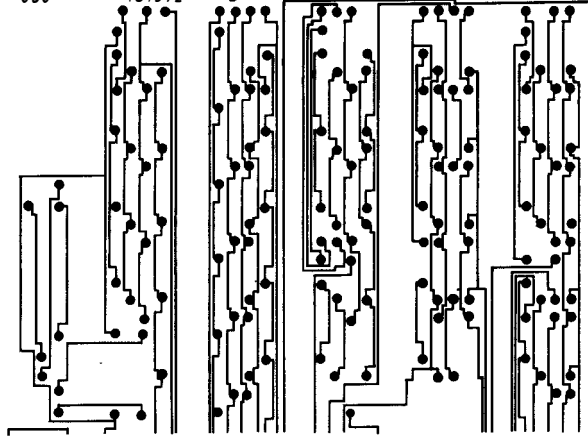
Текстовые конструкторские документы обычно оформляются на АЦПУ, что обуславливает специфику выполнения надписей:

6731972 Б 03 09

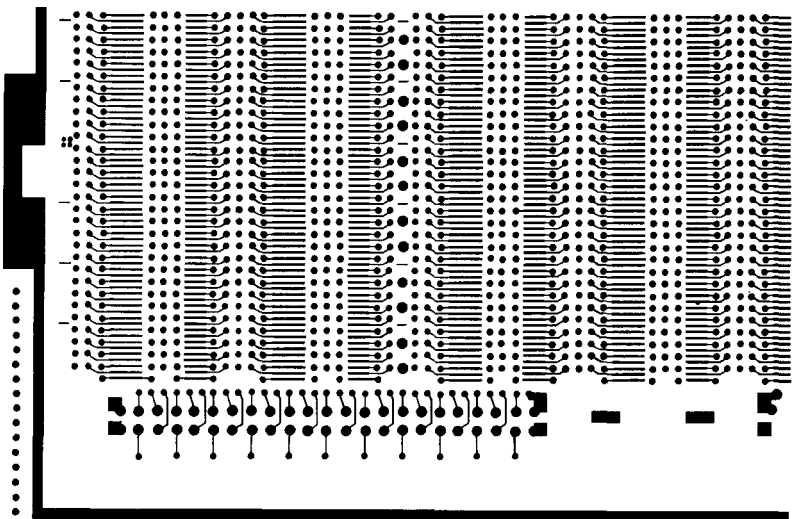
050

731972

Б



а)



б)

Рис. 1.23. Использование в качестве конструкторской документации на печатную плату фотошаблонов:

а—фрагмент третьего слоя; б—фрагмент последнего слоя

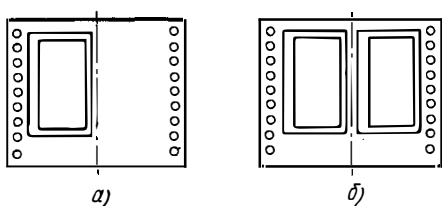


Рис. 1.24. Размещение форматов конструкторской документации на рулонной перфорированной бумаге для АЦПУ:

а — одностороннее; *б* — двустороннее копирование

ментов приведена на сборочном чертеже; при записи покупных элементов допускается не писать наименование каждого элемента, а выносить его в виде заголовка раздела и т. д.

Конструкторская документация, полученная на АЦПУ, как правило, не отвечает требованиям микрофильмирования по размеру шрифта основной надписи. Графопостроители позволяют получать документацию, оформленную в соответствии с ЕСКД (со стилизованным изображением букв и цифр), однако они имеют невысокое быстродействие (кроме ЭМ-732) и достаточно высокую стоимость. Примерный состав конструкторских документов, получаемых автоматизированными методами для различных радиоэлектронных изделий, приведен в табл. 1.5. Примеры выполнения конструкторской документации при автоматизированном выполнении приведены на рис. 1.26—1.32, где изображения букв и цифр не стилизованы.

Документация на машинных носителях представляет собой управляющие программы технологическим оборудованием выпуска графической документации, оборудованием изготовления и контроля РЭС. Эта документация выполняется в виде программ, используемых конкретным технологическим автоматом. Наибольшее распространение получили программноносители на перфоленте (ПЛ) и магнитной ленте (МЛ). Типовой состав документации на машинных носителях, который может быть использован при изготовлении РЭС различных видов, приведен в табл. 1.6. Комплект документации для конкретного изделия определяется составом производственного парка автоматов с ЧПУ.

Общие правила построения основных частей управляющей программы для ПЛ и МЛ одинаковы. Каждая управляющая программа в самом общем случае содержит различную информацию о ходе инструментов и команды, определяющие последовательность ходов. При построении системы команд управления исполнительными устройствами за основу часто берут комбинации общепринятых 5-, 7-, 8-разрядных двоичных кодов МТК-2, БЦК-5, ISO, EIA, DKOI и др. Общий вид управляющей программы на

вместо 2 мм^2 печатается 2 кв. мм ; вместо $20^{+0,5}_{-0,1}$ печатается $20 + 0.5 - 0.1$; вместо \pm печатается $+ -$; вместо $\pm 15\%$ печатается $+ - 15\%$, вместо запятой (,) — точка (.); вместо 0,45 — 0.45; вместо строчных букв (еКО) — прописные буквы (ЕКО). В спецификации не проставляются позиции, если информация о типе эле-

Примерный состав конструкторской документации, выполняемой автоматизированными методами

Наименование документа	Применяемость в изделиях				Используемое оборудование
	Ц	ЦА	А	ОП	
Спецификация ячейки	+	+	+	+	АЦПУ
Сборочный чертеж	+	+	+	+	Графопостроитель, АЦПУ
Перечень элементов	+	+	+	+	АЦПУ
Таблица контроля цифровой ячейки (блока)	+	-	-	+	»
Ведомость машинных носителей информации	+	+	+	+	»
Ведомость спецификации покупных изделий и т. д.	-	-	-	+	»
Спецификация МПП	+	+	+	-	»
Чертеж платы	+	+	+	+	Графопостроитель
Таблица цепей (проверки монтажа)	+	+	+	+	АЦПУ
Таблица монтажа	-	-	-	+	»
Схема расположения ЭРЭ на плате	+	-	-	-	Графопостроитель, АЦПУ
Таблица диаметров и координат отверстий	+	+	+	-	АЦПУ

Примечание. Ц—цифровые ячейки и многослойные печатные платы (МПП); ЦА—цифро-аналоговые ячейки на МПП; А—аналоговые ячейки на МПП или на двусторонних печатных платах; ОП—объединительные платы.

Таблица 1.6

Типовой состав конструкторской документации на машинных носителях для автоматов с ЧПУ

Операция	Конструкторский документ	Применяемость в изделиях				Тип автомата
		Ц	ЦА	А	ОП	
Изготовление контрольных рисунков	Чертеж платы	+	+	+	+	ЕС-7051, ЕС-7053
Изготовление фотошаблонов	То же	+	+	+	+	ЭМ-703, КПА-1200, М-2005
Сверление платы	Таблица диаметров и координат отверстий	+	+	+	+	СФ-4
Механическая обработка контура платы	Чертеж платы	+	+	+	+	СФ-4
Контроль платы	Таблица проверки монтажа	+	+	+	+	УКПМ-1, УКПМ-2
Установка ЭРЭ и пайка	Сборочный чертеж	+	+	+	-	АРПМ, АУПМ

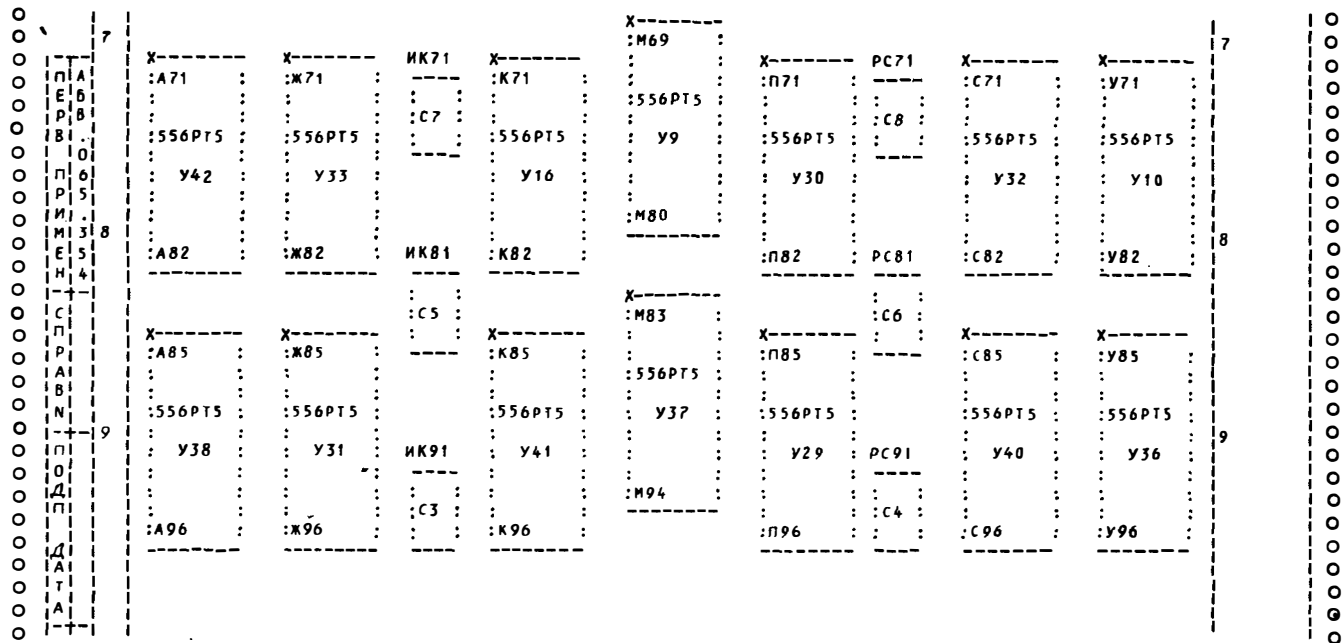


Рис. 1.25. Фрагмент сборочного чертежа ячейки, выполненный на АЦПУ

Перв. примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание		
Справ. №	A3			АБВ.771.381СБ	ДОКУМЕНТАЦИЯ				
	A4			АБВ.771.381ТБ	ТАБЛИЦА ПРОВЕРКИ МОНТАЖА		A4. A3		
	A4			АБВ.771.381ВН	ВЕДОМОСТЬ ДОКУМЕНТОВ НА НОСИТЕЛЯХ ДАННЫХ				
Подп. и дата	Взам. инв. №	Инва. №	дубл.	Подп.	Дата	СБОРОЧНЫЕ ЕДИНИЦЫ			
						A4		АБВ.771.489	ПЛАТА ПЕЧАТНАЯ МНОГОСЛОЙНАЯ ТИПОРАЗМЕР ХХХ
Инва. № подл.	Разраб.					ПЛАТА ПЕЧАТНАЯ МНОГОСЛОЙНАЯ	Лит.	Лист	Листов
	Пров.								1
	Н. контр.								
	Утв.								
АБВ.771.381									

Формат А4

Рис. 1.26. Первый лист спецификации платы

ПЛ, принятый в САПР, показан на рис. 1.33. ПЛ маркируется для визуальной идентификации программы, записанной на ней. В САПР принят следующий состав маркировки перфолент: наименование технологического автомата, для которого предназначена управляющая программа; номер типоразмера детали, узла (например, платы); литера изменения платы. В зависимости от типа технологического автомата в состав маркировки могут быть включены номер слоя платы и число слоев (для координатографов), диаметр используемого сверла (для сверлильных

		РАСПОЛОЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ						
Перв. примен.	Справ. №	Поз. обозначение	Координаты	Поз. обозначение	Координаты	Поз. обозначение	Координаты	
		С3	ИК91	У6	Ю68	У31	ЖВ5	
		С4	РС91	У7	Ф59	У32	С71	
		С5	ИК81	У8	Л66	У33	Ж71	
		С6	РС81	У9	М69	У34	Ж57	
		С7	ИК71	У10	У71	У35	Ю78	
		С8	РС71	У11	А43	У36	У85	
		С9	ИК61	У12	М55	У37	УВ3	

Рис. 1.27. Фрагмент таблицы расположения элементов на печатной плате

Перв. примен.	№ стр.	Обозначение	Наименование	Автомат	Примечание
		1	АБВ.032.171 М1	ПЕРФОЛЕНТА РАСКЛАДКИ	
	2		И ПАЙКИ МИКРОСХЕМ	АРПМ	
	3	АБВ.032.171 М1А	ПЕРФОЛЕНТА РАСКЛАДКИ		
	4		И ПАЙКИ МИКРОСХЕМ	АУПМ	
	5				

Рис. 1.28. Фрагмент ведомости машинных носителей информации

Перв. примен.	Справ. №	Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
		С10	КОНДЕНСАТОР К10-17-1С--Н50-0.047 мкФ	ОЖО.460.107 ТУ	1
		С11	КОНДЕНСАТОР К10-17-1С--Н50-0.047 мкФ	ОЖО.460.107 ТУ	1
		С12	КОНДЕНСАТОР К10-17-1С--Н50-0.047 мкФ	ОЖО.460.107 ТУ	1
		С13	КОНДЕНСАТОР К10-17-1С--Н50-0.047 мкФ	ОЖО.460.107 ТУ	1

Рис. 1.29. Фрагмент перечня элементов ячейки

Перв. приме. н.	№ цепи	ТОЧКИ ЦЕПИ		
		152	У11-А49-7	У12-М61-7
		У31-Ж91-7	У29-П91-7	У20-К63-7
		У10-У77-7	У21-С63-7	У30-П77-7
		У3-295-6	У33-Ж77-7	У36-У91-7
		У34-Ж63-7	У40-С91-7	С32-С77-7
		ГН-2	У37-М89-7	У41-К91-7
		У38-А91-7	У42-А77-7	
Справ. №	153	У42-А76-6	У38-А90-6	У37-М8В-6
		У41-К90-6	ГН-3	У40-С90-6
		У36-У90-6	У33-Ж76-6	У34-Ж62-6
		У3-Х96-8	У21-С62-6	У30-П76-6
		У10-У76-6	У20-К62-6	У29-П90-6
		У9-М74-6	У31-Ж90-6	У12-М60-6
		У11-А48-6	У13-У62-6	У16-К76-6

Рис. 1.30. Фрагмент таблицы проверки монтажа

Перв. примен.	Формат	Зона	Поз	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
					<u>СБОРОЧНЫЕ ЕДИНИЦЫ</u>		
	А4			АБВ.051.310	ЯЧЕЙКА ЦИФРОВАЯ ТИПОРАЗМЕР ХХХ		
Справ. №	А4			АБВ.771.3В1	ПЛАТА ПЕЧАТНАЯ МНОГОСЛОЙНАЯ		
					<u>ДЕТАЛИ</u>		
	А4			АБВ.733.576	КОНТАКТ КОНТРОЛЬНЫЙ		

Рис. 1.31. Фрагмент спецификации ячейки

станков). Символы маркировки образуются на ПЛ при помощи определенных комбинаций отверстий (рис. 1.34). Основная часть ПЛ содержит управляющую программу для технологического автомата, представленную в кодах, используемых в этих автоматах. Контрольная сумма ($k\Sigma$) служит для проверки правильности вывода информации на ПЛ.

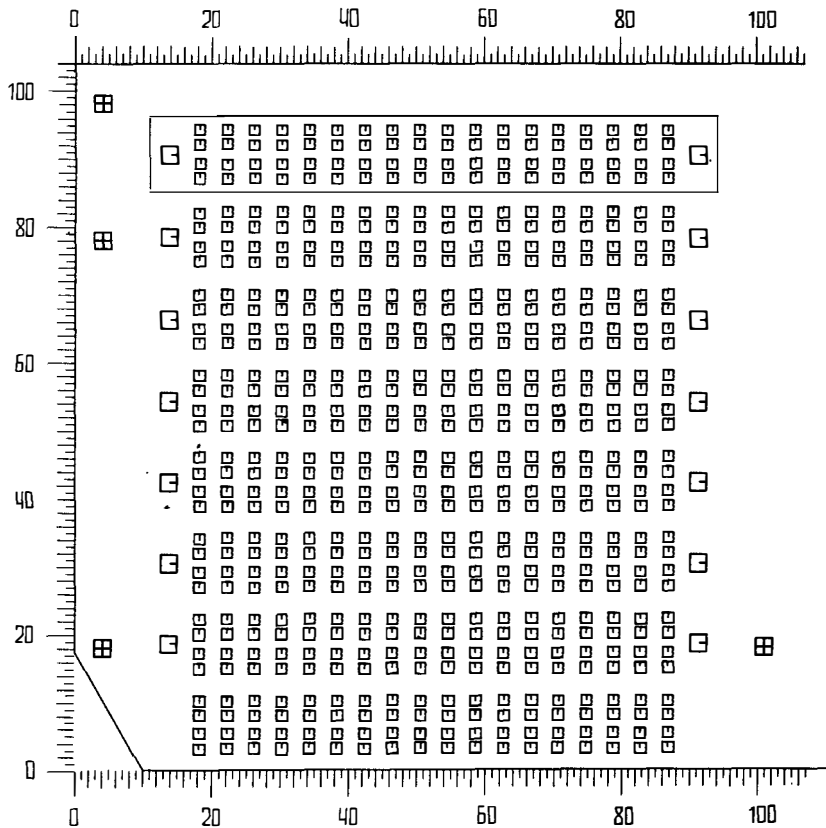


Рис. 1.32. Фрагмент сборочного чертежа объединительной печатной платы

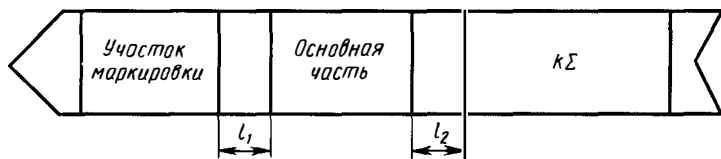


Рис. 1.33. Общий вид управляющей программы на перфоленте:
 l_1 , l_2 — длина участков перфоленты, свободных от перфорации

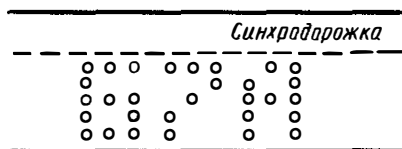


Рис. 1.34. Изображение символов маркировки на перфоленте

§ 1.9. Стандартизационный контроль конструкторской документации

Для оценки соответствия разработанной конструкторской документации установленным стандартами требованиям осуществляется стандартизационный контроль, который на предприятиях возложен на специальные подразделения, укомплектованные работниками высокой конструкторской квалификации. Стандартизационный контроль (нормоконтроль) проводится с целью обеспечения внедрения государственных, отраслевых стандартов и стандартов предприятий в производство. Он способствует максимальному применению в технической документации стандартных и унифицированных материалов, конструкторских элементов, деталей и узлов, а также строгому соблюдению правил, норм и требований, регламентированных стандартами. Он является действенным средством повышения качества технической документации, сокращения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технологических работ и количества применяемых в производстве чертежей и документов. Основными элементами стандартизационного контроля являются: проверка необходимости разработки специальных чертежей и их оформления; контроль применения стандартных деталей, узлов, элементов в разрабатываемых конструкциях; проверка использования возможностей унификации и конструктивной преемственности в разрабатываемых конструкциях; комплектность документации, наличие необходимых подписей, правильность оформления чертежей.

При решении вопроса о целесообразности выпуска нового чертежа специальной детали, узла или изделия основанием являются данные учета применяемости. Если установлена возможность использования имеющейся конструкции, чертежи возвращаются конструктору с соответствующими заключениями контролера. После внесения необходимых изменений производится контроль соответствия проверяемой документации требованиям стандартов: соблюдение форматов чертежей, наименований, которые должны соответствовать системе шифровки; заполнение всех граф углового штампа, правильность обозначений материалов и полуфабрикатов; особое внимание уделяется точности указания номеров соответствующих стандартов и технических условий.

Важное значение имеет проверка соответствия номинальных размеров установленным на заводе ограничительным стандартам на диаметры, длину, резьбы, посадки и другие конструктивные элементы. Необходимо проверять, правильно ли указаны размеры сортовых материалов (катаных, тянутых, прессованных и т. д.), обозначения допусков и посадок, допустимых отклонений формы, взаимного расположения поверхностей, их шероховатости. Проверяются правильность расположения проекций на поле чертежа,

правильность и полнота проекций, разрезов, сечений, соответствие обозначений крепежных деталей и вспомогательных материалов стандартам и техническим условиям.

В текстовых технических документах (технических условиях, описаниях и др.) проверяются единообразие, ясность, лаконичность изложения, правильность ссылок на стандарты и технические условия, правильность технической терминологии и обозначений и т. д. Особое внимание должно быть направлено не только на контроль чертежей и текстовой документации, но и на контроль всех изменений. Чем с более ранней стадии разработки осуществляется нормоконтроль, тем выше качество конструкторской документации.

§ 1.10. Конструкция РЭС как объект производства

Конструкция РЭС реализуется в соответствии с конструкторской документацией в процессе производства. Основной частью производственного процесса является технологический процесс (ТП), в результате которого происходит направленное изменение свойств и формы материалов, полуфабрикатов (заготовок), деталей, а также механическое и электрическое соединение их между собой с определенной точностью и производительностью. Конструкция и технология изготовления РЭС тесно связаны и взаимообусловлены.

Характер используемых ТП не только оказывает влияние на конструкцию, но и определяет такие ее свойства, как экономически целесообразная плотность компоновки узлов, стоимость и надежность РЭС на этапе производства и расходы при эксплуатации; масса, габариты, энергопотребление (ЭСЛ- и КМДП-структуры); конструкция узлов для подключения испытательной аппаратуры. В свою очередь, *конструкция определяет структуру ТП производства РЭС*, т. е. номенклатуру используемых частных ТП, последовательность их реализации (последовательное, параллельное или смешанное производство узлов); требования к точности поддержания технологических режимов; требования к структуре и типу средств контроля (испытания) элементов, узлов и конструкции в целом; возможность механизации и автоматизации производства (возможность использования роботов и манипуляторов).

Конструкция РЭС зависит от типа производства (единичное, серийное, массовое); его вида (механическая обработка, диффузия примесей, эпитаксия, гальваника и т. д.); типа элементов (корпусные, бескорпусные ИС, степень их интеграции); номенклатуры и параметров уже освоенных ТП; возможности освоения новых прогрессивных ТП.

Изделия специального назначения выпускаются на предприятиях единично или мелкими сериями. Бытовая электронная

аппаратура (приемники, магнитофоны, микрокалькуляторы, часы, электронные игры и т. д.) производится серийно или массово. Чем выше серийность производства, тем меньше стоимость аппаратуры (увеличение объема выпуска изделий на три порядка снижает стоимость изделий на порядок), но подготовка производства занимает больше времени.

Влияние конструкции на организацию производства. Если какой-либо узел конструкции (например, кристалл БИС микрокалькулятора) изготавливается в едином технологическом цикле, то, естественно, в этом случае имеет место последовательное выполнение операций. При возможности расчленения конструкции на отдельно изготавливаемые и проверяемые узлы производственный процесс может иметь смешанный характер: одновременное (параллельное) изготовление всех узлов, определенная последовательность операций в процессе изготовления каждого узла и при сборке аппаратуры из отдельных узлов. Такое построение ТП позволяет уменьшить общую длительность производственного процесса и обеспечить отбраковку неисправных узлов на ранних этапах производства. Однако при этом пропорционально увеличиваются производственный персонал, количество оборудования, оснастки, производственные площади. В единичном производстве при параллельно-последовательной организации производства требуются высококвалифицированные рабочие, универсальное оборудование и оснастка или ГПС. Но конструкция РЭС должна в последнем случае отвечать определенным требованиям и отличаться от конструкции, изготавливаемой при неавтоматизированном производстве (см. § 1.4).

Обычно в состав конструкции РЭС входят элементы, изготавливаемые на специализированных производствах (цехи или предприятия): ЭРЭ и ИС, электрические соединители, печатные платы, крепежные и кабельные изделия и т. д. Если подобные изделия приобретаются по кооперации, то они называются *комплектующими*. От конструкции зависит соотношение изделий комплектующих и собственного производства, а следовательно, и характер ТП. Большое влияние на характер ТП оказывает элементная база. Для корпусированных ИС малой степени интеграции в качестве коммутационных оснований обычно используют двусторонние печатные платы и не всегда требуется герметизация всего блока. Для бескорпусных элементов высокой степени интеграции используют многослойные монтажные основания (керамические, полимерные, стеклотекстолитовые и т. д.), гибкие печатные шлейфы и обязательно герметизация компонентов в составе блока. Естественно, что ТП в первом и втором случаях существенно различаются.

От конструкции РЭС зависят не только структура и характер ТП, но и его *надежность* $P_{\text{тп}} = 1 - (n_1 + n_2)/N$, где N — общее число изготовленных изделий; n_1 — число изделий, забракованных

на этапе производства; n_2 — число изделий, имеющих скрытый брак, выявленный при эксплуатации. Отношение n_1/N характеризует производственную, а n_2/N — эксплуатационную надежность технологии производства.

С другой стороны, надежность ТП производства РЭС (P_a) определяется надежностью операции при изготовлении элемента ($P_{оп}$), надежностью получения элемента, пригодного по всем параметрам ($P_{пар}$), надежностью ТП изготовления всех элементов узла ($P_{эл}$), надежностью ТП изготовления всех узлов РЭС ($P_{уз}$), надежностью сборки РЭС из узлов ($P_{сб}$):

$$P_a = \underset{1}{\prod} P_{сб} \left(\underset{1}{\prod} P_{уз} \left(\underset{1}{\prod} P_{эл} \left(\underset{1}{\prod} P_{пар} \left(\underset{1}{\prod} P_{оп} \right) \right) \right) \right)$$

где n — число ТП сборки; x — число узлов в изделии; y — число элементов в узле; z — число параметров элемента; h — число операций ТП изготовления элемента.

Таким образом, для увеличения надежности ТП изготовления РЭС при конструировании необходимо ориентироваться на наиболее простые и отработанные (базовые) ТП (увеличиваются $P_{оп}$, $P_{пар}$, $P_{эл}$, $P_{уз}$, $P_{сб}$); уменьшать число параметров, определяющих качество элемента; упрощать конструкцию (уменьшать число элементов и узлов), используя элементы повышенной степени интеграции (БИС и СБИС); уменьшать число общих для изделия процессов сборки, монтажа, герметизации. Если существующие ТП изготовления элементов, узлов или изделий в целом не обеспечивают заданной надежности производства, принимается решение о модернизации существующих или разработке новых более надежных ТП, о доработке конструкции РЭС.

В целом соответствие конструкции ТП характеризуется *технологичностью*, которая носит относительный характер (для конкретной конструкции и конкретных условий производства). От технологичности зависят: 1) объем и длительность конструкторской подготовки производства (проектирование оснастки, инструмента) и технологической (разработка ТП, приобретение оборудования, материалов, отработка режимов и т. д.); 2) надежность ТП (процент явного и скрытого брака), а следовательно, стоимость РЭС в производстве и расходы при эксплуатации.

§ 1.11. Техничко-экономический анализ конструкторской разработки

Для оценки мер по повышению технологичности вновь разрабатываемой конструкции РЭС проводится *техничко-экономический анализ*, в результате которого устанавливается технико-экономический эффект, обусловленный внедрением новой техники и технологии с учетом дополнительных затрат на проектирование и подготовку производства. *Техничко-экономический эффект* про-

является в виде экономии затрат и удовлетворения каких-либо потребностей людей (видеозапись, получение прогноза погоды с помощью спутников, улучшение качества продукции, повышение безопасности, решение научных задач и т. д.). Основной предпосылкой повышения экономического эффекта как при изготовлении, так и при эксплуатации является повышение технологичности конструкции.

Различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность конструкции. *Производственная технологичность* определяет объем работ по технологической подготовке производства, сложность изготовления, удобство монтажа вне предприятия-изготовителя; *эксплуатационная технологичность* определяет объем работ при подготовке изделия к использованию по назначению, техническому ремонту и утилизации (возвращению в производство отходов); *ремонтная технологичность* характеризует свойства изделия при всех видах ремонта, кроме текущего.

Технологичность конструкции определяется на основе показателей технологичности, которые различаются: по области проявления (производственные, эксплуатационные); цели анализа (технические, технико-экономические); системе оценки (базовые, разрабатываемой конструкции); способу выражения (абсолютные, относительные); степени значимости (основные, дополнительные); количественному характеру (частные, комплексные). Некоторые показатели могут иметь разновидности. Так, производственная технологичность конструкции изделия характеризуется конструкторскими и технологическими показателями технологичности. *Конструкторские показатели определяют конструктивную преемственность* — совокупность свойств изделия, характеризующую повторяемость в нем составных частей, относящихся к изделиям данной классификационной группы, и применяемостью новых составных частей, обусловленных его функциональным назначением, а также некоторые требования к сложности ТП сборки.

К конструкторским показателям технологичности конструкции относятся:

коэффициент применяемости деталей

$$K_{пд} = 1 - D_{тр\ ор} / D_{тр\ общ},$$

где $D_{тр\ ор}$ — число типоразмеров оригинальных деталей; $D_{тр\ общ}$ — общее число типоразмеров деталей без учета крепежа;

коэффициент применяемости электрорадиоэлементов

$$K_{п\ эрэ} = 1 - H_{тр\ ор\ эрэ} / H_{тр\ эрэ},$$

где $H_{тр\ ор\ эрэ}$ — общее число типоразмеров оригинальных ЭРЭ; $H_{тр\ эрэ}$ — общее число типоразмеров ЭРЭ;

коэффициент применяемости узлов

$$K_{пз} = 1 - E_{тр\ ор} / E_{тр},$$

где $E_{тр\text{ ор}}$ — число типоразмеров оригинальных узлов; $E_{тр}$ — общее число типоразмеров узлов в изделии;

коэффициент повторяемости деталей и узлов

$$K_{пов\text{ де}} = 1 - (D_{т} + E_{т}) / (D + E),$$

где $D_{т}$ и $E_{т}$ — общее число типовых деталей и узлов в изделии;

коэффициент повторяемости ЭРЭ

$$K_{пов\text{ ИС}} = 1 - H_{т\text{ эрэ}} / H_{эрэ},$$

где $H_{т\text{ эрэ}}$ — число типовых ЭРЭ в изделии; $H_{эрэ}$ — общее число ЭРЭ в изделии;

коэффициент повторяемости ИС и микросборок

$$K_{пов\text{ ИС}} = 1 - H_{т\text{ ИС}} / H_{ИС},$$

где $H_{т\text{ ИС}}$ — число типоразмеров корпусов ИС и микросборок; $H_{ИС}$ — число ИС и микросборок;

коэффициент повторяемости печатных плат

$$K_{пов\text{ пп}} = 1 - H_{т\text{ пп}} / H_{пп},$$

где $H_{т\text{ пп}}$ — число типоразмеров печатных плат; $H_{пп}$ — число печатных плат;

коэффициент повторяемости материалов

$$K_{пов\text{ м}} = 1 - H_{мм} / D_{т\text{ ор}},$$

где $H_{мм}$ — число маркосортаментов;

коэффициент использования ИС и микросборок

$$K_{исп\text{ ИС}} = H_{ИС} / (H_{ИС} + H_{ЭРЭ});$$

коэффициент установочных размеров $K_{ур} = 1 - H_{ур} / H_{ЭРЭ}$, где

$H_{ур}$ — число видов установочных размеров ЭРЭ;

коэффициент сложности печатных плат $K_{с\text{ пп}} = 1 - H_{мпп} / H_{пп}$,

где $H_{мпп}$ — общее число многослойных печатных плат;

коэффициент освоенности деталей $K_{осв} = 1 - D_{ор} / D$, где $D_{ор}$ — число оригинальных деталей;

коэффициент сложности сборки $K_{с\text{ сб}} = 1 - E_{т\text{р}\text{ сб}} / E_{т\text{р}}$, где

$E_{т\text{р}\text{ сб}}$ — число типоразмеров узлов, требующих регулировки или пригонки в составе изделия с использованием специальных устройств или совместной обработки с разборкой и повторной сборкой; $E_{т\text{р}}$ — общее число типоразмеров узлов;

коэффициент сборности $K_{сб} = E / (E + D)$,

коэффициент точности обработки $K_{тч} = 1 - D_{тч} / D$, где $D_{тч}$ — число деталей с допуском качества 10 и менее.

Технологические показатели технологичности конструкции определяют технологическую преимущество конструкции, приспособленность ее к механизации и автоматизации при изготовлении, а также сложность ТП обработки деталей.

Под технологической преемственностью понимают совокупность свойств изделия, характеризующую применяемостью и повторяемостью технологических методов выполнения узлов и их конструктивных элементов, относящихся к изделиям данной классификационной группы. К технологическим показателям технологичности конструкции относятся:

коэффициент автоматизации и механизации монтажных соединений $K_{ам} = N_{ам} / N_{м}$, где $N_{ам}$ — число монтажных соединений, выполняемых с использованием автоматизации и механизации; $N_{м}$ — общее число монтажных соединений;

коэффициент механизации подготовки ЭРЭ к монтажу $K_{мп\ ЭРЭ} = N_{мп\ ЭРЭ} / N_{ЭРЭ}$, где $N_{мп\ ЭРЭ}$ — число ЭРЭ, механизированно подготовленных к монтажу;

коэффициент автоматизации контроля и настройки $K_{мкн} = N_{м\ кн} / N_{кн}$, где $N_{м\ кн}$ — число операций автоматизированного контроля и настройки; $N_{кн}$ — общее число операций контроля и настройки;

коэффициент применения типовых ТП $K_{тп} = N_{тп} / N_{п}$, где $N_{тп}$ — число типовых ТП; $N_{п}$ — общее число ТП;

коэффициент прогрессивности формообразования деталей $K_{ф} = D_{пр} / D$, где $D_{пр}$ — число деталей, выполненных с использованием прогрессивных способов формообразования (штамповка, литье под давлением, прессование пластмасс, порошковая металлургия и т. д.);

коэффициент сложности обработки $K_{со} = 1 - D_{м} / D$, где $D_{м}$ — число деталей, выполненных со снятием стружки;

коэффициент использования материалов $K_{им} = M / M_{м}$, где M — общая масса деталей и узлов; $M_{м}$ — масса исходных материалов.

К технологическим показателям технологичности относятся также энергоемкость изделия, характеризующая расход топлива или энергии на производство, обслуживание и ремонт изделий, а также его трудоемкость, материалоемкость, металлоемкость.

Технологичность конструкции РЭС определяется с помощью комплексного показателя для разрабатываемого нового изделия ($K_{кр}$) и для изделия-аналога ($K_{ка}$), которые вычисляют по формуле

$$K_{ка}(K_{кр}) = \frac{\sum_1^n K_i \varphi_i}{\sum_1^n \varphi_i} = \frac{K_1 \varphi_1 + K_2 \varphi_2 + \dots + K_n \varphi_n}{\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n},$$

где K_1, \dots, K_n — базовые показатели, номенклатура которых зависит от типа блока (электронный, радиотехнический, соединительный, коммутационный, распределительный, электромеханический, механический); радиотехнические блоки отличаются от электронных наличием приемопередающих и антенно-фидерных

устройств; $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ — коэффициенты значимости каждого базового показателя.

Для электронных блоков в качестве базовых показателей выбираются, например, $K_{исп\ is}(\varphi=1)$; $K_{ам}(\varphi=1)$; $K_{мп\ ЭРЭ}(\varphi=0,75)$; $K_{м\ кн}(\varphi=1)$; $K_{пов\ ЭРЭ}(\varphi=3,1)$; $K_{п\ ЭРЭ}(\varphi=0,187)$; $K_{ф}(\varphi=0,11)$. В нормативной документации приводят номенклатуру базовых показателей и их коэффициенты значимости и для других типов блоков.

В качестве примера рассчитаем комплексный показатель качества для вновь разрабатываемого электронного блока, если $K_{ам}=0,65$; $K_{исп\ is}=1$; $K_{мп\ ЭРЭ}=1$; $K_{м\ кн}=0,8$; $K_{пов\ ЭРЭ}=1$; $K_{ф}=0,2$. Тогда $K_{кр}=(0,65 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 0,75 + 0,8 \cdot 0,5 + 0,95 \cdot 0,31 + 1 \cdot 0,187 + 0,2 \times \times 0,11)/(1 + 1 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187 + 0,11) = 0,6$.

Формула для определения нормативного комплексного показателя разрабатываемого изделия при серийном производстве имеет вид $K_{нр} = K_{ка} K_{сл} K_{ту} K_{оп} K_{от} K_{п}$, где $K_{ка}$ — комплексный показатель изделия-аналога; $K_{сл} = 1,02 \dots 1,2$ — коэффициент сложности нового изделия по сравнению с изделием-аналогом; $K_{ту}$, $K_{оп}$, $K_{от}$ — соответственно коэффициенты, учитывающие изменение технического уровня основного производства, уровня организации производства и труда завода-изготовителя нового изделия по отношению к заводу-изготовителю изделия-аналога; $K_{п}$ — коэффициент, учитывающий изменение типа производства (серийности изделия). Расчет коэффициентов $K_{ту}$, $K_{оп}$, $K_{от}$, $K_{п}$ осуществляется по формуле $K_j = Z_n / Z_a$, где Z_n и Z_a — значения соответствующих показателей для нового изделия и для аналога, определяемые на основе статистических данных.

Показатель технологически оценивается по формуле $K_{кр}/K_{нр} \geq 1$, где $K_{кр}$ — достигнутый комплексный показатель разрабатываемого изделия; $K_{нр}$ — нормативный комплексный показатель разрабатываемого изделия.

Кроме технологичности конструкции на технико-экономический эффект влияет улучшение технических показателей конструкции, которое также может дать экономию как при изготовлении, так и при эксплуатации нового изделия.

Существуют и другие показатели, характеризующие, например, эргономические и эстетические свойства конструкции. Чем выше эти показатели, тем меньше ущерб в эксплуатации вследствие выхода из строя технических средств из-за ошибок человека-оператора и тем меньше затраты на хранение изделий при реализации. Некоторые группы показателей РЭС стандартизованы.

Начальным этапом при оценке экономической эффективности разработки является анализ прогрессивности разрабатываемой конструкции, который основан на определении показателя ее технологичности и сопоставлении с показателем технологичности аналога. Если в результате расчета и сопоставления выявлено

повышение показателя технологичности, это является основанием для вывода о положительном эффекте при изготовлении или эксплуатации разрабатываемой конструкции. Далее анализируется улучшение технических (как абсолютных, так и относительных) показателей, так как это, как правило, обуславливает эффект из-за сокращения эксплуатационных затрат. Такой подход к технико-экономическому анализу конструкции РЭС позволяет комплексно оценить составляющие экономического эффекта, т. е. выявить (а затем и рассчитать) один из основных показателей — суммарную условно-годовую экономию как в сфере изготовления, так и в сфере эксплуатации:

$$\mathcal{E}_{\text{уг}} = \mathcal{E}_{\text{уг изг}} + \mathcal{E}_{\text{уг эксп}}$$

Полный учет всех составляющих экономического эффекта является, в свою очередь, залогом достоверности технико-экономического обоснования разрабатываемого изделия. Эффективность определяется отношением достигнутой условно-годовой экономии к затратам, с помощью которых эта экономия достигнута. Если это отношение больше единицы, то можно говорить о наличии эффективности.

§ 1.12. Методы обеспечения технологичности конструкции РЭС

К основным конструкторским методам обеспечения технологичности относятся: 1) использование наиболее простой и отработанной в производстве конструкторской иерархии (базовой конструкции); 2) выбор размеров и формы компонентов, деталей и узлов конструкции с учетом экономически целесообразных для заданных условий производства способов формообразования, при этом учитывается, что прогрессивные способы формообразования, используемые в массовом и серийном производстве, позволяют уменьшить материалоемкость изделий за счет уменьшения толщины элементов конструкции и сокращения отходов; 3) уменьшение числа уровней разукрупнения конструкций РЭС и выбор их формы и размеров с учетом унифицированной оснастки и стандартного оборудования; 4) уменьшение номенклатуры используемых материалов и полуфабрикатов; 5) уменьшение применения дефицитных или токсичных материалов, драгоценных металлов; 6) обоснованный выбор качества точности, шероховатости поверхности, установочных и технологических баз; 7) конструктивная и функциональная взаимозаменяемость узлов, минимизация числа подстроечных и регулировочных элементов (особенно с механической подстройкой); 8) контролепригодность и инструментальная доступность элементов, деталей и узлов (в том числе подстроечных), особенно при автоматизированном и механизированном изготовлении.

Отношение объема узла V_u к полезному объему V_n элементов более низкого уровня иерархии для ЭВМ ЕС-1022

ИС	Типовой элемент замены (ТЭЭ)	Панель	Рама	Стойка	ЭВМ
630	25	2	2	1,6	8

Иерархичность является одним из важнейших способов повышения технологичности конструкции и обусловлена следующими технологическими соображениями.

1. При увеличении степени интеграции ИС сверх экономически целесообразной резко растет процент брака и соответственно стоимость производства; часто принимают, что допустимый процент выхода годных вновь запускаемых в производство интегральных схем должен быть не ниже 10%. При более низком проценте выхода годных ИС следует снизить степень интеграции ИС и для их объединения усложнить конструкторскую иерархию.

2. При разделении всей конструкции на отдельные конструктивно законченные части появляется возможность организовать одновременное изготовление отдельных частей и тем самым сократить длительность общего цикла изготовления; кроме того, создаются условия для разбраковки на уровне отдельных узлов.

3. Облегчаются доступ к отдельным частям конструкции при изготовлении и ремонтпригодность при эксплуатации.

Характер конструкторской иерархии определяется: экономически целесообразной функциональной сложностью РЭС и числом уровней разукрупнения РЭС, общим числом объединенных узлов (ячеек, блоков, шкафов); характером конструкторско-технологических решений, принятых для данного вида иерархии. Конструкторская иерархия позволяет улучшить технологичность конструкции путем сокращения числа уровней разукрупнения, их типизации и унификации, организации хорошо оснащенных специализированных производств, типовых ТП для каждого уровня, автоматизации конструирования и изготовления с использованием ЭВМ и роботов. Однако конструкторская иерархия приводит к потере плотности компоновки (см. табл. В.2 и 1.7), увеличению массы, габаритов и стоимости РЭС (необходимы дополнительные работы по сборке и электромонтажу конструкции), снижению надежности из-за введения дополнительных несущих и монтажных элементов.

При разработке конструкции должны учитываться особенности ТП, особенно высокопроизводительных. Форма, размеры, точность изготовления, шероховатость поверхности деталей и узлов выбираются с учетом особенностей используемых ТП. Так, при задании допусков на литые керамические или ферритовые детали не-

обходимо учитывать усадку при обжиге, колебания которой могут достигать несколько процентов. Если проводится пайка нескольких последовательных участков одного проводника, то пайка последующего участка должна осуществляться более легкоплавким припоем во избежание нарушения предыдущих паек или необходимо осуществлять теплоотвод от мест предыдущей пайки. Для деталей, получаемых литьем под давлением, необходимо предусматривать литейные уклоны, исключать различные выемки, выбирать минимальную толщину стенок с учетом возможностей оборудования. Ряд ограничений на конструкцию накладывают ТП штамповки, заливки компаундом и пр. Неучет этих ограничений может сильно осложнить производственный процесс, увеличить объем доделочных и подстроечных работ.

Конструктор, ориентируясь на тот или иной ТП, должен учитывать его надежность. Наибольшей надежностью обладают автоматизированные операции изготовления и контроля изделий, обеспечивающие высокую точность поддержания режимов ТП изготовления и контроля. На неавтоматизированных этапах изготовления изделий, где определяющими являются действия операторов, возникает большинство дефектов готовой продукции. Особенно важно автоматизировать и обеспечить точность соблюдения режимов таких операций, результаты которых не могут быть выявлены непосредственно после их осуществления; несоблюдение режимов операций в свою очередь, может привести к появлению скрытого брака изделий. Примером операции, результат которой трудно проконтролировать непосредственно, является создание неразъемных контактных соединений на всех уровнях конструкции РЭС (пайка электрорадиоэлементов на платах, пайка или накрутка монтажных проводов на монтажных панелях и т. д.). При выполнении пропиточных работ возможны отклонения вакуума, давления, температуры, времени. Если из-за недостаточной температуры в процессе сушки в обмотке останется влага, то может произойти обрыв провода вследствие электрохимической коррозии. Если при опрессовке ИС полимером малы температура или время выдержки, то полимеризация будет неполной и влагозащитные свойства полимерной оболочки ухудшатся.

Принятые конструктивные решения во многом определяют надежность изделий. При этом стремятся к максимально возможной типизации и унификации конструкций, использованию нормированных геометрических размеров, что позволяет создать универсальную оснастку для различных по назначению узлов. Это сокращает время подготовки производства при запуске новых видов изделий. *Под типизацией* понимается сведение всего возможного многообразия конструктивных решений к небольшому числу. *Унификация* (от лат. unio — единство, facere — делать) означает использование одних и тех же конструкций для

создания аппаратуры различного назначения, т. е. расширение области использования типовых решений.

Типизация узлов осуществляется либо только по конструктивно-технологическим ограничениям (габариты и форма частей, число контактов разъемов, тип электро монтажа, число слоев коммутации и т. д.), либо и по конструктивно-технологическим, и по функциональным признакам (регистр, дешифратор, микропроцессор, запоминающее устройство, модулятор, компаратор, генератор и т. д.). В первом случае конструктивная типизация позволяет уменьшить до минимума число уровней разукрупнения и, следовательно, число ТП и количество технологической оснастки, лучше оснастить ТП и более тщательно его отладить (создать типовой ТП). Во втором случае использование функционального принципа упрощает и обслуживание аппаратуры при эксплуатации, уменьшает номенклатуру блоков, контрольного оборудования, запасного комплекта. Негативной стороной любой типизации является возможность появления избыточности. При конструктивно-технологической типизации возможно неполное заполнение узлов элементами из-за ограниченного числа контактов в соединителях. Функциональная типизация может привести к неполному использованию всех элементов из-за того, что часть их (например, выход дешифратора или каскадов усилителя) в некоторых узлах может не использоваться. Кроме потерь объема это приводит к увеличению потребляемой мощности и уменьшению надежности.

Одной из задач типизации является рациональный выбор ограниченного параметрического ряда базовых конструкций из исходного ряда, определенного государственным или отраслевым стандартом. Исходными данными для выбора являются: 1) функция спроса (потребности) базовой конструкции того или иного типоразмера $W=f_1(x)$; 2) функция стоимости (затрат) на базовую конструкцию того или иного типоразмера $x: C=f_2(x)$; 3) функция потерь на адаптацию при использовании базовых конструкций большего или меньшего размера $A=f_3(x)$. Здесь W, C, A — соответственно спрос, стоимость, затраты на адаптацию той или иной базовой конструкции. При выборе оптимального параметрического ряда базовых конструкций критерием оптимальности являются наименьшие суммарные затраты $\min(\sum WC + \sum A)$.

Более общим критерием оптимальности является максимум среднего экономического выигрыша от упорядочения производства РЭС при проектировании и внедрении параметрического ряда. Выбор оптимального ряда блоков производится сопоставлением годовой суммы затрат в производстве и эксплуатации при исходном, разреженном и уплотненном рядах. При этом используются ряды предпочтительных чисел и ряды линейных размеров. Таким способом построены различные конструкционные системы РЭС (см. § 1.7).

Особое внимание при разработке конструкции следует обращать на ограничение номенклатуры материалов, уменьшение дефицитных и токсичных материалов, драгоценных металлов, материалоемкости изделий. Так, целесообразно коммутацию элементов ИС выполнять не золотом, а алюминием или медью. Это, однако, не исключает применения при необходимости подложки из сапфира или других дефицитных материалов. Нежелательно использовать в конструкции такие токсичные материалы, как оксид бериллия и некоторые компаунды (например, КТ-102), так как меры по обеспечению техники безопасности усложняют подготовку производства, но в технически обоснованных случаях они могут быть использованы.

Технологичность конструкции РЭС обеспечивается на всех этапах разработки. При согласовании ТЗ определяют требования по технологичности РЭС в целом (унификация, типизация, преемственность), устанавливается связь показателей РЭС и технико-экономических требований с использованием новых материалов и ТП. На этапе *технического предложения* разрабатываются варианты членения конструкции РЭС, определяются заимствованные и оригинальные детали, ожидаемый уровень технологичности конструкции. На этапе *эскизного проекта* более детально уточняются членение конструкции, используемые типовые конструкции, параметры материалов, способы базирования деталей и регулировки узлов, возможности использования типовых технологических процессов, мероприятия по удобству обслуживания, номенклатура сменных и ремонтных деталей. На этапе *технического проекта* выявляется возможность применения покупных изделий, стандартных, освоенных производством деталей и узлов и обеспечение технологичности сложных деталей; определяются методы обработки деталей, возможность параллельной и независимой сборки узлов и деталей; оценивается возможность применения типовых и групповых ТП; отрабатывается конструкция деталей, предназначенных для обслуживания и ремонта; обеспечивается минимизация пригоночных и наладочных работ. На этапе *рабочей документации* уточняется номенклатура унифицированного крепежа и типовых элементов; анализируется возможность обеспечения технологичности сборки (исключение промежуточной разборки, выбор способов базирования и фиксирования, методов регулировки); устанавливаются экономически целесообразные способы получения заготовок; производится поэлементная отработка конструкции деталей и узлов на технологичность.

На всех этапах разработки конструкции начиная с технического предложения производится *контроль конструкторской документации* на технологичность. На этапе *технического предложения* проверяется правильность выбора членения конструкции на узлы и детали в соответствии с требованиями технологичности; на

этапе *эскизного проекта* уточняется компоновка (простота, преемственность конструкции, удобство изготовления, монтажа, регулировки, соответствие марок используемых материалов установленному перечню); на этапе *технического проекта* оценивается возможность параллельной сборки и контроля узлов изделия и всего изделия в целом, технологичность сборки изделия и его узлов, обеспечение взаимозаменяемости сборочных узлов и деталей; минимизируется объем доделочных работ. На этапе *рабочей документации* следует обращать внимание на наличие сборочных баз деталей и узлов, требования точности выполнения размеров и обеспечение необходимой шероховатости поверхности деталей, технологичность используемых видов производств.

Вопросы для самоконтроля

1. Кто формулирует требования к новому изделию?
2. Кто составляет техническое задание? Какие оно содержит разделы?
3. Кто участвует в разработке конструкции РЭС?
4. Какие существуют стадии и этапы разработки изделия?
5. На каком этапе обязательны сборочный чертеж и чертежи деталей?
6. Какие признаки определяют конструкцию РЭС как большую систему?
7. Какова обобщенная системная модель конструкции РЭС?
8. В чем сущность системного подхода при конструировании?
9. Какими методами осуществляется анализ конструкции?
10. Какими методами осуществляется синтез конструкции?
11. Какие задачи конструирования и подготовки производства решаются с помощью автоматизированных систем?
12. Каков порядок обработки информации при автоматизированном конструкторском проектировании РЭС?
13. Существует ли связь между конструкцией РЭС и возможностями САПР?
14. Существует ли связь между конструкцией РЭС и возможностями ГПС?
15. Какими методами можно получить экспериментальную математическую модель конструкции?
16. Что такое стандартизация?
17. Какие формы стандартизации Вам известны?
18. Какие виды стандартов Вам известны?
19. Что такое конструкционные системы РЭС? Каков их состав?
20. Назовите типы корпусов ИС и их характеристики.
21. Какова специфика конструкторской документации, выполненной автоматизированными методами?
22. Какова специфика конструкторской документации на машинных носителях?
23. Какие задачи решает стандартизационный контроль?
24. Как взаимосвязаны конструкция и технология изготовления РЭС?
25. Что такое надежность технологического процесса?
26. Какие существуют методы повышения надежности технологического процесса?
27. Назовите группы показателей технологичности РЭС.
28. Как осуществляется технико-экономический анализ эффективности новой разработки?
29. Каковы основные конструктивные методы повышения технологичности конструкции?
30. Как изменяется характер работ по повышению технологичности конструкции РЭС на различных этапах разработки?

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ РЭС

§ 2.1. Влияние электрических соединений на параметры конструкции РЭС

Компоновка РЭС связана с пространственным размещением компонентов по уровням конструкторской иерархии и неотделима от вопросов реализации *электрических соединений*, под которыми понимается *часть конструкции, предназначенная для обеспечения электрически неразрывных связей* при объединении нескольких более простых РЭС в одно более сложное. Электрические соединения обычно рассматриваются в двух аспектах: межконтактные соединения и контактирование. Технологический процесс выполнения электрических соединений называется электромонтажом (монтажом).

Конструкция электрических соединений в значительной степени определяет эффективность и качество конструкции всего РЭС. Искажение, затухание и задержка непрерывного или дискретного сигнала при распространении в электрической линии связи, а также перекрестные помехи могут нарушить нормальное функционирование РЭС: вызвать сбой цифрового или изменить параметры аналогового устройства (коэффициент усиления, полосу пропускания, устойчивость к возбуждению, фазовый сдвиг и т. д.). Трудоемкость сборочных и электромонтажных работ при производстве РЭС составляет 40...60% всей трудоемкости изготовления изделий. От качества электромонтажных работ в значительной степени зависят не только стоимость, но и надежность работы РЭС при эксплуатации, масса и габариты аппаратуры. Надежность РЭС при эксплуатации в значительной степени определяется числом контактов, входящих в электрические соединения, вероятность отказа каждого из которых соответствует примерно вероятности отказа всего узла на кристалле. Объем электрических соединений составляет 3...15% всего физического объема блока РЭС (3...5% при реализации электрических соединений печатными шлейфами; 10...15% при реализации электрических соединений объемным проводом).

Конструкторско-технологические способы реализации электрических соединений (рис. 2.1), возникшие в разное время, применяются в различных случаях и до настоящего времени. Межконтактные соединения выполняются печатным монтажом или объемным проводом.

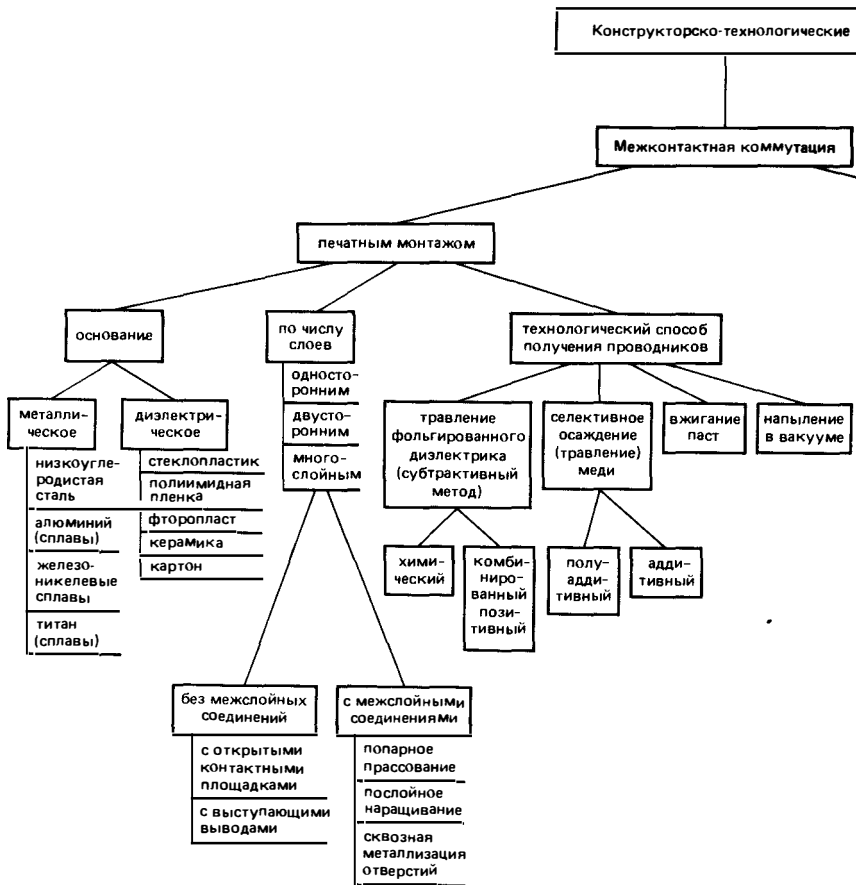
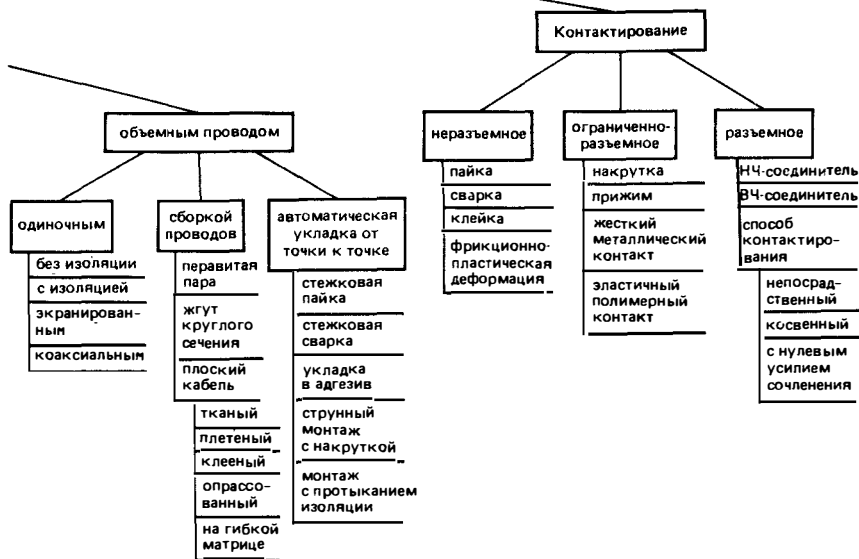


Рис. 2.1. Классификация конструкторско-технологических методов реализации электрических соединений РЭС

§ 2.2. Конструкции межконтактных электрических соединений на основе печатного монтажа

Печатный монтаж широко используется в конструкции РЭС. Он выполняется в виде печатных плат или гибких печатных кабелей (шлейфов). В качестве оснований для печатных плат используется диэлектрик или покрытый диэлектриком металл, а для гибких печатных кабелей — диэлектрик. Для выполнения печатных проводников диэлектрик часто покрыт медной фольгой толщиной 35...50 мкм либо медной или никелевой фольгой толщиной 5...10 мкм. Марки некоторых отечественных диэлек-



триков приведены в табл. 2.1, а основные физические параметры материалов для оснований печатных плат из диэлектриков — в табл. 2.2. По числу слоев печатные платы делятся на односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП); используются также двусторонние печатные платы с дополнительным монтажом из объемного изолированного провода (ДППдм).

Печатный монтаж выполняется *субтрактивными методами*, основанными на травлении фольгированного диэлектрика, *аддитивными* и *полуаддитивными*, основанными на селективном осаждении проводящего покрытия, и *методами послойного наращивания*.

Фольгированные и нефольгированные материалы, используемые при печатном монтаже

Марка материала	Материал	Толщина материала, мм	Толщина фольги, мкм
НФД-180-1	Диэлектрик низкочастотный фольгированный	0,8...3,0	50
СФ-1, СФ-2	Стеклотекстолит фольгированный	0,25...2,0	35 и 50
ФДТ-1, ФДТ-2	Диэлектрик фольгированный тонкий	0,5	50
ФДМ-1, ФДМ-2	Диэлектрик фольгированный для многослойного печатного монтажа	0,2; 0,25	35
ФДМЭ-1	Диэлектрик фольгированный для микроэлектроники	0,1	35
ОТСФ-1; ОТСФ-2	Стеклотекстолит фольгированный особотонкий	0,15; 0,20	50
ФДМТ-1, ФДМТ-2	Фольгированный травящийся диэлектрик для многослойного печатного монтажа	0,1	35
ФТС-1, ФТС-2	Стеклотекстолит фольгированный травящийся	0,08; 0,15; 0,5	20...35
СТФ-1, СТФ-2	Стеклотекстолит термостойкий фольгированный	0,13; 0,15; 0,20; 0,25; 1,0; 2,5	35
СПТ-3	Стеклоткань прокладочная травящаяся	0,025	—
Э	Стеклоткань, пропитанная лаком ЭИФ	0,06...0,12	—

Субтрактивные методы. Из субтрактивных методов наибольшее применение нашли *химический негативный* (рис. 2.2) и *комбинированный позитивный* (рис. 2.3). Первый используется для получения односторонних печатных плат, внутренних слоев МПП и гибких печатных шлейфов. Его преимуществом является высокая точность геометрии проводников из-за отсутствия процессов гальванического осаждения меди. Вторым методом получают ДПП и МПП из фольгированного травящего диэлектрика. Способность диэлектрика к подтравливанию особенно важна для МПП, где от этого зависит надежность межслойных соединений. ДПП выполняются без использования травящегося диэлектрика. Печатные платы характеризуются плотностью монтажа, которая в зависимости от ширины проводников и зазоров может быть (табл. 2.3) трех классов. Недостатками субтрактивных методов являются невозможность получения проводников с шириной менее 150 мкм (табл. 2.3) и большой отход меди при травлении.

Аддитивный и полуаддитивный методы (табл. 2.4 и 2.5) и *методы послойного наращивания* позволяют увеличить плотность монтажа по сравнению с плотностью монтажа МПП, полученных субтрактивными методами. Метод послойного наращивания был

Основные характеристики материалов для печатных плат

Параметр	Гетинакс	Текстолит на капроновой основе	Стеклотекстолит на эпоксидной основе	Полиимид	Керамика 22ХС	Фторопласт 4Д
Плотность без фольги, кг/м ³	1300...1400	1300...1500	1600...1900	1400	3600	2200
Относительная диэлектрическая проницаемость	4,5...6	4,5...6	5...6	3,5...4	10,3	2
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте $f=10^6$ Гц	0,008...0,02	0,03...0,04	0,005...0,02	0,002...0,05	$(5...6) \cdot 10^{-4}$	$(2...3) \cdot 10^{-4}$
Объемное удельное сопротивление, Ом·см	$10^{12}...10^{14}$	$10^{12}...10^{14}$	$10^{14}...10^{15}$	$10^{16}...10^{17}$	$10^{14}...10^{15}$	$10^{18}...10^{19}$
Интервал рабочих температур, °С	-60...+80	-60...+70	-60...+100	-260...+250	-260...+400	-100(-200)...+260
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,25...0,3	0,23...0,34	0,34...0,74	0,3	10...20	0,25
ТКЛР, 10^{-6} К^{-1}	22 (связующее — бакелит)	22 (связующее — бакелит)	8...9	22...26	3...6	80...250

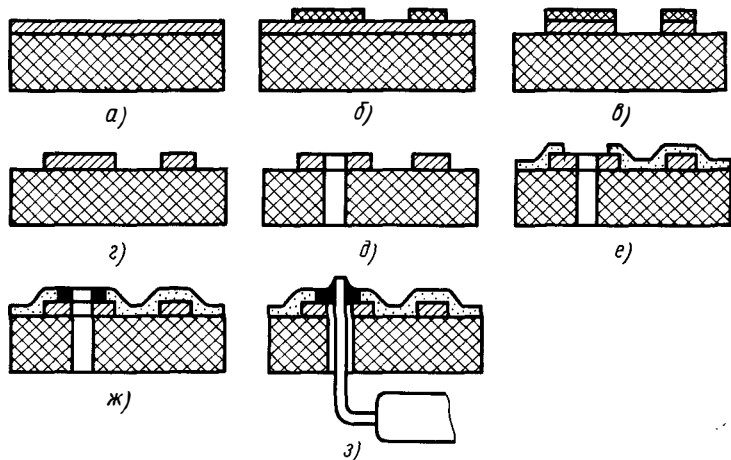


Рис. 2.2. Последовательность основных операций изготовления печатных плат химическим негативным методом:

a — заготовка из фольгированного диэлектрика; *б* — нанесение фоторезистивного печатного рисунка; *в* — травление печатного рисунка; *г* — удаление фоторезиста; *д* — механическая обработка монтажных отверстий; *е* — нанесение лаковой (эпоксидной) маски; *ж* — облуживание контактных площадок; *з* — пайка выводов ЭРЭ

разработан для фольгированного стеклотекстолита, но не нашел широкого применения из-за высокого процента брака и длительности цикла изготовления. Развитием этого метода явилось выполнение многослойных структур с использованием керамики и сквозного анодирования алюминия. Аддитивный и полуаддитивный методы позволяют получить более узкие проводники и зазоры между ними благодаря использованию более тонких проводящих слоев (5...20 мкм), а также сэкономить медь, осаждаемую только в местах размещения проводящих трасс. Кроме того, при браковке платы рисунок

Таблица 2.3
Параметры элементов печатных плат, выполненных субтрактивными методами

Параметр	Класс плотности печатного монтажа		
	1	2	3
Ширина проводника, мм	0,5	0,25	0,15
Расстояние между проводниками, контактными площадками, проводником и контактной площадкой, проводником и металлизированным отверстием, мм	0,5	0,25	0,15
Отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине платы	0,4	0,33	0,33
Ширина пояса контактной площадки, мм	0,05	0,035	0,025

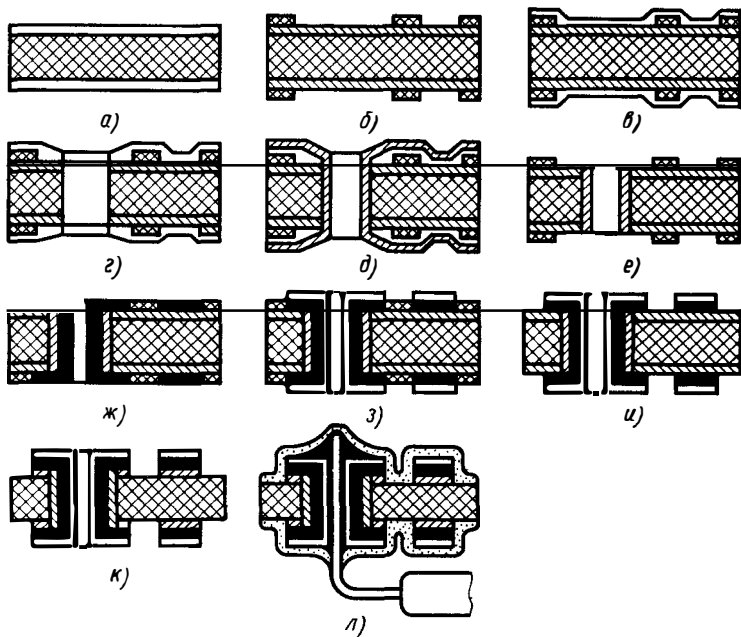


Рис. 2.3. Последовательность основных операций изготовления печатных плат комбинированным позитивным методом:
a—заготовка из фольгированного диэлектрика; *б*—нанесение фоторезистивного печатного рисунка; *в*—нанесение лаковой рубашки; *г*—сверление монтажных и переходных отверстий; *д*—химическое меднение; *е*—удаление лаковой рубашки; *ж*—гальваническое меднение; *з*—нанесение защитного покрытия; *и*—удаление фоторезиста; *к*—травление печатного рисунка; *л*—пайка выводов ЭРЭ и лакировка платы

Таблица 2.4
 Последовательность основных операций при изготовлении печатных плат полуаддитивным и аддитивным методом

Полуаддитивный метод	Аддитивный метод
<ol style="list-style-type: none"> 1. Подготовка поверхности для обеспечения адгезии (травление поверхности) 2. Формирование отверстий 3. Активация поверхности 4. Химическое тонкослойное меднение толщиной около 5 мкм 5. Формирование рисунка проводников 6. Нарастивание меди гальваническим способом 7. Стравливание химической меди в местах, где нет проводников 8. Нанесение защитного покрытия 9. Окончательная обработка 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Подготовка поверхности для обеспечения адгезии (покрытие слоем адгезива толщиной 50 мкм) 2. Формирование отверстий 3. Нанесение рисунка проводников с помощью каталитических частиц активатора (PdCl_2, SnCl_2) 4. Химическое меднение 5. Нанесение защитного покрытия 6. Окончательная обработка

Параметры элементов многослойных печатных плат, выполненных различными методами

Метод	Минимальная ширина проводника, мм	Максимальные размеры платы, мм	Максимальное погонное сопротивление проводников, Ом/см	Погонная паразитная емкость, пФ/см
Субтрактивный: фольга толщиной 35...50 мкм	0,5...1,0	250 × 250 (500 × 500)	0,001	0,5...0,8
фольга толщиной 5...9 мкм Полуаддитивный	0,25...0,5 0,125...0,25	250 × 250 250 × 250 (600 × 700)	0,01 0,005	0,3...0,5 0,5...0,7
Аддитивный	0,125...0,25	250 × 250	0,005	0,5...0,7
Толсто пленочный	0,15...0,25	100 × 120	0,3...2,0	0,9...2,0
«Сквозное» анодирование алюминия	0,05...0,1	250 × 250 (500 × 500)	1,0...2,0	до 10,0
МПП на основе полиимидной пленки	0,03...0,05	60 × 48 (100 × 100)	1,0	1,0...2,0

Примечание. В скобках даны предельные размеры.

может быть стравлен и нанесен вновь. Самое сложное здесь — получение хорошей адгезии проводников к основанию платы.

Некоторые методы печатного монтажа — метод открытых контактных площадок (рис. 2.4), выступающих выводов (рис. 2.5), послойного наращивания фольгированного диэлектрика (рис. 2.6), попарного прессования (рис. 2.7) — в новых разработках не используются. Метод открытых контактных площадок применим только для корпусированной элементной базы и имеет ряд технологических трудностей при сборке. Метод выступающих

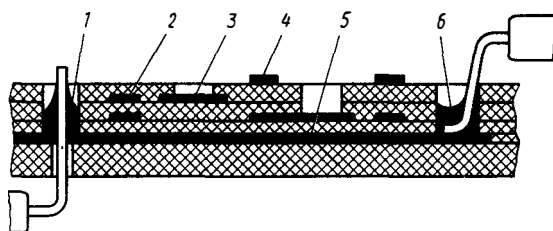


Рис. 2.4. Структура МПП, изготовленной методом открытых контактных площадок:

1 — пайка в «колодеце» штыревого вывода; 2 — печатный проводник внутреннего слоя; 3 — монтажная площадка; 4 — печатный проводник внешнего слоя; 5 — соединение монтажных площадок в одном слое; 6 — пайка в «колодеце» планарного вывода

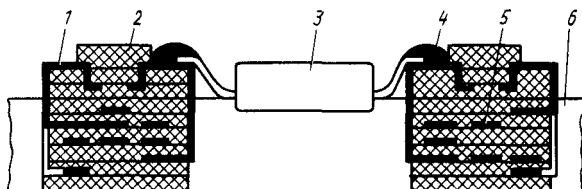


Рис. 2.5. Структура МПП, изготовленной методом выступающих выводов: 1—переход печатного проводника в монтажную площадку; 2—крепящая колодка; 3—радиоэлемент с планарными выводами; 4—пайка выводов ЭРЭ; 5—печатный проводник внутреннего слоя; 6—окно платы

выводов сложен и часто не обеспечивает минимизации помех. Метод металлизации сквозных отверстий (рис. 2.8, рис. 2.9) применяется в основном для наземной аппаратуры, где перепады температуры сравнительно невелики и мала вероятность разрушения межслойных металлизированных переходов из-за разницы расширения диэлектрика и меди.

Аддитивный и полуаддитивный методы. Примером полуаддитивной технологии является технологический процесс изготовления МПП на основе полиимидной пленки. Полиимиды относятся к классу термостойких (от -200 до $+400^{\circ}\text{C}$) высокомолекулярных соединений. Полиимидная пленка имеет малую усадку (до $0,08...0,1\%$), разнотолщинность (до ± 3 мкм), плотность инородных включений ($0,1...0,2\text{ см}^{-2}$). В промышленности используются отечественные пленки марок ПМ, ПИ-40 или зарубежная пленка фирмы «Dupont» марки «Kapton 200H». В процессе изготовления проводят травление отверстий в пленке, металлизацию ее методом напыления трехслойной структуры $\text{Cr}-\text{Cu}-\text{Cr}$ толщиной $1...2$ мкм, травление рисунка проводников, селективное гальваническое наращивание слоя меди толщиной до 20 мкм, защиту сплавом олово—висмут.

Из полученных таким образом пленок с двусторонней коммутацией можно создавать многослойные структуры путем спаивания слоев в вакууме (рис. 2.10). Размеры таких оснований (по зарубежным источникам) могут достигать 406×355 мм и ограничиваются оборудованием для напыления проводящего слоя. Расчетами установлено, что использование оснований на многослойных полиимидных пленках (МПП ПИ) позволяет получить (при установке на них бескорпусных ИС) плотность компоновки узла не меньшую, чем на кремниевой пластине, но при лучших экономических показателях, так как применение узлов, выполненных полностью на кремниевых пластинах, выгодно в том случае, когда процент выхода годных составляет более 80% для кристаллов размером 5×5 мм и более $90...95\%$ для кристаллов размером 7×7 мм. Известны МПП ПИ с числом слоев до 30 .

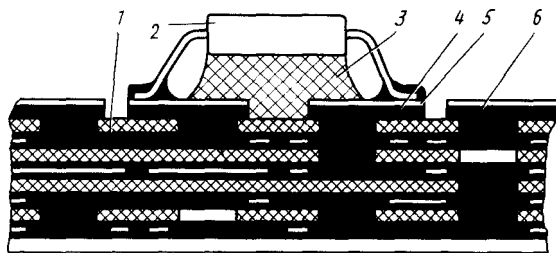


Рис. 2.6. Структура МПП послойного наращивания:

1—печатный проводник внутреннего слоя; 2—ЭРЭ с планарными выводами; 3—клеящая мастика; 4—защитное покрытие наружного слоя; 5—монтажная контактная площадка; 6—межслойный переход («столбик») меди

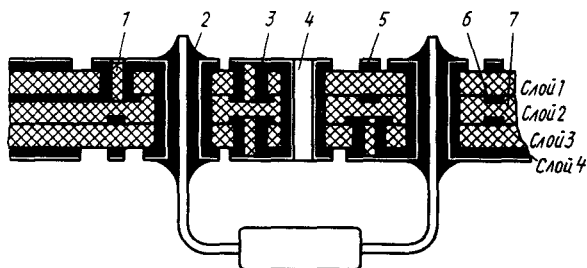


Рис. 2.7. Структура МПП попарного прессования:

1—переходное отверстие между внутренними и наружными слоями, заполненное связующим межслойной изоляцией; 2—монтажное отверстие; 3—защитное покрытие; 4—переходное отверстие между наружными слоями; 5—печатный проводник наружного слоя; 6—печатный проводник внутреннего слоя; 7—межслойная изоляция

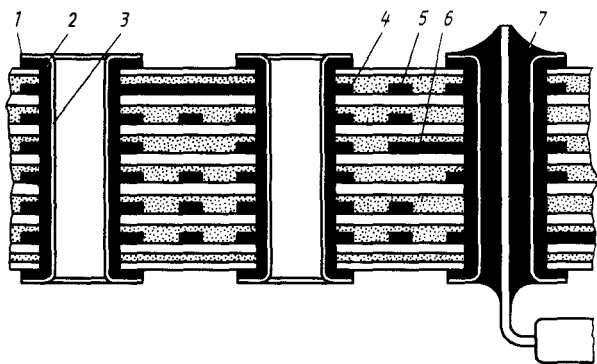


Рис. 2.8. Структура МПП, изготовленной методом металлизации сквозных отверстий:

1—контактная площадка наружного слоя; 2—защитное покрытие; 3—металлизация сквозного отверстия; 4—контактная площадка внутреннего слоя; 5, 6—проводники; 7—припой

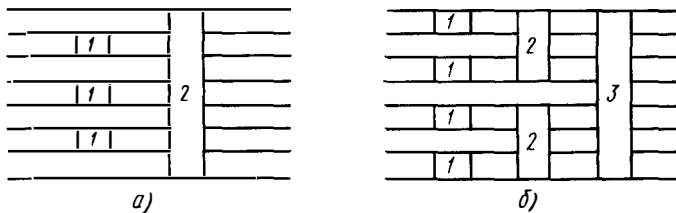


Рис. 2.9. Варианты схем промежуточных соединений МПП:
a—два уровня соединений; *б*—три уровня соединений; 1, 2, 3—последовательность изготовления соединений

Преимуществом такой структуры является высокая плотность электрических соединений и уменьшение теплового сопротивления ввиду малой толщины и высокой теплопроводности полиимида. К недостаткам следует отнести сравнительно невысокую жесткость, что требует размещения структуры МПП ПИ на основании из алюминиевого сплава, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) которого близок ТКЛР полиимидной пленки, возможность расслоения при нагреве или длительных вибрационных воздействиях. В обычных многослойных структурах слои соединены между собой еще и компаундом.

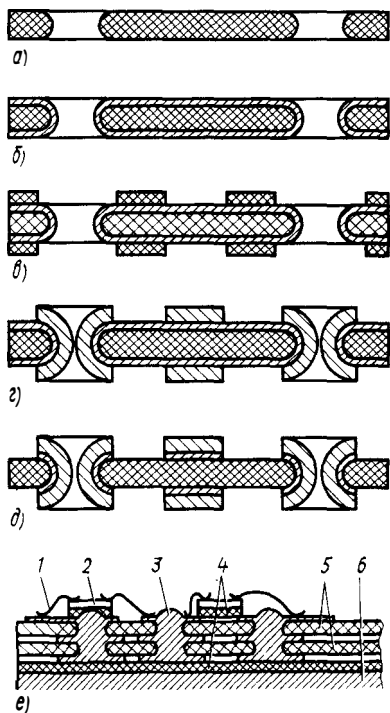


Рис. 2.10. Последовательность основных операций изготовления МПП на полиимидной пленке:

a—пленка с протравленными отверстиями; *б*—пленка с нанесенным подслоем Cr—Cu—Cr; *в*—нанесение защитного слоя фоторезиста; *г*—нанесение слоя меди 15...20 мкм и защитного слоя Sn—Bi; *д*—стравливание подслоя Cr—Cu—Cr; *е*—структура из спаянных слоев; 1—внешние выводы бескорпусной ИС; 2—кристалл бескорпусной ИС; 3—вакуумный спай через металлизированные отверстия; 4—клей (для крепления кристалла ИС к плате и платы к основанию); 5—двусторонние полиимидные платы; 6—алюминиевое основание

На основе структур МПП ПИ изготавливают одно- и двусторонние, а также многослойные гибкие печатные шлейфы. Кроме полиимида в качестве основы для таких шлейфов используют лавсан и фторопласт, однако шлейфы из полиимида лучше работают на изгиб (выдерживают до 10 000 перегибов с радиусом 0,5...1,0 мм). Параметры некоторых шлейфов приведены в табл. 2.6. Длина шлейфов ограничена активным сопротивлением проводящих линий.

Керамические платы. Одним из перспективных методов увеличения плотности компоновки является использование в качестве основания керамики, на которую методом трафаретной печати наносят проводники (из проводящих паст) и резисторы (из резистивных паст). В процессе обжига подобной структуры при температуре около 600...700° С происходит вжигание проводников и резисторов в основание, предварительно обожженное при температуре около 1600° С. В результате получают прочную, герметичную, химически инертную монолитную структуру со

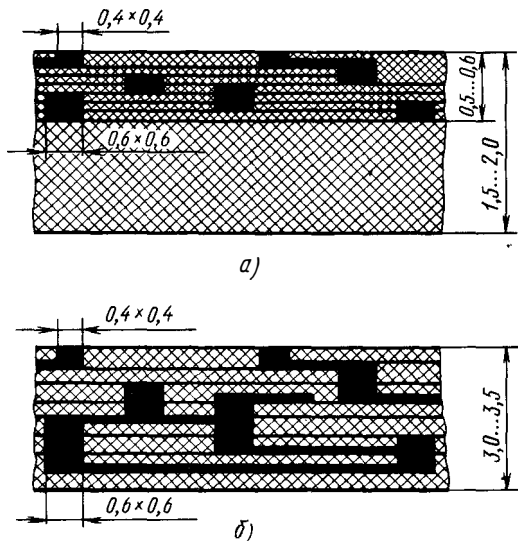
Таблица 2.6

Параметры гибких печатных шлейфов

Параметр	Полиимидные шлейфы с защитой полиимидом		Лавсановые шлейфы с полиэтилентетрафталатной защитой
	односторонние (субтрактивный метод)	двусторонние	
Минимальная ширина проводников и зазоров, мкм	200...400	30...50	200...400
Диаметр переходных отверстий, мкм	—	50...70	—
Толщина проводников, мкм	75...50	15...20	35...50
Толщина диэлектрического покрытия, мкм	40...50	40...50	20
Температурный диапазон работы, °С	-60...+220	-196...+300	-40...+150
Прочность сцепления металлического слоя с диэлектрическим основанием, МПа	2,5...5	10...15	2...2,7
Минимальный шаг балочных выводов, мм	1,25	0,5	2,5
Относительная стоимость	1,5	2...3	1,0

стабильными при эксплуатации размерами и высокой теплопроводностью; ТКЛР подобной структуры близок ТКЛР кремния, что позволяет непосредственно монтировать на такую подложку бескорпусные кристаллы БИС или кристаллы, помещенные в керамический микрокорпус (кристаллоноситель, кристаллодержатель). Недостатками многослойных керамических подложек являются большая масса и трудно контролируемая усадка при

Рис. 2.11. Сечение керамической МПП, полученной методом послойного наращивания и спекания (а) и групповым методом (б)



спекании, что затрудняет повторяемость геометрических размеров подложек и волнового сопротивления линий связи. Кроме того, большая диэлектрическая проницаемость керамики ($\epsilon = 8,5 \dots 9,5$) обуславливает значительную паразитную связь между проводниками, расположенными в разных слоях, что особенно нежелательно для быстродействующих схем. Структура керамической МПП представлена на рис. 2.11.

Платы на металлическом основании. В тех случаях, когда требуются хороший теплоотвод (источники питания), низкая

Таблица 2.7

Температурные коэффициенты линейного расширения материалов, используемых в конструкциях электро монтажа

Материал	ТКЛР, 10^{-6} K^{-1}	Материал	ТКЛР, 10^{-6} K^{-1}
Стеклотекстолит	8...9	ковар 29НК	4,5...6,5
Стекло, ситалл	5...12	с диэлектрическим покрытием	16
Керамика	3...6	Титан:	
Полиимидная пленка	22...26	анодированный	16...18
Алюминий:		с эпоксидной смолой	24
Сталь:		ВТ1-О	8...8,8
низкоуглеродистая	10...16	покрытый анодным	20
с эпоксидной смолой	12	слоем	
Железоникелевые сплавы:		Германий	6,1...6,6
инвар 36Н	1,5	Медь	16,4...17,3
сплав 35НКТ	4	Кремний	3,2...4,2
		Феррит 10С46	9,05
		Поликор	6,9
		Сплав МД15НП	6,2

Плотность компоновки для МПП и ИС различных типов

Плотность компоновки, ИС ₁₆ /см ²	0,3 ... 0,4	0,5...0,7	1,25	1,25	1,25	2,4 ... 4	2,4 ... 4
Конструкция платы	Стеклотекстолитовая МПП с линиями шириной 250... 500 мкм, ДПП с узкими линиями (150 ... 250 мкм)		Керамическая	Полиимидная	Керамическая	Полиимидная	
Конструкция ИС	С двухрядным расположением штыревых выводов	С планарными выводами	Микрокорпус	Микрокорпус	Микрокорпус	Бескорпусная	Бескорпусная

Примечание. ИС₁₆ — интегральная схема с 16 выводами.

Таблица 2.9

Сравнительные параметры различных способов монтажа в зависимости от типа корпуса ИС и типа печатной платы

Параметр	Варианты монтажа			
	корпуса с двухрядным расположением выводов, печатная плата на стеклотекстолите	керамические микрокорпуса, керамическая плата	бескорпусные кристаллы с проволочными выводами, плата на полиимидной пленке	кристаллы на полиимидном носителе, плата на полиимидной пленке
Площадь посадочного места, мм ² : 16-выводная ИС * 64-выводная ИС Максимально возможное число выводов ячейки Мощность, рассеиваемая одной ячейкой 78 × 95 мм, Вт	174 (20,5 × 8,5) 1712 (81,5 × 21) 60 ... 80	81 (9 × 9) 441 (21 × 21) 100 ... 200	34 (5,3 × 6,4) 90 (9,5 × 9,5) Свыше 300	34 (5,3 × 6,4) 90 (9,5 × 9,5) Свыше 300
	3,5	8	8	10 ... 12 (до 50, плата со встроенным теплоотводом **)

* В скобках даны габариты посадочного места, мм; посадочное место соответствует площади платы для размещения ИС с выводами, подготовленными для монтажа.

** Встроенный теплоотвод выполнен в виде столбиков припоя, распределенных по площади платы и касающихся алюминиевого основания.

стоимость и высокая прочность (микрокалькуляторы), хорошее согласование по ТКЛР платы и устанавливаемых на нее элементов

(бортовая аппаратура) или требуются подложки сложной формы, в качестве основания платы можно использовать *подложки из металла или сплава*, покрытые диэлектриком. Подложки из алюминиевых сплавов анодируются, стальные подложки покрываются слоем эмали (фарфора) толщиной 0,1 мм. Для обеспечения работы в широком диапазоне температур необходимо, чтобы ТКЛР навесных элементов (ЭРЭ, ИС) и платы различался не более чем на $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (табл. 2.7). Если ТКЛР отличается на большее значение, то навесные элементы монтируются с помощью гибких выводов или монтажное основание выполняется достаточно эластичным (например, из полиимидной пленки). Если навесные элементы кремниевые, то можно использовать подложки из инвара. Характеристики различных методов реализации электрических связей приведены в табл. 2.8 и 2.9.

§ 2.3. Конструкции межконтактных соединений из объемного провода

Несмотря на худшие массогабаритные и экономические параметры (по сравнению с печатным монтажом), электрические соединения из объемного провода используются в опытном производстве (не надо изготавливать фотошаблонов), для выполнения навесных электрических соединений в ИС (в дополнение к планарному монтажу и для соединения контактных площадок ИС с внешними выводами), для осуществления длинных или высокочастотных связей и т. д. В настоящее время промышленность выпускает обширную номенклатуру объемных проводов: одножильные без изоляции (золотые, алюминиевые, медные, медные луженые); с изоляцией (волоконистой, пластмассовой, резиновой, лаковой); экранированные; коаксиальные кабели; многожильные кабели (опрессованные, тканые, клееные, собранные и увязанные в круглый жгут).

Провода без изоляции диаметром 10 ... 150 мкм используют в основном для электрических соединений ИС и микросборок. Параметры проводов из золота, алюминия и его сплавов приведены в табл. 2.10 и 2.11. Выбор конкретного проводника зависит от ряда факторов: силы протекающего тока, возможности автоматизированного монтажа (в этом случае относительное удлинение должно быть не более 3 ... 7%), требований по прочности, стоимости, методу контактирования (пайка, сварка), допустимости провисания провода. Золотая проволока более дорогая, но хорошо поддается пайке и сварке, совместима практически со всеми материалами контактных площадок, но менее прочная. Провода из алюминия и его сплавов более дешевые, лучше совместимы с алюминиевыми контактными площадками, но способствуют возникновению трещин на границе раздела провода и контактной площадки, что особенно опасно при дополнительных механических нагрузках, например из-за

Прочностные параметры золотых проводов

Диаметр провода, мкм	Усилие разрыва, мН	Относительное удлинение, %	Усилие разрыва, мН	Относительное удлинение, %
	при комнатной температуре		при температуре сварки	
10 ± 1	15 ... 30	1,5 ... 4	Более 7	Более 0,5
15 ± 1	30 ... 50	2...5	—»— 20	—»— 0,5
20 ± 1	60 ... 90	2...6	—»— 40	—»— 0,5
25 ± 1	90 ... 130	2 ... 7	—»— 55	—»— 1
30 ± 1	140 ... 180	3 ... 9	—»— 80	—»— 1
35 ± 1	180 ... 250	3,5 ... 11	—»— 110	—»— 1
40 ± 1	220 ... 320	4 ... 12	—»— 140	—»— 1

Таблица 2.11

Прочностные характеристики алюминиевых проводов

Материал	Диаметр провода, мкм	Легирую- щая добав- ка, %	Усилие раз- рыва, мН	Относитель- ное удлине- ние, %
Al (99,99%), твердая модификация	30	—	80 ... 120	0,5 ... 2,0
Al (99,999%), мягкая модификация	30	—	30 ... 50	5 ... 15
Al + Si, твердая модификация	20	1	95 ... 110	0,5 ... 3,5
	30	1	210 ... 230	1,0 ... 4,0
Al + Si, отсутствие напряжений	20	1	80 ... 95	0,5 ... 3,5
	20	2	110 ... 160	0,5 ... 4,0

внутренних напряжений в герметизирующем полимере. Для золотых проводов используется в основном термокомпрессионная сварка, а для алюминиевых — ультразвуковая. Если провисание недопустимо, то используют более прочный провод, предусматривают его промежуточное крепление каплей компаунда (если длина перемычки превышает 3 мм).

Провода с изоляцией. Для реализации электрических соединений в пределах платы, блока, шкафа наряду с печатным монтажом широко используют монтаж объемными проводами с изоляцией и их сборками в виде скрученных пар (бифиляров), скрученных троек, плоских кабелей и круглых жгутов. В ряде случаев монтаж объемными проводниками экономичнее, чем с помощью печатных плат (например, если плата большая и насыщенная, а монтаж объемным проводом выполняется автоматизированным методом). Электрические соединения объемным проводом позволяют вносить изменения и облегчают ремонт, но затрудняют

воспроизводимость параметров электрических связей (волнового сопротивления, паразитных параметров). Провода, предназначенные для скруток, могут быть одножильные (МНВ) и многожильные (МНВ-Г). В первом случае контактирование осуществляется накруткой (рис. 2.12), во втором — пайкой.

Использование ленточных (плоских) проводов и кабелей позволяет снизить габариты и массу электрических соединений на 40 ... 60% и более при значительном увеличении плотности компоновки, а также уменьшить трудоемкость монтажа на 20 ... 40% благодаря применению средств механизации и автоматизации. Прочность ленточных проводов на разрыв в 3 ... 5 раз выше, чем прочность обычных монтажных проводов; расположение жил в одной плоскости увеличивает гибкость соединительных устройств. У ленточных кабелей лучше теплоотвод и выше стабильность электрических параметров, особенно при применении экрана из фольгированного диэлектрика. В производстве удобны плетеные кабели, представляющие совокупность проводов, переплетенных изолирующей нитью (рис. 2.13, в). Изготавливаются они на станках типа ткацких, могут включать провода различных сечений и типов: скрученные пары, одно- или многожильные провода, экранированные и без экрана, коаксиальные кабели. Например, тканый кабель типа 12В-3Н-0,35 содержит 12 высокочастотных проводов и 3 низкочастотных провода сечением 0,35 мм²; длина кабеля 25 м. Разрезанием скрепляющих нитей можно освободить нужный проводник в том или ином месте кабеля.

Иногда в РЭС применяют кабели, основой которых является резиновый ремень (рис. 2.14) с перфорированными отверстиями. Монтажные провода типа ГФ, ГФЭ, МГТФ, МГТФЭ пропускают через отверстия и распаивают на платах. Монтаж гибких матриц на основе резиновых ремней поддается автоматизации.

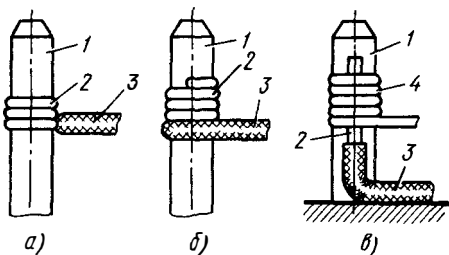


Рис. 2.12. Виды электромонтажа накруткой:

а — немодифицированное соединение; б — модифицированное соединение; в — бандажное соединение; 1 — вывод; 2 — неизолированная часть провода; 3 — изолированная часть провода; 4 — бандажная проволока

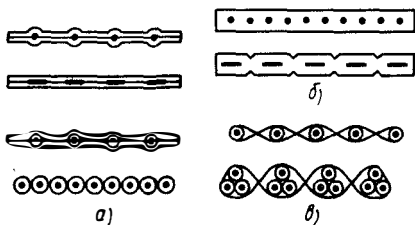


Рис. 2.13. Конструкции плоских кабелей:

а — клееные; б — опрессованные; в — плетеные

Характеристики изолированных проводов, используемых для электрических соединений РЭС

Марка провода	Сечение жилы, мм ²	Наружный диаметр, мм	Интервал рабочих температур, °С	Область применения
МГШВ	0,14	1,4	- 50 ... + 70	Для фиксированного монтажа
	0,2	1,6		
	0,35	1,9		
МГШВЭ	0,35	2,5	- 50... + 70	То же
	0,07	0,75		
МГТФ	0,10	0,85	- 60 ... + 220	Для монтажа слаботочных схем, работающих при повышенной температуре
	0,14	0,80		
	0,14	1,6		
МГТФЭ	0,14	1,6	- 60 ... + 250	Для фиксированного монтажа аппаратуры, работающей при повышенной температуре
Ф	0,07; 0,1	—	—	—
ФЭ	0,14; 0,2	—	—	—
ГФ	0,35; 0,5	—	—	—
ГФЭ	0,75; 1,0; 1,5	—	—	—
МОГ	0,3; 0,5	—	- 60 ... + 250	Для передачи сигналов от неподвижных частей аппаратуры к подвижным
БПВЛ	0,35; 0,5;	—	- 60 ... + 70	Для монтажа бортовой сети низкого напряжения
	0,75; 1,0;			
	1,5; 2,5			
РКГМ	0,35	—	- 60 ... + 180	Для монтажа влагостойкой аппаратуры, работающей при повышенной температуре
ПРКС	0,5; 1,0;	—	—	—
	1,5; 2,5	—	—	—

Таблица 2.13

Параметры плоских кабелей для РЭС

Марка кабеля	Число жил	Сечение жилы, мм ²	Размеры, мм	Материал изоляции	Диапазон рабочих температур, °С
КППР	4, 20	0,12; 0,20;	Толщина 1,15... ... 1,9; ширина 6,5... 65,8	Поливинилхлорид, полиэтилен	- 50 ... + 70 (поливинилхлорид) - 60 ... + 70 (полиэтилен) - 60... + 100 (облученный полиэтилен)
	12	0,35; 0,50; 0,20; 0,35;			
ППР*	15, 18	0,50	Толщина 1,1... ... 1,3; ширина 11... 21		
	1	0,20			
	10	1,0; 1,5; 6,0 0,12			

* Жилы однопроволочные плоские.

Характеристики некоторых типов проводов и кабелей приведены в табл. 2.12—2.14. Иногда используются жгуты круглого сечения, которые получают увязкой некоторого количества одиночных проводников. Длинные проводники укладывают с наружной стороны жгута, экранированные проводники и проводники малых сечений — внутри жгута.

Параметры кабельных изделий для РЭС

Тип или конструкция изделия	Волновое сопротивление, Ом	Емкость, пФ/м	Индуктивность, мкГн/м	Сопротивление сигнального проводника постоянному току, Ом/м	Коэффициент перекрестной помехи	Время задержки, нс/м
Скрученная пара проводников типа МНВ сечением $0,05 \text{ мм}^2$	103	62	0,66	0,35	0,15	6
Скрученная тройка проводников типа МНВ сечением $0,05 \text{ мм}^2$	90	67	0,54	0,35	0,07	6
Одиночный провод типа МНВ сечением $0,05 \text{ мм}^2$	150 ... 200	30	1,0	0,35	—	3,3
ИКМ 0,3/2,4	100 ± 10	46	0,45	0,3	—	4,5
ИКМ 0,12/1,1	100 ± 10	45	0,46	4,6	—	4,5
ПВП мс $75 \cdot 50 \times 0,2$	$75 \pm 7,5$	67	0,38	0,55	0,17	5
ПВП мс $100 \cdot 54 \times 0,18$	100 ± 10	52	0,49	0,69	0,15	5

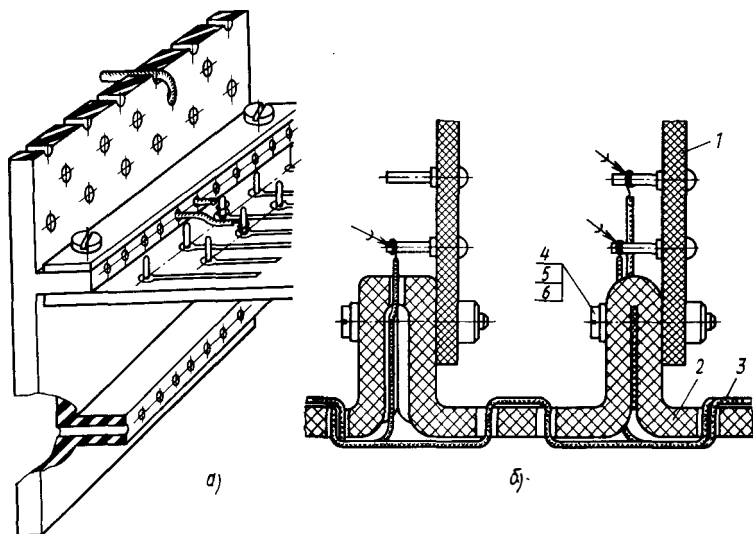


Рис. 2.14. Конструкция монтажа с использованием перфорированного резинового ремня:

a—конструкция ремня с полками для крепления плат; *б*—конструкция монтажа со сложенным ремнем; 1—печатная плата; 2—резиновый перфорированный ремень; 3—провода типа ГФ-100 или МГТФ; 4—6—крепление платы

Автоматизированные методы электромонтажа различаются в основном способами контактирования: накрутка, сварка, пайка. Наиболее распространен монтаж накруткой (см. рис. 2.12). Используют изолированные провода с медной посеребренной жилой диаметром 0,16 ... 0,5 мм. При ручной работе производительность монтажа 175 соед./ч, при автоматической 900 ... 1000 соед./ч. Недостатком метода является большой объем контактного узла (необходимо 4 ... 6 витков на одно соединение и до трех соединений на одном штыре), что также ухудшает частотные характеристики узла. Контактные штыри располагают с шагом 2,5 (2,54) и 1,25 (1,27) мм. Минимальное сечение штырей 0,3 × 0,3 мм.

Стежковый монтаж основан на автоматическом проложении трасс и контактировании их пайкой или сваркой. При контактировании пайкой трассы прокладываются с помощью полой иглы с медным проводом диаметром 0,16...0,32 мм, проходящей через отверстия в плате. Пайке подвергаются петли, выходящие с противоположной от трасс стороны. Скорость монтажа пайкой при ручной работе 150 соед./ч, а в автоматическом режиме 375 соед./ч. При контактировании сваркой она осуществляется со стороны проложенных трасс из никелевого провода к стальным штифтам, запрессованным в печатную плату, или к печатным контактными площадкам из меди, имеющим покрытие из нержавеющей стали (рис. 2.15). Скорость контактирования в автоматическом режиме 400...500 соед. ч.

Метод протыкания изоляции основан на непрерывной покладке и прижме медного провода диаметром 0,25 мм к контактам, имеющим вырезы.

Особо следует остановиться на *методом Multiwire* (рис. 2.16),

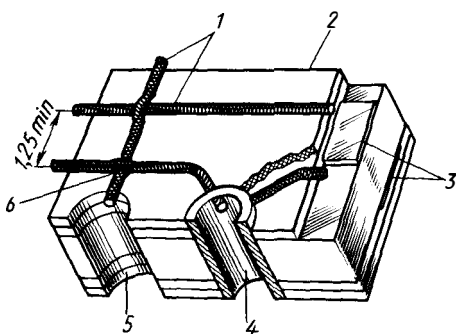


Рис. 2.16. Монтаж методом Multiwire:

1 — изолированные проводники диаметром 0,16 мм; 2 — слой клеящего вещества; 3 — медные шины питания и заземления; 4 — металлизированное отверстие; 5 — слой изолированных проводников с другой стороны платы; 6 — пересечение изолированных проводников

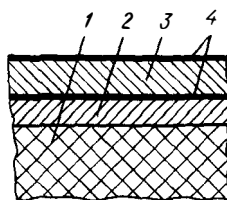


Рис. 2.15. Структура площадки под сварку на печатной плате:

1 — основание платы; 2 — слой меди (38...51 мкм); 3 — нержавеющая сталь (76 мкм); 4 — слой никеля (3...4 мкм)

при котором медная проволока диаметром 0,1...0,16 мм накладывается на адгезионный слой, затем с помощью металлизированных отверстий соединяется с печатной схемой. Производительность метода 800 соед./ч. При диаметре провода 0,1 мм укладывается 39,4 см провода на 1 см² площади платы.

§ 2.4. Конструкции контактных соединений

Число контактов РЭС соизмеримо с числом основных функциональных элементов (и даже превышает это число). Поэтому стоимость производства и надежность эксплуатации РЭС в значительной степени определяются конструкцией контактов и технологией их реализации в производстве. Основным назначением контактного соединения является передача электрической энергии от одного проводника к другому. Кроме того, контакт является: элементом конструкции, предназначенным для крепления элементов; точкой возможного разрыва цепи, облегчающей ее монтаж и обслуживание; точкой испытания схемы; каналом передачи тепла, выделяемого в элементах.

Основные виды контактных соединений (неразъемные, ограниченно-разъемные, разъемные) появились задолго до появления РЭС в микроэлектронном исполнении. Однако создание микроэлектронной аппаратуры потребовало их дальнейшего развития с целью минимизации габаритов и массы, увеличения надежности; снижения стоимости производства и эксплуатации, обеспечения работы с милливольтовыми и микроамперными сигналами; повышения граничной частоты, обеспечения минимума излучения в окружающее пространство и т. д.

Неразъемные контактные соединения являются наиболее распространенными в конструкциях РЭС ввиду их высокой надежности, малых габаритов и низкой стоимости. Малые габариты обуславливают также хорошие частотные свойства контактов. Неразъемные контактные соединения реализуются пайкой, сваркой, клеевой. Преимуществами контактирования пайкой являются простота процесса и хорошая ремонтпригодность. Технология накладывает ограничения на конструкцию. Так, для того чтобы припой заполнил зазор между металлизацией отверстия в плате и вставляемым в это отверстие выводом, зазор должен составлять 0,1 ... 0,15 мм. При меньшем зазоре припой будет пористым, при большем — он может не проникнуть на всю толщину платы. В первом случае капиллярный эффект будет велик, а во втором — слишком мал. При *контактировании сваркой* необходимо обеспечить локализацию тепла. Сварка с медной фольгой не

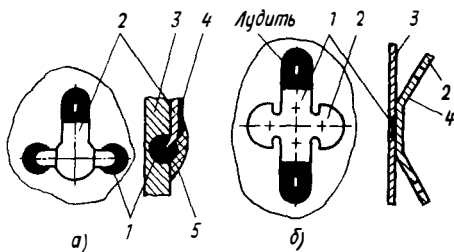


Рис. 2.17. Соединение сваркой контактного лепестка из плакированного медью алюминия с корпусом из алюминиевого сплава с помощью аргодуговой сварки (а) и точечной электросварки (б):
1—место сварки; 2—лепестки; 3—корпус; 4—плакированная поверхность; 5—компаунд

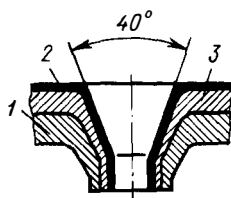


Рис. 2.18. Соединение лепестка с листовым корпусом холодной сваркой:
1—корпус; 2—плакирующий слой; 3—лепесток

дает стабильного качества из-за высокой теплопроводности меди (10 ... 20% сварных контактов могут быть перегреты или недогреты). Поэтому материал контактной поверхности под сварку выбирается с меньшей, чем у меди, теплопроводностью (никель, нержавеющая сталь).

Иногда для контактирования несущей конструкции из литого алюминиевого сплава используется аргодуговая сварка (рис. 2.17, а). В этом случае место контакта защищается от коррозии компаундом.

Контактирование клеевой осуществляется с помощью токопроводящего клея, состоящего из мелкодисперсного серебра и эпоксидной связки. Ввиду высокой стоимости, неконтролируемого размера контактного соединения, низкой стабильности во времени этот метод широкого применения не нашел.

Контактные соединения, осуществляемые методом *фрикцион-*

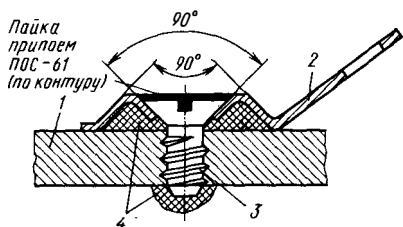


Рис. 2.19. Присоединение лепестка к литому корпусу с помощью самонарезающего винта:
1—корпус, 2—лепесток, 3—винт, 4—компаунд

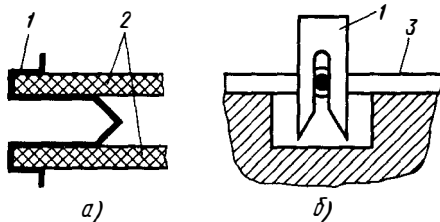


Рис. 2.20. Упругий металлический контакт, выполненный гибкой скобой (а) и с помощью прокалывающего изоляцию контакта (б):
1—контакт; 2—печатная плата; 3—плоский кабель

но-пластической деформации (для контактирования корпусов из легких, например магниевых, сплавов), выполняются с помощью металлических заклепок или самонарезающих винтов (рис. 2.18, 2.19). Для защиты от коррозии место контакта защищается компаундом.

Ограниченно-разъемное контактное соединение может осуществляться прижимом контактируемых поверхностей с помощью жесткого (земляная клемма на несущей конструкции), упругого металлического (рис. 2.20) или эластичного полимерного контакта (рис. 2.21). Эластичный контакт может быть получен путем нанесения на силиконовую резину или покрывающую ее полиимидную пленку проводящих линий (рис. 2.21, *з, д*), а также с помощью эластомера с наполнителем из мелкодисперсного серебра, меди, никеля, графита (рис. 2.21, *з*). При использовании позолоченных проводящих линий переходное сопротивление составляет около $0,003 \text{ Ом}$. В зависимости от количества наполнителя

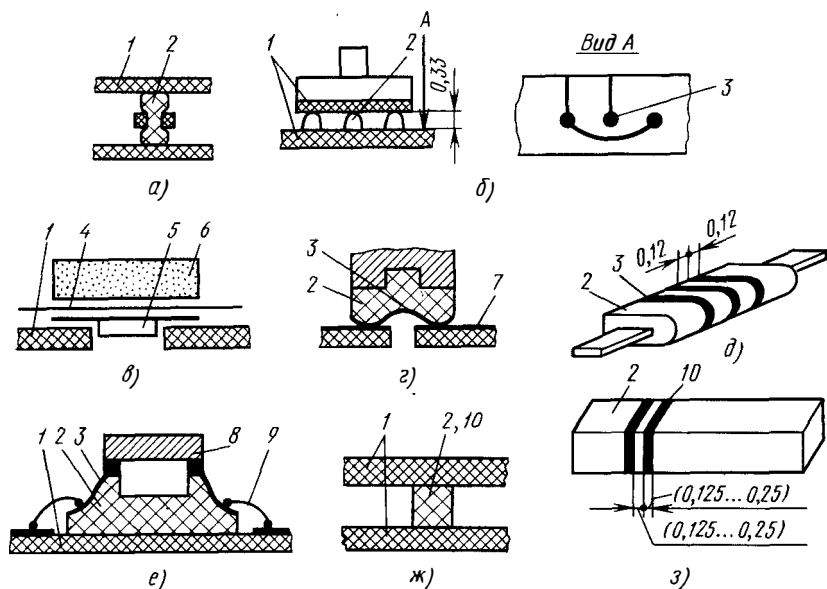


Рис. 2.21. Варианты конструкции эластомерных контактов:

а—соединение печатных плат контактами с проводящими дорожками; *б*—кнопка; *в*—соединение ИС с гибкой печатной платой; *г*—соединение линий СВЧ; *д*—соединитель с проводящими дорожками; *е*—эластомерный носитель ИС со столбиковыми выводами; *ж*—соединение печатных плат контактами с проводящим объемом; *з*—эластомерный соединитель из чередующихся проводящих и непроводящих объемов; *и*—печатная плата; *й*—тело эластомерного контактирующего элемента; *к*—проводящая дорожка; *л*—гибкая печатная плата; *м*—ИС с планарными выводами; *н*—прижимный эластомер; *о*—подложка со схемой СВЧ; *п*—кристалл ИС со столбиковыми выводами; *р*—объемный проводник; *с*—проводящий объем

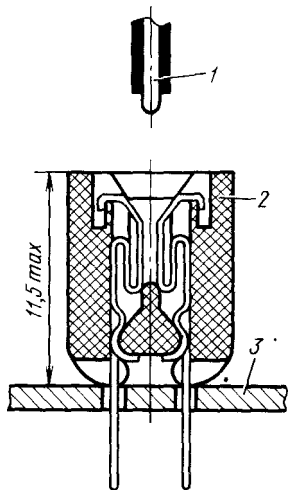


Рис. 2.22. Низкочастотный соединитель непосредственного контактирования:

1 — печатная плата ячейки, вставляемая в розетку; 2 — розетка соединителя; 3 — плата для межячеечной коммутации

РЭС широко применяются низко- и высокочастотные разъемные соединители. Различают *низкочастотные соединители* непосредственного контактирования (печатная плата — розетка соединителя, рис. 2.22), косвенного контактирования (вилка — розетка соединителя, рис. 2.23), с нулевым усилием сочленения (рис. 2.24).

Необходимость использования соединителей с нулевым усилием сочленения обусловлена: увеличением контактного давления с целью снижения переходного сопротивления; недопустимым увеличением усилия стыковки/расстыковки соединителя при числе контактов более 50; короблением плат, вызывающим неравномерное поджатие контактов и затрудняющим стыковку/расстыковку соединителей. Использование таких соединителей позволяет замыкать контакты в нужном порядке, например шины заземления — шины питания — сигнальные шины при включении и в обратном порядке при выключении.

Соединение радиочастотных кабелей между собой и с РЭС или их частями осуществляется с помощью высокочастотных (коаксиальных) соединителей (рис. 2.25), которые различаются по типу соединения (резьбовое, врубное, байонетное) и по применению (кабельное, приборное, переходное, разветвительное).

Требования к контактным соединениям. Одни требования являются общими для разъемных и неразъемных соединений, а часть — специфичными для того или иного вида контактных

оно для эластомера с наполнителем может меняться от 0,1 до 1000 Ом. Эластомерные контакты могут выполняться и в разъемном варианте. Преимуществами эластомерных контактов являются исключение арматуры, простота сборки и разборки, улучшенные частотные характеристики (работоспособность вплоть до частот 3...5 ГГц), повышенная виброустойчивость (при достаточном прижиме).

Разъемные контактные соединения позволяют увеличить ремонтпригодность при эксплуатации и упростить сборку РЭС. Однако при этом увеличиваются масса, габариты и стоимость контактного соединения. Кроме того, ресурс разъемных соединений не превышает нескольких тысяч соединений/разъединений, а устойчивость к механическим и климатическим воздействиям значительно хуже, чем у неразъемных соединений. В конструкции

соединений. *Общими требованиями* являются минимальные переходное сопротивление соединения и его нестабильность, достаточная механическая прочность.

Разъемные контактные соединения характеризуются *дополнительными параметрами*: переходным сопротивлением (Ом)

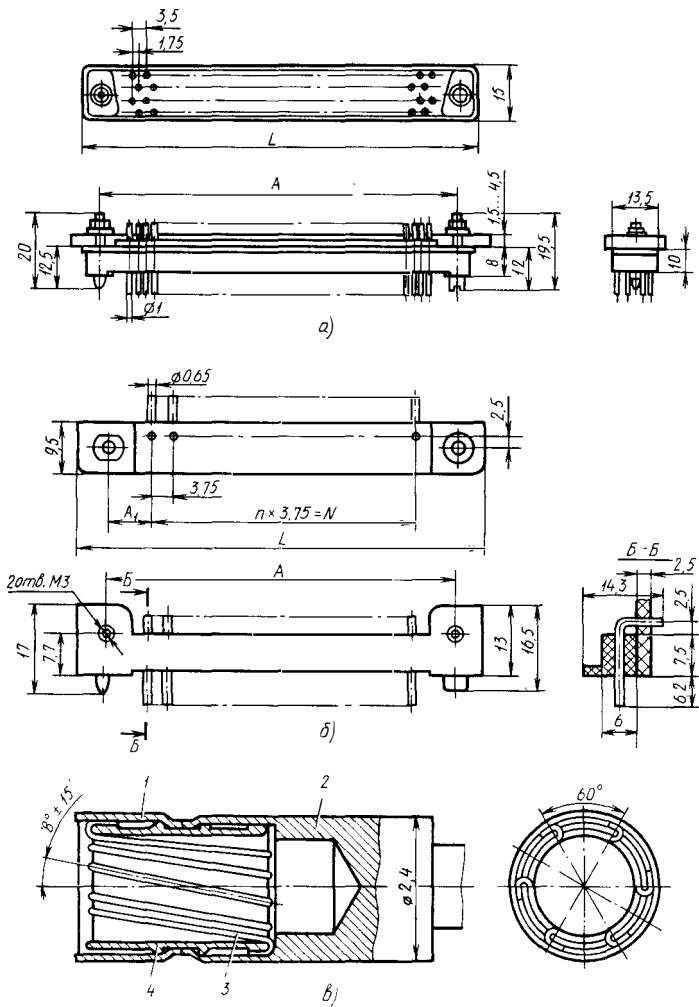


Рис. 2.23. Низкочастотные соединители с гиперболическими контактами:

а — вилка штепсельная соединительная ГРПМ2; *б* — вилка соединительная ГРПМ9; *в* — гиперболическое гнездо соединителей типа ГРПМ; 1 — кольцо; 2 — гильза; 3 — упругая проволока; 4 — штепсельное гнездо

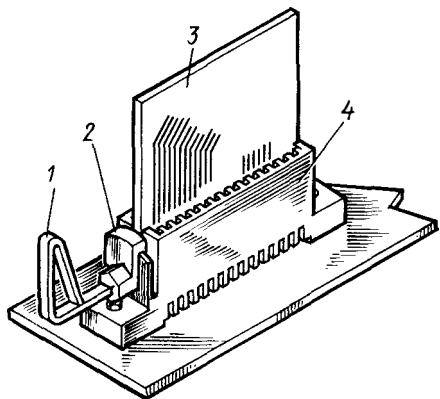


Рис. 2.24. Соединитель с нулевым усилием сочленения для печатной платы: 1—кулачковый ключ; 2—замок; 3—печатная плата; 4—розетка соединителя

дополнительными параметрами: максимальной граничной частотой (превышение частоты может вызвать перегрев контактов); допустимой и номинальной мощностью; коэффициентом стоячей волны по напряжению; степенью излучения энергии.

Основными параметрами неразъемных контактных соединений являются: незначительное воздействие технологических факторов на соседние участки; хорошая ремонтпригодность; возможность механизации и автоматизации технологического процесса контактирования. *Неразъемные контактные соединения ИС* должны

после заданного числа соединений / разъединений: $0,01 \pm \pm(20...30)\%$ для новых контактов; не более $0,02 \text{ Ом}$ после заданного числа соединений/разъединений; отсутствием гальванических пар при работе с микротоками; отсутствием перегрева при работе с большими токами ($T_{\text{доп}} = +10...150^\circ \text{C}$; при $200...220^\circ \text{C}$ происходит разложение оксидов серебра); минимальным усилием соединения/разъединения контактов. Контактные пары, предназначенные для *разъемного соединения коаксиальных кабелей*, характеризуются следующими

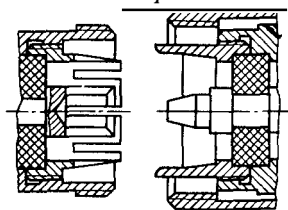
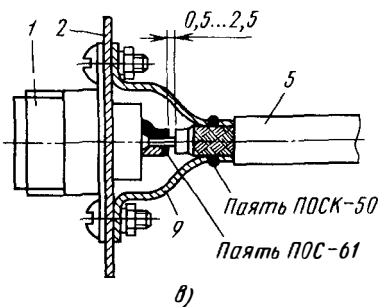
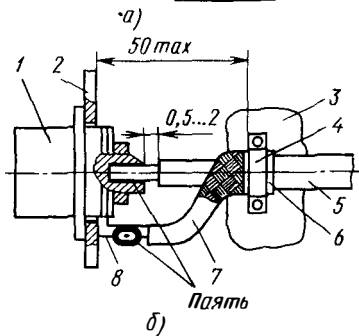


Рис. 2.25. Конструкция соединителя ВЧ (а) и схема монтажа в блоке без экрана (б) и с экраном (в):

1—ВЧ-соединитель; 2—панель или стенка шасси; 3—шасси аппаратуры; 4—скоба крепления; 5—коаксиальный кабель; 6—прокладка; 7—изоляционная трубка; 8—лепесток заземления; 9—экран



отвечать следующим *дополнительным* требованиям: прочность соединения должна быть не ниже прочности соединяемых элементов, возможность соединения элементов из различных материалов и различных типоразмеров (например, золотой проволоки диаметром 40 мкм и алюминиевой контактной площадки толщиной 1 мкм).

При разработке конструкций электрических соединений *определяют*: сечение жил связей; конструкцию проводников (одножильный, многожильный, серебряный, луженый, с изоляцией или без нее, коаксиальный, экранированный, высоковольтный, низковольтный, печатный, пленочный и т. д.); конструкцию совокупности проводников (скрутка проводников, жгут круглого сечения, плоский кабель, печатный монтаж платы и т. д.); методы крепления отдельных проводников и их совокупности; расстояние между отдельными проводниками; взаимное расположение проводников (ортогональное, под углом, параллельное); конструкцию контактных соединений (разъемные и неразъемные); расположение элементов согласования и фильтрации. При этом учитываются не только схемотехнические, но и технологические факторы: номенклатура используемых технологических процессов, их стабильность, характеристики оборудования и оснастки, параметры материалов конструкции; их устойчивость к технологическим воздействиям.

Конструкция межплатных и межблочных электрических соединений в значительной степени зависит от характера взаимного расположения плат и блоков (централизованное расположение ячеек в блоке, децентрализованное расположение блоков), мощности, амплитуды, частотного диапазона сигналов, помехоустойчивости элементной базы. При централизованном расположении ячеек в блоке контактирование ячеек осуществляется либо с помощью печатных контактных площадок, либо разъемными соединителями, установленными на платах. Ответные части соединителей устанавливаются на коммутирующем основании блока, которое часто выполняется в виде печатной платы. Такая плата может быть либо двусторонней, либо многослойной, содержащей до 12 слоев коммутации. В ряде случаев в дополнение к печатному может быть использован монтаж объемным проводом (например, для подвода питания). Неразъемное контактирование межблочных соединений осуществляется пайкой или накруткой. В последнем случае габариты его увеличиваются, но появляется возможность автоматизации монтажа, что особенно актуально для сложных наземных стационарных РЭС.

Как при централизованном, так и при децентрализованном расположении блоки обычно объединяют с помощью объемного провода, а контактирование осуществляется разъемными соединителями (низко- или высокочастотными). При большой длине

межблочных связей необходимо учитывать возможность искажения и затухания сигналов, а также перекрестные помехи, что ограничивает длину связей и требует использования кабельных усилителей. Мощность, амплитуда и частотный диапазон сигналов влияют на выбор конструкции проводников (экранированный провод, коаксиальный кабель, одиночный провод без экрана, скрученная пара или тройка и т. д.) и сечения проводящей жилы. В плоском кабеле для уменьшения взаимной связи сигнальные проводники часто отделяют друг от друга проводниками с нулевым потенциалом, а если рядом расположено несколько плоских кабелей, то между ними размещают экранирующие прокладки из медной фольги.

§ 2.5. Электромагнитная совместимость цифровых узлов

Под внутренней электромагнитной совместимостью понимается свойство РЭС и его частей (ячеек, блоков, шкафов, пультов) функционировать без ухудшения качественных показателей при заданной внутри РЭС или его частей электромагнитной обстановке. Обеспечение внутренней электромагнитной совместимости становится все более актуальной задачей ввиду непрерывного уменьшения энергии сигналов цифровых устройств РЭС и роста взаимного влияния элементов, из-за увеличения плотности компоновки и сложности устройств. На цифровые узлы могут влиять и внешние помехи, проникающие, например, по цепям питания. Для защиты от этих помех принимают те же меры, что и для защиты от внутренних помех. Для обеспечения внутренней ЭМС цифрового узла необходимо, чтобы фактическая помеха была

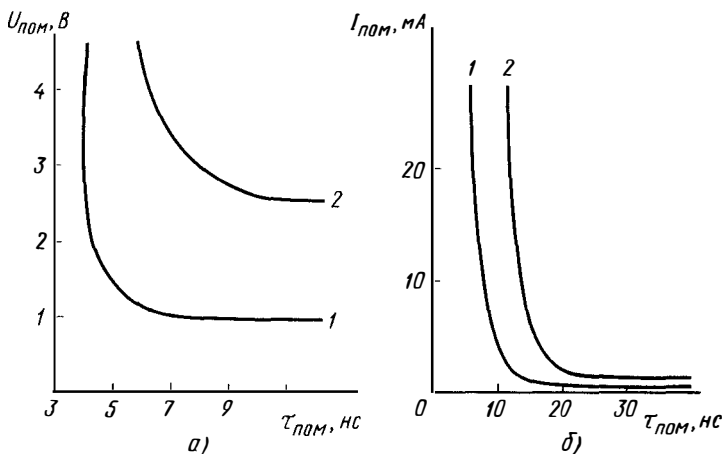


Рис. 2.26. Зависимость амплитуды помех по напряжению (а) и по току (б) от их длительности для логических элементов ТТЛ:

1—для отпирающих; 2—для запирающих сигналов

меньше допустимой. Зависимости амплитуды помех $U_{\text{пом}}$, $I_{\text{пом}}$ от их длительности $\tau_{\text{пом}}$ для логических элементов ТТЛ серий К130 и К155 представлены на рис. 2.26, 2.27. Из графиков следует, что при уменьшении длительности помех их допустимая амплитуда увеличивается. В технических условиях на цифровые ИС обычно приводится статическая помехоустойчивость, соответствующая горизонтальной части кривых. Для различных логических элементов статическая помехоустойчивость различна: 0,4 В для ТТЛ серии К155; 0,125...0,15 В (относительно уровней $-0,9$ и $-1,7$ В) для ЭСЛ серии 500; 1 В для элементов МДП серии К144.

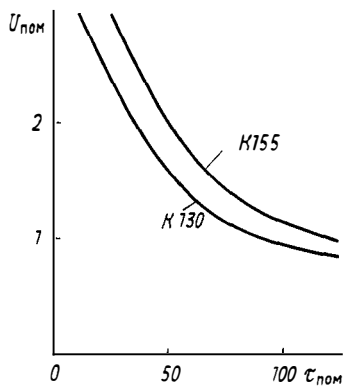


Рис. 2.27. Зависимость амплитуды допустимой помехи от длительности для RS-триггера на логических элементах серии К130 и К155

Для удобства рассмотрения методов обеспечения внутренней ЭМС цифровых узлов РЭС все электрические соединения можно условно разделить на электрически длинные и электрически короткие. Электрически длинной называется линия связи, геометрическая длина которой соизмерима с длиной волны наиболее высокочастотной составляющей спектра дискретного сигнала.

Часто электрическую длину линии определяют из соотношения задержки сигнала в линии $t_{\text{л}}$ и длительности фронта импульса $\tau_{\text{ф}}$. Если $t_{\text{л}} > 0,1\tau_{\text{ф}}$, то линия считается электрически длинной, если $t_{\text{л}} < 0,1\tau_{\text{ф}}$ — электрически короткой. Время распространения сигналов на единицу длины для большинства электрических соединений РЭС составляет $\tau_{\text{л}} = 4...7$ нс/м. Поэтому при $\tau_{\text{ф}} = 1$ нс линия является электрически длинной уже при геометрической длине более 14...25 мм.

Характеристическим параметром электрически длинной линии является волновое сопротивление (Ом) $Z_{\text{л}} = \sqrt{L_{\text{л}}/C_{\text{л}}}$, где $L_{\text{л}}$ — индуктивность линии, Гн; $C_{\text{л}}$ — емкость линии, Ф. При распространении сигнала в электрически длинной линии, имеющей неоднородность волнового сопротивления отдельных участков, от этой неоднородности происходит отражение падающего сигнала (приложенного к началу линии) напряжения $U_{\text{пад}}$ или тока $I_{\text{пад}}$. Отраженный сигнал складывается с падающим и искажает его.

В качестве неоднородности линии связи могут выступать, например, внутреннее сопротивление генератора сигналов, подключенного к началу линии, или сопротивление нагрузки в конце линии, не равные волновому сопротивлению линии связи. Причиной неоднородности может быть также наличие в линии связи

участков различного конструктивно-технологического исполнения (одиночный объемный проводник, печатный проводник, коаксиальный кабель, экранированный проводник, контакт соединителя и т. д.), технологический разброс волнового сопротивления линии связи (например, из-за разброса толщины или диэлектрической проницаемости изоляции коаксиального кабеля) или разветвление линий.

Отраженная энергия характеризуется коэффициентом отражения по напряжению (K_U) или по току (K_I):

$$K_U = \frac{Z_n - Z_n}{Z_n + Z_n}; \quad K_I = \frac{Z_n - Z_n}{Z_n + Z_n}; \quad K_U = -K_I.$$

Амплитуда отраженного импульса может быть определена из соотношений $U_{отр} = K_U U_{пад}$, $I_{отр} = K_I I_{пад}$.

Влияние неоднородности линий на характер искажения импульса напряжения иллюстрируется рис. 2.28. К началу согласованной с генератором сигналов электрически длинной линии подан скачок напряжения (рис. 2.28, а).

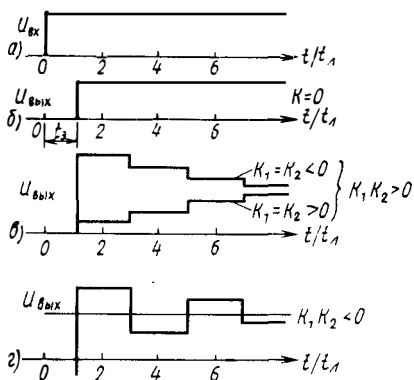


Рис. 2.28. Искажение импульсного сигнала (а) при передаче его по длинной линии в случае ее полного согласования (б) и рассогласования на обоих концах (в, з)

при $K_1 K_2 > 0$ ($K_1 = K_2 < 0$ или $K_1 = K_2 > 0$), а колебательный — при условии $K_1 K_2 < 0$, где K_1 и K_2 — коэффициенты отражения по напряжению от начала и конца линии. Длительность «ступенек» сигналов составляет $2t_l$. Если переходный процесс носит аperiодический характер, то быстродействие цифровых узлов уменьшается, так как увеличивается время нарастания амплитуды сигнала до номинального значения и должна быть уменьшена тактовая частота следования импульсов. Если переходный процесс колебательный, то это может вызвать ложное срабатывание логических элементов при значительной амплитуде колебаний сигнала

около порогового значения. Кроме того, выбросы напряжения могут привести к пробую p - n -переходов полупроводниковых приборов или к насыщению транзисторов логических элементов ЭСЛ (это также снизит быстродействие).

Максимальная геометрическая длина несогласованной электрически длинной линии различна при различных длительностях фронта сигнала: $l_{\max} = 1500$ мм при $\tau_{\phi} = 30$ нс; $l_{\max} = 250$ мм при $\tau_{\phi} = 5$ нс; $l_{\max} = 15 \dots 50$ мм при $\tau_{\phi} = 1$ нс. Отражение импульсов в электрически коротких линиях не опасно из-за их малой (по сравнению с длительностью фронта) длительности. Это определяется ограниченной полосой пропускания линий связи, а также повышенной помехоустойчивостью схем при малых длительностях помех (см. рис. 2.26, 2.27).

Помехи в электрически коротких линиях связи возникают из-за «паразитных» связей между различными электрическими соединениями и различными компонентами в пределах одного соединения (например, шины питания) и могут привести к сбою в работе цифровых схем. Несмотря на то что в цифровых узлах используют схемы с небольшим коэффициентом усиления по напряжению (в $10^4 \dots 10^5$ раз меньшим, чем, например, в аналоговых блоках РЛС), наличие большого числа параллельных связей, а также высокая плотность компоновки требуют принятия специальных мер для обеспечения ЭМС с учетом помех в электрически коротких линиях. Паразитные связи определяются конструкцией РЭС и параметрами используемых материалов (особенно диэлектрической проницаемостью). Все виды внутренних паразитных связей делят на емкостные, индуктивные и кондуктивные. Если сигнал (составляющая спектра), наводящий помеху, имеет гармонический характер, то независимо от характера паразитной связи (рис. 2.29) амплитуда помехи может быть определена по формуле

$$U_{\text{пом}} = U_{\text{ипом}} Z_{\text{н}} / (Z_{\text{н}} + Z_{\text{пар}}), \quad (2.1)$$

где $U_{\text{пом}}$ — напряжение помехи на сопротивлении нагрузки $Z_{\text{н}}$; $U_{\text{ипом}}$ — напряжение источника помех, приложенное к линии, наводящей помеху; $Z_{\text{пар}}$ — сопротивление паразитной связи; $K_{\text{пар}} = Z_{\text{н}} / (Z_{\text{н}} + Z_{\text{пар}})$ — коэффициент связи по напряжению.

Из рассмотрения рис. 2.29, *а* и формулы (2.1) следует, что в общем случае сопротивление паразитной связи и сопротивление нагрузки образуют делитель напряжения. В том случае, когда паразитная связь носит емкостный характер (рис. 2.29, *б*), $Z_{\text{пар}} = 1 / (\omega C_{\text{пар}})$, где $C_{\text{пар}}$ — паразитная емкость (емкость паразитной связи). Тогда

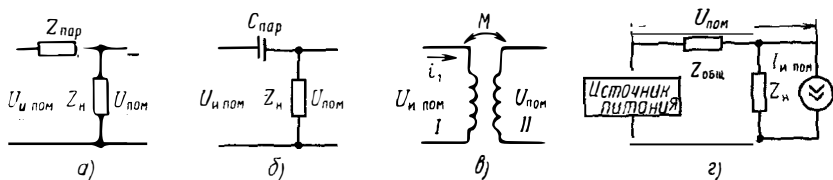


Рис. 2.29. Схемы паразитной связи:
а — обобщенной; *б* — емкостной; *в* — индуктивной; *г* — кондуктивной

$$U_{\text{пом}} = U_{\text{и пом}} \frac{C_{\text{пар}}}{(C_{\text{н}} + C_{\text{пар}})} = U_{\text{и пом}} K_C,$$

где $K_C = C_{\text{пар}} / (C_{\text{н}} + C_{\text{пар}})$ — коэффициент емкостной связи; $C_{\text{н}} = C_{\text{л}} + C_{\text{вых}} + C_{\text{вх}}$ — емкость нагрузки, равная сумме емкостей собственно линии связи, выходной емкости передающей и входной емкости приемной схемы соответственно.

В том случае, когда паразитная связь носит индуктивный характер (рис. 2.29, *в*), напряжение помехи $U_{\text{пом}} = M di_1 / dt$, где M — взаимная индуктивность, Гн; I_1 — ток в первом контуре, А; t — время, с. Можно показать, что $U_{\text{пом}} = U_1 M / L_1 = U_1 K_L$, где $K_L = M / L_1$ — коэффициент индуктивной связи; L_1 — индуктивность первого контура. Можно определить K_L , не вычисляя M и L_1 , а используя то обстоятельство, что при $\epsilon = \mu = 1$ (вакуум) коэффициент емкостной связи в вакууме K_{C0} равен коэффициенту индуктивной связи K_L .

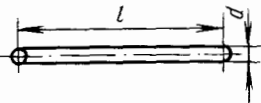
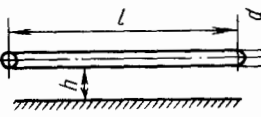
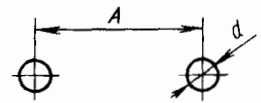
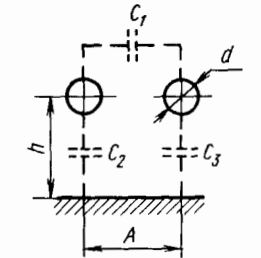
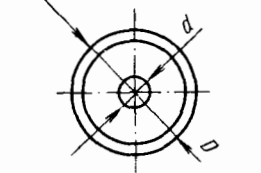
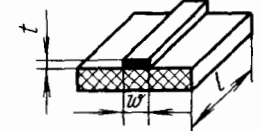
При кондуктивной связи (рис. 2.29, *г*) помехи выделяются на сопротивлении связи $Z_{\text{общ}}$, которое складывается из внутреннего сопротивления шин питания $Z_{\text{шп}}$ и внутреннего сопротивления источника питания $Z_{\text{ип}}$. Так как $Z_{\text{общ}} \ll Z_{\text{н}}$, то коэффициент кондуктивной связи

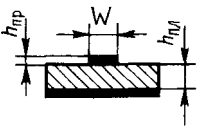
$$K_Z = Z_{\text{общ}} / (Z_{\text{общ}} + Z_{\text{н}}) \approx Z_{\text{общ}} / Z_{\text{н}}.$$

Природа $Z_{\text{общ}}$ зависит от частотного спектра сигнала, наводящего помеху. Для постоянного тока и очень низких частот это в основном сопротивление дросселей фильтра, диодов выпрямителя, внутреннего сопротивления химических источников питания; для звуковых частот — активное сопротивление шин питания, емкостное сопротивление конденсаторов фильтра; на высоких частотах — индуктивное сопротивление шин питания и конденсаторов фильтра.

Чтобы оценить ожидаемое искажение сигналов и наводки (помехи), необходимо рассчитать электрические параметры линий связи ($L_{\text{л}}$, $C_{\text{л}}$, $C_{\text{пар}}$, $Z_{\text{л}}$, M , $Z_{\text{общ}}$) по известным конструктивным

Расчетные соотношения для определения электрических параметров электро монтажа по известным конструктивным параметрам

Тип электро монтажа	Эскиз конструкции	Расчетные соотношения
Одиночный проводник		$L = 0,2l(2,3lg \frac{Al}{d} - 0,75)$
Проводник над экраном		$L = 0,46l \lg \frac{4h}{d},$ $C = 24l \epsilon / \lg \frac{4h}{d}, \quad Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{4h}{d}$
Соседние проводники (свивка, бифиляр)		$L = 0,4\mu(2,3lg \frac{2A}{d} + 0,25)l,$ $C = 12,1l \epsilon_{\phi} / \lg \frac{2A}{d},$ $Z = \frac{276}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{2A}{d}, \quad \epsilon_{\phi} \approx 0,8\epsilon$
Соседние проводники над экраном		$L = 0,4\mu(2,3lg \frac{2A}{d} + 0,25)l,$ $C_1 = 12,1l \epsilon_{\phi} / \lg \frac{2A}{d}, \quad C_2 = C_3 =$ $= 24\epsilon_{\phi} l / \lg \frac{4h}{d},$ $C = C_1 + C_2/2,$ $Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \left(\frac{4h}{d} \sqrt{l + \frac{4h^2}{A^2}} \right)$
Коаксиальный кабель (экранированный провод)		$L = 0,46l \lg \frac{D}{d}$ $C = \epsilon l \cdot 10^{-3} / \left(41,4l \lg \frac{D}{d} \right)$ $Z = 138 / \left(\sqrt{\epsilon} \lg \frac{D}{d} \right)$
Печатный проводник		$L = 0,2l \left(2,3lg \frac{4l}{d_0} - 0,75 \right),$ $d_0 = 0,67h_{np} + 0,567w$

Тип электромонтажа	Эскиз конструкции	Расчетные соотношения
Печатный проводник над экраном		$L = 0,46 l g \frac{4h_{пл}}{d_0},$ $C = 24 \varepsilon_{эф} l / g \frac{4h_{пл}}{d_0},$ $d_0 = 0,67 h_{пр} + 0,367 w$

Примечание. Размерность индуктивности L —мкГн; емкости C —пФ; волнового сопротивления Z —Ом; линейных размеров ($l, d, D, h, A, d_0, h_{пл}, h_{пр}, w$)—м.

данным (геометрическим размерам, физическим параметрам материалов, конструктивному исполнению; числу и взаимному расположению взаимодействующих линий связи) по формулам, приведенным в табл. 2.15, а также по графикам рис. 2.30—2.33. Точность формул составляет: 5...10% для одиночного объемного проводника, одиночного проводника над экраном, экранированного проводника, коаксиального кабеля; 15...20% для пары объемных проводников над экраном; 20...30% для печатных проводников.

На рис. 2.30 представлена зависимость волнового сопротивления печатного проводника, расположенного в вакууме ($\varepsilon = 1$), от соотношения его ширины w к расстоянию $h_{пл}$ до экранирующей плоскости. Эти графики справедливы, если толщина проводника $h_{пр}$ мала по сравнению с шириной w . Для печатного проводника,

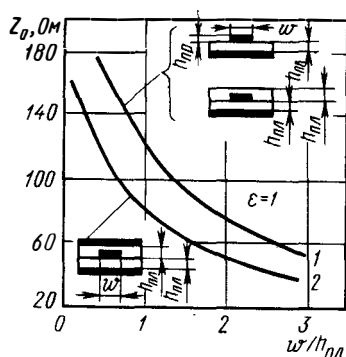


Рис. 2.30. Графики для расчета волнового сопротивления внешнего и внутреннего проводников печатной платы с экранирующей плоскостью (кривая 1) и волнового сопротивления внутреннего проводника, расположенного между двумя экранирующими плоскостями в вакууме (кривая 2)

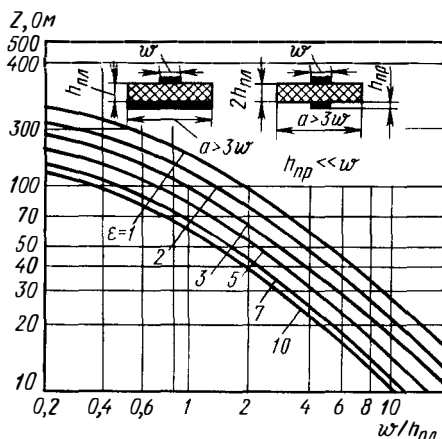


Рис. 2.31. Волновое сопротивление печатных полосковых линий

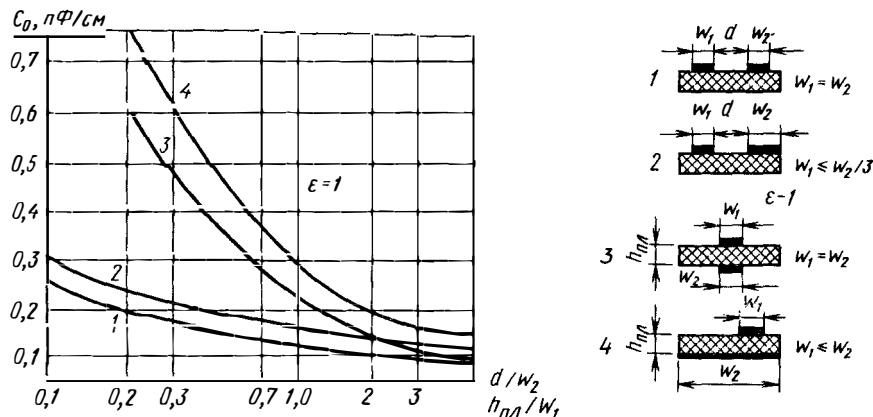


Рис. 2.32. Взаимная емкость печатных проводников в вакууме

расположенного в среде с $\epsilon > 1$, волновое сопротивление линии $Z_{\pi} = Z_0 / \sqrt{\epsilon_{эф}}$. Графики, представленные на рис. 2.31, позволяют определить волновое сопротивление линии связи в зависимости от геометрических размеров w , $h_{пл}$ и диэлектрической проницаемости материала платы при условии, что $h_{пр} \ll w$, $\epsilon \geq 1$. Волновое сопротивление линии на плате без экрана составляет $2Z$.

Емкость между двумя проводниками, расположенными с одной или с двух сторон печатной платы, можно определить, используя графические зависимости рис. 2.32 и 2.33, по формуле

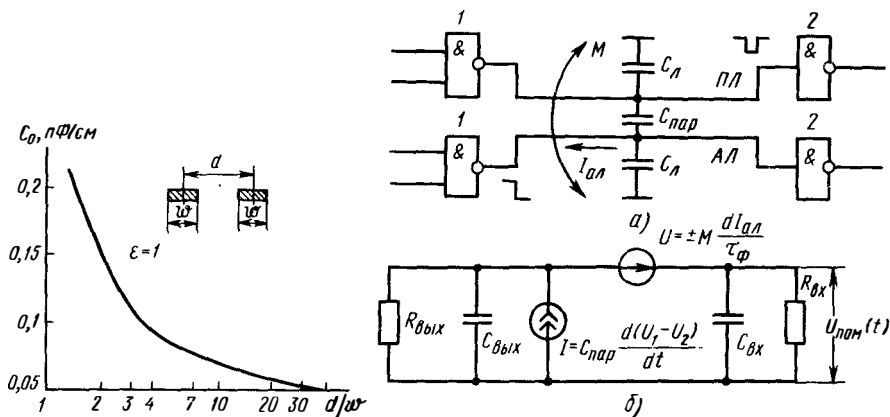


Рис. 2.33. Зависимость емкости между плоскими проводниками, расположенными в вакууме, от отношения расстояния между проводниками d к ширине проводников w

Рис. 2.34. Параллельные электрически короткие линии связи (а) и эквивалентная схема для расчета помех в линиях (б): АЛ — активная (наводящая помеху) линия; ПЛ — пассивная линия; 1 — передающие; 2 — приемные схемы; C_n — емкость линии относительно земляной шины

$C = C_0 l \epsilon_{эф}$, где C_0 — удельная емкость линии, пФ/см, расположенной в среде с $\epsilon = 1$ (вакуум, сухой воздух); l — длина линии, см.

При расчете допустимых параметров электрически коротких линий обычно исходят из эквивалентной схемы (рис. 2.34, б). Допустим, что собственной индуктивностью линий можно пренебречь; входное и выходное сопротивления и фронты линейны. Тогда для интервала времени $0 < t < \tau_\phi$ напряжение помехи, отсчитываемое от статического уровня напряжения в линии,

$$U_{пом}(t) = \pm \frac{R_{вх} \| R_{вых}}{\tau_\phi} \left(C_{пар} \Delta U \pm M \frac{\Delta I}{R_{вых}} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]. \quad (2.2)$$

где ΔI — перепад тока в линии, наводящей помеху; $\tau = CR_{вых}R_{вх} : (R_{вых} + R_{вх})$ — постоянная времени; $C = C_{пар} + C_{вых} + C_{вх} + C_{л}$ — суммарная емкость. Из соотношения (2.2) следует, что емкостная помеха преобладает, если $R_{вых}C_{пар}\Delta U \gg M\Delta I$. Таким образом, емкостная помеха существенна при больших перепадах напряжения, больших выходных сопротивлениях и сильной емкостной связи. Индуктивная помеха существенна при больших перепадах токов в линиях (малых $R_{вых}$) и сильной индуктивной связи.

Логические элементы ТТЛ различаются быстродействием (потребляемой мощностью) и выходным сопротивлением. Маломощные элементы ($P < 1$ мВт) с большим выходным сопротивлением $R_{вых}$ наиболее критичны к емкостным запирающим помехам. Элементы высокого быстродействия ($P > 10$ мВт) с малым выходным сопротивлением наиболее чувствительны к индуктивным отпирающим помехам. Для элементов ТТЛ среднего быстродействия ($1 < P < 10$ мВт) необходимо учитывать емкостные запирающие и индуктивные отпирающие помехи. Элементы со структурой МДП характеризуются очень малыми входными токами и большими (кОм) выходными сопротивлениями. Поэтому для них наиболее опасными являются емкостные отпирающие и запирающие помехи. Элементы ЭСЛ, имеющие очень малое выходное сопротивление (около 10 Ом), нечувствительны к емкостным и индуктивным помехам в электрически коротких линиях.

При расчете линий связи микросборок на коммутирующем полиимидном, керамическом или алюминированном (с анодированием) основании необходимо учитывать не только паразитные связи, но и постоянные времени линий связи. Это особенно важно для линий связи микромощных элементов со структурой КМДП. Постоянная времени линии связи зависит от емкости схемных элементов, емкости линий связи относительно шины с нулевым потенциалом («земляной»), паразитных емкостей относительно других линий связи, активного сопротивления линий связи. В ряде случаев минимум постоянной времени линий связи является критерием оптимального размещения ИС в составе микросборки.

§ 2.6. Методы уменьшения помех в электрических соединениях цифровых узлов

Уменьшение помех в электрических соединениях цифровых узлов РЭС достигается схемотехническими, конструкторскими и технологическими методами.

К *схемотехническим методам* относятся: 1) использование элементной базы с максимальной помехоустойчивостью; 2) применение LC-фильтров в цепях питания; 3) компенсация помех (например, использование скрученных пар проводов); 4) применение амплитудного и временного стробирования и т. д.

К *конструкторским методам* относятся: 1) уменьшение числа конструкторско-технологических типов линий связи в одной цепи; 2) ослабление паразитной связи путем разнесения источников и приемников помех либо ортогонального расположения проводников в соседних слоях печатной платы, уменьшения длины взаимодействующих участков линий, использования материалов с малой диэлектрической проницаемостью; 3) увеличение числа точек заземления и сечения шин питания; 4) частичное экранирование печатных плат (рис. 2.35) или введение межобмоточных экранов в трансформаторы; 5) уменьшение размеров контактных соединений, например путем замены разъемных соединений на неразъемные, в частности эластомерные.

К *технологическим методам* относятся: 1) увеличение однородности линий одного технологического исполнения (печатный проводник, коаксиальный кабель и т. д.); 2) уменьшение разброса параметров элементов схемы благодаря изготовлению их в едином технологическом цикле (например, пар транзисторов схем ЭСЛ); 3) освоение производства изделий с улучшенными свойствами (кабельных изделий с экраном, эластомерных контактов).

При размещении конденсаторов фильтров в цепях питания цифровых (логических) ИС пользуются рекомендациями руководящего технического материала по применению данной ИС. При использовании частичного экранирования печатных плат (рис. 2.35) коэффициент емкостной связи K_C уменьшается при введении как заземленного проводника (уменьшается $C_{\text{пар}}$), так и экранирующей плоскости (увеличивается $C_{\text{л}}$). Увеличение сечения шин питания достигается при использовании навесных шин слоистой конструкции (рис. 2.36) или отдельных слоев печатных плат в качестве шины с нулевым потенциалом. Слои могут выполняться в виде сплошных листов или сетки. При этом в печатных проводниках с увеличенной шириной или сплошных слоях выполняют отверстия (рис. 2.37), предназначенные для отвода выделяющихся при пайке газов. Для увеличения прочности сцепления проводников с основанием платы типа ДПП в плате делают дополнительные металлизированные отверстия (рис. 2.38).

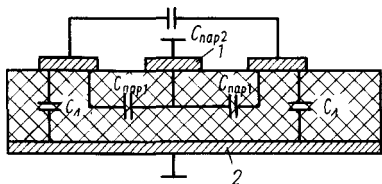


Рис. 2.35. Экранирование печатных полосковых линий шиной с нулевым потенциалом (1) и металлической пластиной (2):

C — емкость линии; $C_{щ1}$ — емкость между экранирующим и основным проводниками; $C_{щ2}$ — емкость между основными проводниками; $C_{л}$ — емкость линии относительно экрана

Для повышения технологичности электрических соединений следует выбирать такие элементы (например, ТТЛ), чтобы допуски на разброс параметров линий связи были как можно большими, число типов соединений — как можно меньшим (например, только печатный монтаж и монтаж одиночным объемным проводом). При выборе способов межконтактной коммутации и контактирования надо стремиться использовать групповые технологические процессы (печатный монтаж, плоские кабели, групповые методы контактирования) и автоматизированные методы (монтаж накруткой, стежковый монтаж с контактированием пайкой и сваркой, пайкой волной припоя и т. д.). Особое внимание необходимо обращать на то, чтобы последующие технологические воздействия не оказали отрицательного влияния на результаты предыдущих операций. Так, если производится

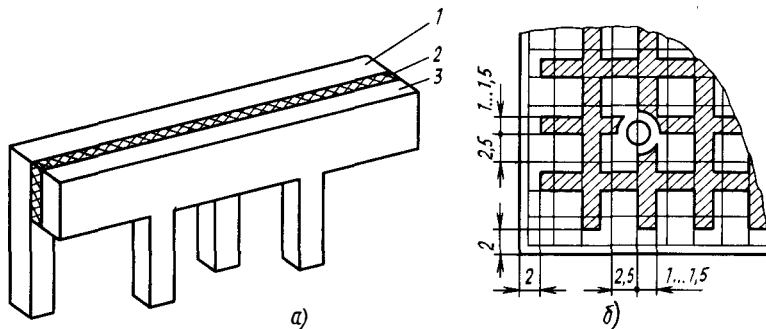


Рис. 2.36. Навесная шина питания слоистой конструкции (а) и пример выполнения сетчатого слоя питания и заземления (б):

1 — шина питания; 2 — диэлектрик; 3 — шина с нулевым потенциалом

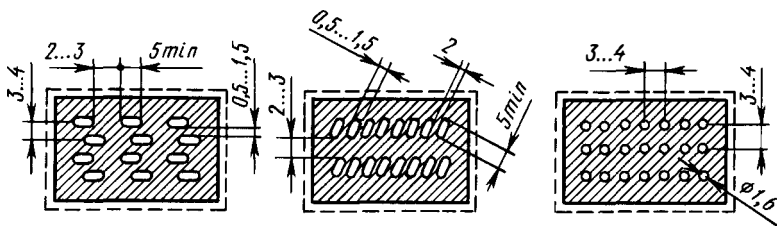


Рис. 2.37. Примеры выполнения экранов печатного монтажа

пайка нескольких близко расположенных контактов одной линии связи, то каждая последующая пайка должна производиться более легкоплавким припоем во избежание разрушения предыдущих паек. То же самое относится к герметизации корпуса пайкой или сваркой, если внутри находятся чувствительные к перегреву элементы. В этом случае можно осуществить теплоотвод от корпуса, исключая перегрев элементов внутри корпуса.

При разработке конструкции электрических связей необходимо обращать внимание на возможность доступа к отдельным частям при изготовлении и ремонте без полной разборки. Для этого отдельные части подключают с помощью разъемных соединителей и допускается разгерметизация и повторная герметизация гермокорпусов.

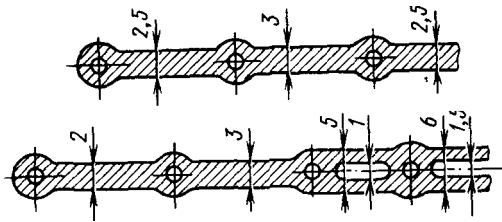


Рис. 2.38. Дополнительное крепление печатного проводника к основанию платы с помощью металлизированных отверстий

§ 2.7. Разработка конструкций электрических соединений на основе печатных плат

Разработка конструкции электрических соединений РЭС осуществляется на основе системного подхода, который рассмотрим применительно к разработке конструкции печатной платы цифрового устройства. Эта задача особенно актуальна для одноплатных конструкций микроЭВМ, доля которых к 1995—2000 гг. составит 80...90% всех выпускаемых ЭВМ. Переход на одноплатные конструкции обусловлен достижениями в технологии (освоение выпуска БИС микропроцессоров и полупроводниковых ЗУ).

Исходными данными для проектирования одноплатной конструкции являются: 1) принципиальная электрическая схема, которая определяет число элементов и характер связей между ними, число и характер внешних связей, элементную базу (степень интеграции, защищенность от внешних воздействий, номиналы напряжений питания, геометрические размеры, помехоустойчивость, быстродействие, нагрузочная способность; входное и выходное сопротивления и емкость и т. д.); 2) технические требования к конструкции — условия работы (объект установки, температурный диапазон, характер механических и климатических воздействий, уровень внешних электромагнитных помех); конструктивные ограничения — требования по типизации, унификации, преемственности; технологические ограничения (тип производства, номенклатура освоенных технологических процессов и т. д.).

При разработке электрических соединений на основе печатной платы определяются: 1) конструкторско-технологический тип платы, ее класс плотности, материал основания, 2) площадь, габариты и соотношение размеров сторон платы; 3) параметры элементов платы (ширина проводников и размер зазоров, размеры отверстий и контактных площадок и т. д.); 4) размещение элементов; 5) рисунок печатных трасс.

При выборе конструкторско-технологического метода изготовления печатной платы, который, как правило, определяет плотность компоновки, учитываются возможности различных методов (см. табл. 2.5, 2.6, 2.8, 2.9), а также стоимость производства и эксплуатации. Стоимость производства H , имеющая размерность нормо-ч/дм², зависит (рис. 2.39) от сложности механической обработки, характеризуемой параметром $n_{отв}$ (число отверстий на квадратный сантиметр платы), класса плотности платы $K_{пл}$ (имеется три класса плотности, см. табл. 2.3), числа слоев платы $N_{сл}$. При выборе материала основания учитываются требования по стоимости, теплоотводу, прочности, согласованности ТКЛР платы и навесных элементов, возможностям формовки, диэлектрической проницаемости ϵ , потерям ($tg\delta$), электрической прочности, влагостойкости.

При производстве бытовой аппаратуры используются конструкторско-технологические методы, позволяющие получить РЭС низкой стоимости (ОПП, ДПП, выполненные по первому классу плотности), дешевые и недефицитные материалы основания (гетинакс, стеклотекстолит, эмалированная сталь). Для аппаратуры четвертого поколения используются конструкторско-технологические методы, позволяющие получить высокую плотность компо-

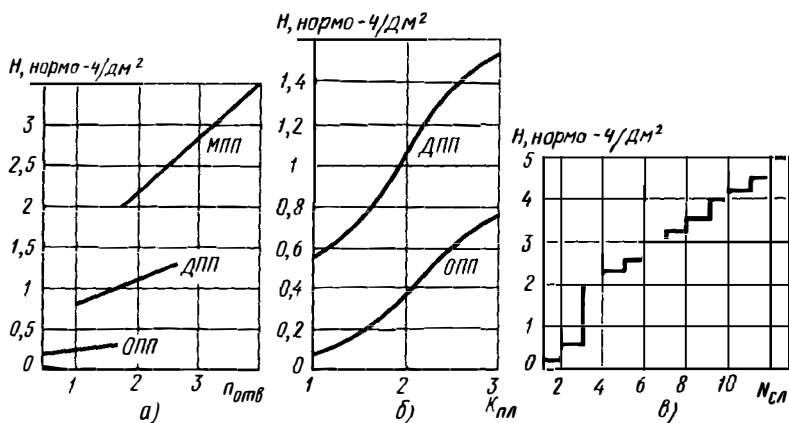


Рис. 2.39. Зависимость удельной трудоемкости изготовления печатных плат в нормо-часах на квадратный дециметр (нормо-ч/дм²) от плотности размещения отверстий (а), класса плотности (б), числа слоев (в) при серийном производстве

новки и надежность; стоимость в этом случае играет второстепенную роль. Для бортовой аппаратуры используют ИС в микрокорпусах либо в бескорпусном исполнении, для размещения которых требуются МПП из стеклотекстолита, полиимидной пленки, керамики, выполненные по третьему классу плотности и выше (аддитивные и полуаддитивные методы). Основания из металла используют для теплонапряженных плат (источников питания) и когда надо обеспечить высокую механическую прочность или сложную форму. На выбор материала основания влияет частотный диапазон сигналов. Для плат, работающих в диапазоне ВЧ, выбирают материал с малыми значениями ϵ и $\text{tg}\delta$ (стеклотекстолит, фторопласт, гетинакс, текстолит), а для плат, работающих в диапазоне СВЧ,—материалы с большим значением ϵ (что позволяет уменьшить размеры плат) и малыми потерями (ситалл, поликор, керамика 22ХС, оксид бериллия BeO , брокерит Be_2O_4 , фольгированные диэлектрики на основе фторопласта или смесей органической связки с неорганическими наполнителями, имеющими $\epsilon \approx 10$).

При определении площади платы, габаритов и соотношения размеров сторон системность подхода заключается в необходимости учета следующих факторов: площади размещаемых на плате элементов и площади вспомогательных зон; допустимых габаритов с точки зрения технологических возможностей и условий эксплуатации, числа контактов внешних связей, допустимой задержки распространения сигнала в линии связи, коробления плат. При определении площади платы суммарная площадь устанавливаемых на нее элементов умножается на коэффициент дезинтеграции, равный 1,5...3, и к этой площади прибавляется площадь вспомогательных зон, предназначенных для размещения соединителей, направляющих, элементов фиксации, крепления, индикации, фильтрации и т. д. Дезинтеграция осуществляется с целью обеспечения зазоров для размещения линий связи, теплоотвода, доступности к элементам роботов и манипуляторов. Чрезмерное уменьшение зазоров между элементами на плате может привести к увеличению напряженности теплового режима и, как следствие, к увеличению объема системы охлаждения. Максимальные *габариты плат* (особенно МПП) ограничиваются их жесткостью (при малой жесткости может произойти обрыв печатных проводников уже в производстве), а также требованиями по точности (для плат первого класса плотности 470×470 мм, для плат второго класса 240×240 мм, для плат третьего класса 170×170 мм). Совершенствование технологии может привести к изменению приведенных значений. Габаритные размеры плат могут определяться и требованиями по жесткости в условиях эксплуатации. Необходимо уменьшать длину и ширину и увеличивать толщину плат высокой жесткости по сравнению с габаритами, допускаемыми при их производстве. При определении

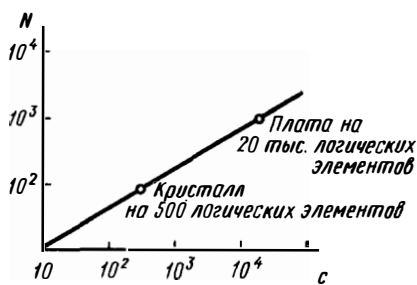


Рис. 2.40. Зависимость числа сигнальных контактов N для внешних соединений от числа элементов C логического функционального узла

габаритных размеров следует учитывать, что размеры платы должны быть кратны некоторому модулю (2,5 мм для плат со стороной до 100 мм, 5 мм для плат со стороной до 350 мм, 10 мм для плат со стороной более 350 мм). Если плата выполняется для устройства, поставляемого на экспорт, или для микроЭВМ, то в качестве минимального модуля берется размер 2,54 мм или кратный ему размер $U = 1,75'' = 44,45$ мм.

Соотношение сторон печатной платы зависит от допустимой задержки распространения сигнала в линии связи, числа контактов внешних связей, механической прочности и жесткости платы, допустимого коробления платы. Быстродействие логических узлов зависит не только от быстродействия логических элементов, но и от задержки сигналов в линиях связи. Считается, что задержка сигнала в линии связи должна быть примерно равна скорости срабатывания (длительности фронта) элемента. Поэтому для сигнала с $\tau_{\phi} = 1,5$ нс при удельной задержке распространения сигнала в линии связи 5 нс/м максимальная длина линии связи не должна превышать 0,3 м. Это выдерживается, например, для платы с размерами сторон 170×75 мм, где наибольшая длина линии связи составляет $170 + 75 = 245$ мм. Контакты для внешних связей располагаются на плате с шагом 2,5 или 1,25 мм, иногда допускается шаг 0,625 мм. В зависимости от сложности узла число контактов на плате может достигать нескольких сотен или тысяч (рис. 2.40, 2.41, табл. 2.16). Зависимость, представленная на

Таблица 2.16

Тенденции изменения некоторых характеристик полупроводниковых ИС

Характеристика	Годы				
	1970	1975	1980	1985	1995
Минимальные размеры элементов, мкм	10...7	5	3	2	Менее 1
Площадь кристалла, мм ²	3...6	25	56,3	56,3	100
Число внешних выводов, шт.	6...18	40	64	256	512...1024
Степень интеграции	2...3	3...4	4...5	5...6	6...7

рис. 2.40, описывается формулой $N=2,5C^{0,61}$. Это отношение справедливо только для логических узлов; число внешних выводов устройств памяти, имеющих регулярную структуру, меньше. Кроме того, предполагается, что информация передается в параллельном коде (для последовательного кода требуется меньшее число выводов) и узел не является законченным логическим устройством (в противном случае число внешних выводов также меньше). Можно несколько уменьшить длину стороны платы, предназначенной для размещения контактов внешних связей, размещая их в несколько рядов (смещая контакты в рядах на определенный шаг), но при большом числе контактов часто это не позволяет расположить их на одной стороне и приходится занимать вторую (противоположную) сторону. В этом случае стороны, не занятые контактами, целесообразно делать короче, чтобы сократить время распространения сигнала. Из условий получения достаточной жесткости платы (см. гл. 5) следует, что отношение размеров сторон платы не должно превышать 3:1; разделение на платы меньшей площади невыгодно, так как при этом увеличивается трудоемкость сборки из-за необходимости выполнения межплатной коммутации.

При определении параметров элементов платы и структуры слоев системность подхода заключается в необходимости нахождения компромисса между экономически обоснованной точностью изготовления и требованиями по обеспечению электромагнитной совместимости (нестабильность волнового сопротивления линий связи, наличие емкостных, индуктивных и кондуктивных связей).

Толщина слоев МПП зависит от волнового сопротивления линии связи, а также от допустимой паразитной емкости между линиями связи, расположенными в соседних слоях. При емкости одного пересечения проводников от 0,1 до 1,5 пФ и 2000 пересечений для одной связи в пределах платы паразитная емкость может достигать 200...3000 пФ, что приведет к увеличению постоянной времени линии связи, увеличит нагрузку на передающую логическую схему.

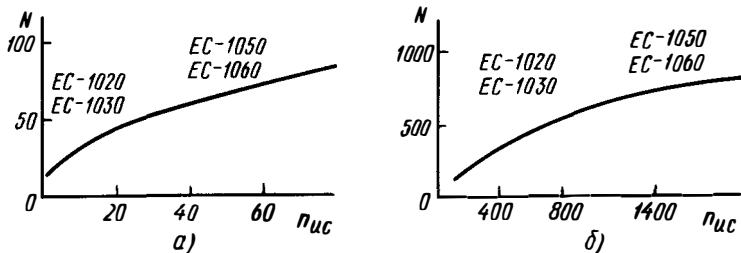


Рис. 2.41. Зависимость числа внешних соединений N от числа ИС ($n_{ис}$) для типового элемента замены (а) и панели (б) ЕС ЭВМ

Волновое сопротивление линии связи зависит от толщины диэлектрического слоя, диэлектрической проницаемости материала, ширины проводников. Так как все эти параметры имеют разброс, то колеблется и волновое сопротивление линий связи как от платы к плате, так и в пределах платы (колебания могут достигать $\pm 10\%$). Структура платы определяется числом, толщиной и порядком расположения слоев.

Число слоев МПП зависит от степени интеграции ИС, устанавливаемых на плату элементов, общего их числа и конструктивного исполнения. При увеличении степени интеграции ИС (увеличении числа внешних выводов) число слоев платы уменьшается. Например, для схемы, содержащей 25 000 логических элементов, при использовании компонентов с 68 внешними выводами для соединения требуется четыре сигнальных слоя, а при увеличении числа внешних выводов до 200—только два. Число слоев МПП зависит также от конструктивного исполнения ИС. Так, корпус ИС с двумя рядами внешних выводов, занимающий в три раза большую площадь, чем керамический микрокорпус (кристаллодержатель), и в 10...12 раз большую площадь, чем бескорпусные ИС (кристаллы), можно в ряде случаев разместить на ДПП. Для коммутации ИС в микрокорпусах необходимо около 6...8 слоев; еще больше слоев требуется для коммутации бескорпусных ИС.

Толщина МПП определяется числом слоев и их толщиной. Обычно шины питания, шины с нулевым потенциалом и сигнальные шины (линии связи) располагаются в различных слоях, сигнальные—во внешних (там устанавливаются ЭРЭ и ИС), а шины питания и «земляные» шины—во внутренних слоях. Иногда наружные слои являются экранирующими; в этом случае в них выполняются окна для доступа к контактным площадкам на слоях, находящихся под экранирующими. Толщина ОПП определяется прочностью и жесткостью, а для ДПП и МПП с металлизацией сквозных отверстий (с целью облегчения гальванического меднения отверстий) требуется, чтобы отношение диаметра отверстий к толщине платы было не менее 0,4 для плат первого класса плотности и 0,33 для плат второго и третьего классов плотности. Толщина гибких печатных кабелей 0,06...0,3 мм; плат типа ОПП и ДПП—0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 мм. Наибольшее распространение получили платы толщиной 1,0 и 1,5 мм. Толщина плат на металлическом основании 0,8 мм.

Размещение ЭРЭ и ИС на плате предшествует трассировке линий связи и во многом определяет эффективность трассировки. Системность подхода к размещению элементов заключается в том, что, с одной стороны, необходимо разместить элементы как можно более плотно, а с другой—обеспечить наилучшие условия для трассировки, электромагнитной и тепловой со-

вместимости, автоматизации сборки, контактирования и контроля. При размещении элементов цифровых узлов, как правило, используется регулярная структура фиксированных посадочных мест. Шаг размещения элементов указан в нормативной документации. При размещении элементов цифровых узлов всю схему делят на группы тесно связанных между собой (имеющих большое число связей) элементов. Группу, которая имеет наибольшее число связей с соединителями или контактными площадками внешних связей, размещают ближе к ним. Затем размещают группу, которая имеет наибольшее число связей с первой и т. д. При размещении логических элементов их можно менять местами, так как помехоустойчивость их достаточно высока. Иногда на плате цифрового узла имеются аналоговые схемы (усилители считанных с устройств памяти сигналов, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и т. д.). В этом случае элементы аналоговой схемы располагаются на плате в последовательности, в которой они изображены на схеме, элементы, относящиеся к одному каскаду, должны быть расположены ближе к осевой линии, общей для каскада. Вход и выход схемы должны быть максимально разнесены во избежание возникновения паразитных связей и изменения параметров усилительных каскадов (искажений, возбуждений, зависимости параметров от частоты). Не допускается менять местами элементы различных каскадов. Размещение элементов в этом случае осуществляется без выделения на плате фиксированных посадочных мест (из-за различия элементов по габаритам и форме).

При решении задачи трассировки линий связи системность подхода заключается в нахождении приемлемого компромисса с учетом схемотехнических (минимизация помех), конструкторских (минимизация числа слоев) и технологических (минимизация изгибов трасс, межслойных переходов, перемычек из объемного провода) факторов. При увеличении числа слоев трассировка упрощается, но стоимость платы растет. При малом числе слоев (ОПП, ДПП) стоимость платы снижается, но увеличивается сложность трассировки без перемычек, которые увеличивают стоимость сборки и снижают надежность платы. Трассировка печатных плат может осуществляться вручную, автоматизированным или автоматическим методом. Таким образом, при проектировании электрических соединений необходимо учитывать возможности технологических процессов и их стабильность.

§ 2.8. Электромагнитная совместимость аналоговых узлов

Аналоговые узлы (радиопередающие устройства, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, устройства управления исполнительными механизмами и т. д.) имеют более широкие, чем цифровые узлы, диапазоны изменения параметров электромагнитных

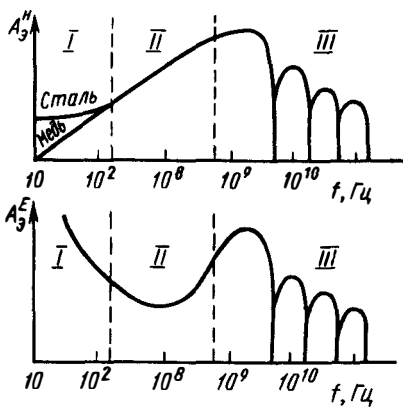


Рис. 2.42. Зависимость экранного затухания магнитной (A_3^H) и электрической (A_3^E) составляющих поля от частоты:

I — диапазон НЧ; II; — диапазон ВЧ; III — диапазон СВЧ

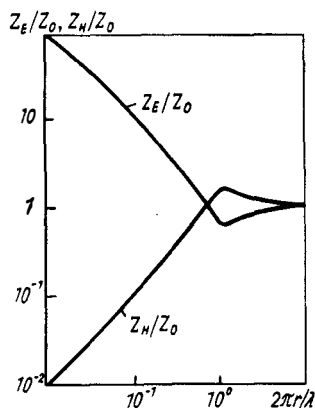


Рис. 2.43. Отношение величины волнового сопротивления электрической Z_E и магнитной Z_H составляющих поля к волновому сопротивлению электромагнитного поля Z_0 в зависимости от расстояния между излучателем и приемником

сигналов: амплитуды напряжения (от 10^{-6} до 10^4 В), частоты (от 0 до 3000 ГГц), мощности (от 10^{-14} Вт до сотен мегаватт), а также худшее отношение сигнал-помеха. Это усложняет обеспечение электромагнитной совместимости аналоговых узлов РЭС, которая должна осуществляться уже на этапе проектирования, так как стоимость работ по обеспечению параметров РЭС на этом этапе меньше стоимости работ по обеспечению электромагнитной совместимости на этапе производства или испытания (отладки) аппаратуры.

Механизм искажения и затухания сигналов, а также появления помех в аналоговых узлах такой же, как и в цифровых узлах. Однако электрически длинные линии имеют место в аналоговых узлах лишь для диапазона СВЧ, а в диапазоне ВЧ преобладают линии электрически короткие. В них наибольшее влияние оказывают паразитные связи, характер которых зависит от расстояния r между источниками и приемниками помех. Когда это расстояние меньше пяти длин волн самой высокочастотной составляющей спектра сигнала, наблюдается преобладание электрической (E) или магнитной (H) составляющей электромагнитного поля и соответственно емкостной или индуктивной паразитной связи. Обычно это имеет место на частотах 0...3000 Гц (рис. 2.42). Волновые сопротивления для электрической и магнитной составляющей поля являются взаимно обратными (рис. 2.43). Электрическое поле при нулевой частоте обладает высокоомным

волновым сопротивлением (Z_E), а магнитное — низкоомным (Z_H). На расстояниях, больших 5λ (начиная с частот, больших 3000 Гц), отношение амплитуд напряженности составляющих поля E и H таково, что волновое сопротивление электромагнитного поля для вакуума $Z_0 = 377$ Ом.

Напряженность ближних электрического и магнитного полей в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния от возбуждающего его элемента, а напряженность поля излучения обратно пропорциональна первой степени расстояния. Напряжение на конце проводной линии или волновода с увеличением расстояния падает весьма медленно, за исключением случая стоячих волн в линии, когда небольшие изменения расстояния могут приводить к значительному увеличению или уменьшению напряжения. Из приведенных рассуждений следует, что при малых расстояниях ($r \leq 5\lambda$) действуют все четыре вида связи (индуктивная, емкостная, через электромагнитное поле, через провода и волноводы). С увеличением расстояния r ($r \geq 5\lambda$) прежде всего исчезают связи через ближнее электрическое и магнитное поля, затем перестает влиять электромагнитное поле излучения и на большом расстоянии влияет только связь по проводам и волноводам. Если корпус аналогового узла имеет коробчатую форму, то при отсутствии экранирующих перегородок и выступающих элементов его можно рассматривать как волновод, по которому с малым затуханием распространяются волны короче критической ($\lambda_{кр} = 2b$, где b — размер большей стороны поперечного сечения корпуса). Волны длиннее критической в корпусе распространяться не могут, и в нем существует поле, наблюдаемое в непосредственной близости от источника излучения и быстро затухающее по мере удаления от него. Явление передачи энергии по корпусу устройств СВЧ в волноводном режиме можно устранить, установив перегородки внутри корпуса.

Электромагнитная совместимость аналоговых узлов обеспечивается системотехническими, схемотехническими и конструкторско-технологическими методами. К *системотехническим методам* относятся передача аналоговой информации в цифровой форме и кодирование ее с помощью помехозащищенных кодов, к *схемотехническим* — увеличение помехозащищенности схем (исключение необоснованного использования элементов с повышенной рабочей частотой, применение схем на основе дифференциальных усилителей), гальваническая развязка цепей с помощью трансформаторов или оптронов, подавление помех с помощью режекторных фильтров, использование амплитудного и временного стробирования, искрогасящих цепей у разрывных контактов, прецизионных (например, малозумящих) элементов и т. д. Хотя применение системотехнических и схемотехнических методов приводит к усложнению схем, увеличению числа элементов, в том

числе дефицитных, и в конечном итоге усложняет и удорожает РЭС, оно оправдано в тех случаях, когда проблему электромагнитной совместимости невозможно решить конструкторско-технологическими методами.

§ 2.9 Электромагнитная совместимость усилительных схем

Наиболее универсальным (широко применяемым) и наиболее чувствительным к помехам аналоговым узлом является усилитель. При отсутствии полезного сигнала на входе усилителя на его выходе имеется некоторое (обычно небольшое) напряжение, обусловленное внутренними помехами (вызванными тепловыми шумами резисторов и активных элементов), а также внешними помехами (наводками) на входе с выхода усилителя или от других устройств. Наибольшее влияние оказывают внешние помехи, которые могут поступать на усилитель различными путями через емкостные, индуктивные и кондуктивные паразитные связи.

На рис. 2.44 показана схема трехкаскадного усилителя, на вход которого поступает емкостная помеха (рис. 2.44, а) с выхода последнего каскада. Для оценки допустимой величины паразитной емкости предположим, что обратные связи имеются только между входом и выходом однокаскадного усилителя (рис. 2.45), коэффициент усиления которого без обратной связи равен K , а коэффициент, показывающий, какая доля выходного сигнала передается на вход через обратную связь, равен β . Коэффициент усиления усилителя с обратной связью $K_{oc} = K / (1 - \beta K)$. Если $|1 - \beta K| < 1$, то обратная связь положительная, если $|1 - \beta K| > 1$, то отрицательная. Произведение βK зависит от частоты, и на одних частотах наблюдается положительная обратная связь, а на других — отрицательная. Петлями обратной связи может быть охвачен один или несколько каскадов.

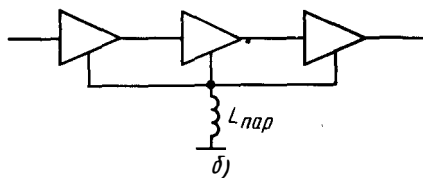
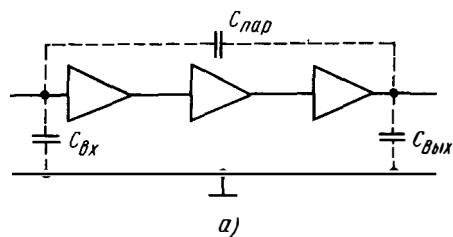


Рис. 2.44. Образование паразитной связи в многокаскадном усилителе:

а — емкостная связь между входом и выходом;
б — индуктивная связь по земляной шине

Петлями обратной связи может быть охвачен один или несколько каскадов.

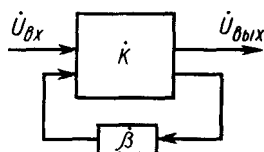


Рис. 2.45. Схема усилителя с обратной связью

При коэффициенте положительной обратной связи любой из петель, равном или превышающем единицу, усилитель может самовозбудиться. При емкостном сопротивлении обратной связи X_C , много большим сопротивления входной цепи усилителя $Z_{вх}$, в которую попадает напряжение помехи, условие самовозбуждения имеет вид

$$K_y = Z_{вх} / (Z_{вх} + X_C) \approx K Z_{вх} / X_C = |K Z_{вх} \omega C_{пар}| \geq 1,$$

где K_y — коэффициент усиления по напряжению части усилителя, охваченной обратной связью через емкость $C_{пар}$. Из этого условия следует, что достаточная для самовозбуждения усилителя емкость $C_{пар} = 1/(\omega Z_{вх} K_y)$. При $K_y = 10^4$; $Z_{вх} = 10^3$ Ом; $\omega = 10^7$ ($f = 1,5$ МГц) и благоприятном для возбуждения фазовом сдвиге помехи $C_{пар} = 0,01$ пФ. Чтобы характеристики устройства при наличии обратной связи заметно не изменились, величина $C_{пар}$ между входом и выходом усилителя должна быть на порядок меньше, т. е. должна быть равна $0,001$ пФ. Уменьшения емкостной паразитной связи можно добиться, разнося источники и приемники помех или используя во входной цепи диэлектрики с небольшой относительной диэлектрической проницаемостью, например фольгированный фторопласт (ФФ-4, ФАФ-4), полиимид. Это одновременно позволяет уменьшить потери во входных цепях усилителя и паразитную связь с другими устройствами.

Примером кондуктивной помехи является помеха $E_{пом}$, поступающая на вход усилителя с шины питания через делитель $R_1 R_2$ (рис. 2.46). В конструкциях аналоговых РЭС и их узлов имеют место паразитные общие сопротивления $Z_{общ}$ (см. рис. 2.29, г), входящие одновременно в цепь источников и приемников наводки. В качестве таких сопротивлений могут выступать активное и индуктивное сопротивления шин питания и шин с нулевым потенциалом, внутреннее сопротивление источника питания, а также отдельные участки шин, общие для нескольких цепей (переходные лепестки, участки проводов в цепи заземления, рис. 2.47). Паразитная связь через внутреннее сопротивление источника питания и питающие шины является наиболее распространенной, так как обычно используется источник питания, общий для элементов и узлов, различающихся мощностью и помехоустойчивостью. Минимальные сигналы на входе усилителя могут достигать долей микровольт. Использование источника питания, имеющего на порядок более низкий уровень помех, сложно и дорого. Поэтому

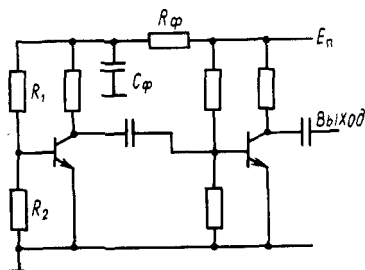


Рис. 2.46. Схема воздействия помех на вход усилителя от шины питания

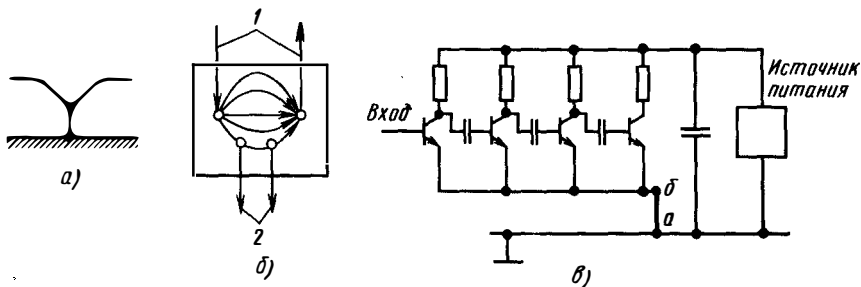


Рис. 2.47. Паразитные связи в общей шине через общий лепесток (а), через общий для цепей 1 и 2 участок корпуса (б), через общий участок а—б в цепи заземления многокаскадной схемы (в)

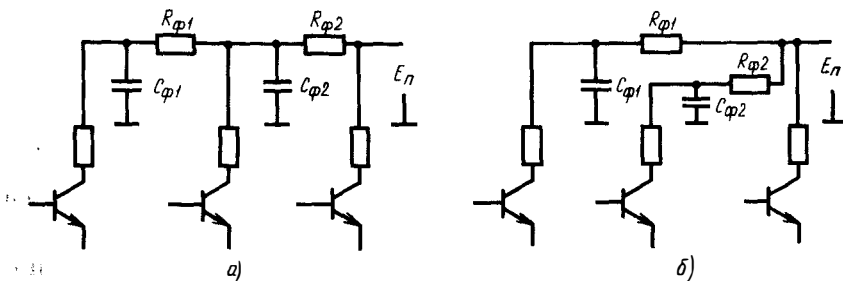


Рис. 2.48. Последовательное (а) и параллельное (б) включения фильтров в цепи питания

он рассчитывается исходя из пульсаций, допустимых для мощного каскада, а дополнительное *сглаживание пульсаций*, возникающих из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника питания и шинах питания, осуществляют с помощью фильтров, подключенных к маломощным каскадам.

При использовании RC -фильтров (рис. 2.48) резистор выбирают из условия $R_{\phi} = U_{\phi} / I_{\phi} = (0,05 \dots 0,5) E_n / I_0$, где E_n — ЭДС источника питания; I_0 — постоянная составляющая тока. Коэффициент развязки фильтра $K_{\phi p} = U_{\text{пом}} / U_{\text{доп}}$, где $U_{\text{доп}}$ — допустимая амплитуда помехи на выходе фильтра; $U_{\text{пом}}$ — амплитуда помехи на входе фильтра. В этом случае емкость на выходе источника питания можно определить по формуле $C_{\phi} = \sqrt{K_{\phi p} - 1} / (\omega R_{\phi})$. На практике коэффициент развязки всегда меньше вычисленного, поскольку при расчете не учитываются паразитные параметры электроустановки фильтров.

В качестве примера рассмотрим фильтр, включенный на выходе генератора помех с внутренним сопротивлением $R_r = 100 \text{ Ом}$ (рис. 2.49, а) и параметрами $C_1 = C_2 = C_3 = 0,05 \text{ мкФ}$; $L_1 = L_2 = 100 \text{ мкГн}$. Частота сигнала помех на входе фильтра равна 6 МГц. Теоретический коэффициент развязки фильтра

$$K_{\text{фр}\Sigma} = \frac{R_r \omega L_1 \omega L_2}{1/(\omega C_1) 1/(\omega C_2) 1/(\omega C_3)} = R_r \omega^5 C^3 L^2 = 100 (2\pi \cdot 6 \cdot 10^6)^5 (5 \cdot 10^{-8})^3 (10^{-4})^2 = 10^{10}.$$

Допустим, при монтаже фильтра емкости C_1 — C_3 подсоединены к шине с нулевым потенциалом через отрезок ab (рис. 2.49, б) длиной 30 мм, индуктивное сопротивление которого на частоте 6 МГц составит примерно 1 Ом. Тогда напряжение помехи, ослабленное в 100 раз, поступит через конденсатор C_3 прямо на выход фильтра. Таким образом, фактическое значение $K_{\text{фр}\Sigma}$ меньше теоретического в 10^8 раз. Для уменьшения влияния

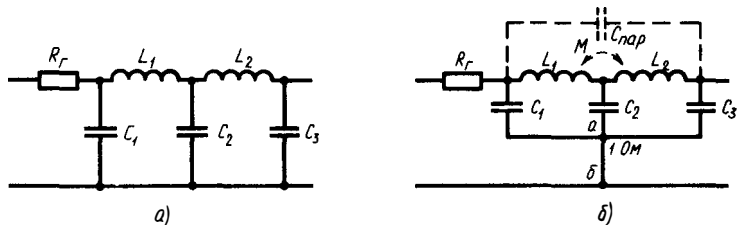


Рис. 2.49. Схема многозвенного фильтра (а) и его неверного монтажа (б): ab —общий участок в цепи заземления

активного и индуктивного сопротивлений конденсаторов фильтрующие элементы, как правило, выполняют из параллельно включенных электролитического и «безындукционного» керамического конденсаторов. Для уменьшения индуктивности соединительных проводников фильтрующие конденсаторы располагают как можно ближе к защищаемому каскаду, а заземление осуществляется в ближайшей точке.

Связь через корпус, который часто выполняет функцию шины с нулевым потенциалом, проявляется тем сильнее, чем выше рабочая частота. С повышением частоты возрастают токи в корпусе, протекающие через емкости монтажа и

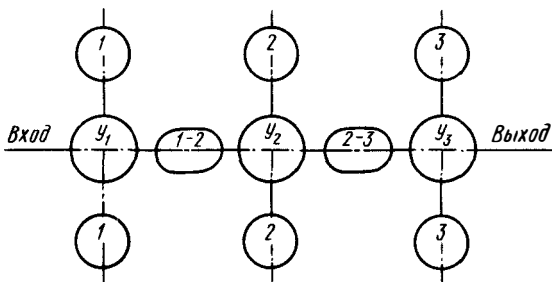


Рис. 2.50. Схема размещения элементов в широкополосном усилителе: Y_1 — Y_3 —усилительные приборы каскадов; 1—3—элементы соответствующих каскадов; 1—2, 2—3—элементы межкаскадной связи

*Цифровые
устройства
памяти
(магнитная лента
или диск)*

*Усилители
считывания*

*Усилители
записи*

Двигатели

*Приемо-
передающие
устройства*

*Входные
цепи
приемника*

*Цепи
автоматики*

*Выходные
каскады
передатчика*

*Шины с нулевым
потенциалом*

Рис. 2.51. Схема выполнения индивидуальных шин с нулевым потенциалом (земляных шин) для каждой группы устройств (цифровых, аналоговых)

деталей, увеличиваются активное и реактивное сопротивление. На частотах порядка от килогерц до единиц мегагерц разности потенциалов между различными точками корпуса настолько малы, что его поверхность можно считать эквипотенциальной и, следовательно, не создающей паразитной связи.

В широкополосных усилителях высокой и промежуточной частоты, работающих на частотах в десятки мегагерц, протекающие в поверхностном слое корпуса токи могут быть причиной значительного ухудшения устойчивости усилителя.

Для устранения обратных связей по корпусу усилителя необходимо все элементы, провода и точки присоединения к нему, относящиеся к выходу и входу двух соседних активных приборов, размещать только в промежутке между ними, по возможности ближе к продольной осевой линии (рис. 2.50). Элементы связи и точки присоединения к корпусу, относящиеся к цепям одного усилительного прибора, следует размещать как можно ближе к его поперечной оси. Между усилительными приборами, даже на довольно большом расстоянии от продольной оси, недопустимо размещать детали, связи и точки присоединения к корпусу, относящиеся к другим каскадам данного усилителя. Все эти условия выполняются наилучшим образом, если каскады располагаются один за другим на одной линии. Такая конструкция называется линейкой.

При автоматическом размещении элементов на плате аналогового узла запрещается улучшать размещение элементов путем перестановки их местами, допускаемой для элементов цифровых узлов. Для уменьшения переходного сопротивления контакта заземления и повышения его стабильности целесообразно выполнять его в виде монолитного (паяного или сварного), а не

прижимного или разъемного соединения. Эффективным путем уменьшения длины общих участков является использование отдельной шины с нулевым потенциалом для каждой группы цепей: малосигнальных, с сигналами средней и большой мощности. Так, в радиотехническом устройстве шины с нулевым потенциалом (земляные шины) должны выполняться отдельно для входных цепей приемника, исполнительных цепей автоматики и выходных каскадов передатчиков (рис. 2.51).

Кондуктивная помеха может возникнуть, если, например, земляная шина выполнена (рис. 2.52) в виде замкнутого контура. В этом случае от постороннего источника за счет индуктивной связи в ней может быть наведена ЭДС (В) $E = 4,44 f H F \cdot 10^{-4}$, где f — частота, Гц; H — средняя напряженность магнитного поля, А/м; F — площадь «петли» контура, см². Даже сравнительно небольшая ЭДС на малом сопротивлении шины может создать в контуре вполне ощутимый ток, который может привести к падению напряжения (кондуктивной помехе) на участке ab (рис. 2.52), равному примерно $E/4$ (для данной конструкции). Для исключения подобной помехи необходимо разомкнуть контур. Индуктивную связь можно также ослабить, уменьшая площадь взаимосвязанных контуров в результате использования скрученных или бифилярных пар проводников (в том числе в экране), расположения объемных и печатных проводников вблизи плоскости с нулевым потенциалом. Так, замена одиночного проводника диаметром 0,5 мм и длиной 500 мм, отстоящего от плоскости с нулевым потенциалом на 100...200 мм, скруткой или бифиляром позволяет уменьшить индуктивность контура (а следовательно, и помехи) с 800...900 до 180...320 нГн, т. е. в 3...4 раза. Обычно скрученные пары и бифиляры используют до частоты 100 кГц (на частоте 10 МГц велики потери); коаксиальные кабели — до частоты 100 МГц (на частоте 1 ГГц велики потери); полые волноводы — на более высоких частотах.

Если на оба входа дифференциального усилителя поступают одинаковые по полярности и амплитуде помехи (синфазные), то они подавляются усилителем. Если на оба входа дифференциального усилителя (рис. 2.53) поступают помехи одинаковые по

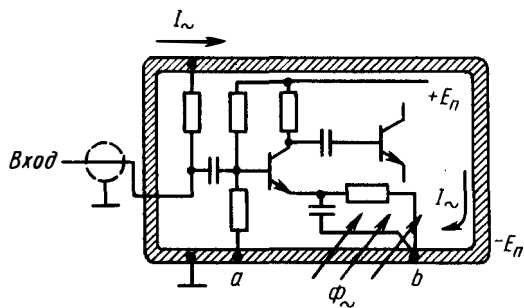


Рис. 2.52. Земляная печатная шина в виде замкнутого контура:

Φ_{ω} — магнитный поток от поля рассеивания силового трансформатора

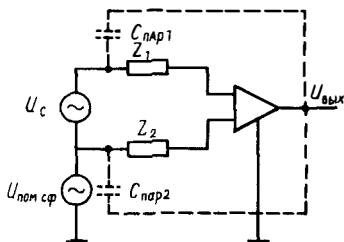


Рис. 2.53. Схема воздействия сигнала U_c и синфазной помехи $U_{\text{пом.сф}}$ на усилитель с двумя входами

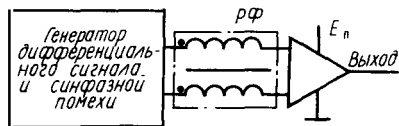


Рис. 2.54. Схема включения режекторного фильтра (РФ) на входе усилителя

амплитуде, но противоположные по полярности или одинаковые по полярности, но разные по амплитуде (дифференциальные помехи), то они усиливаются. Дифференциальные помехи могут возникнуть из-за различной паразитной связи входов усилителя с источником помех ($C_{\text{пар}1}$ и $C_{\text{пар}2}$ на рис. 2.53).

Для аналоговых узлов шире, чем для цифровых, используют методы, позволяющие осуществить взаимную компенсацию помех одинаковой амплитуды и противоположной полярности: скрученные пары, дифференциальные усилители, режекторные фильтры (рис. 2.54). Использование режекторного фильтра основано на том, что он имеет малое сопротивление для тока дифференциального сигнала (имеющего разную полярность) на входе фильтра и большое сопротивление для тока синфазной помехи (в результате суммирования магнитных потоков обмоток). В качестве эффективных элементов гальванической развязки можно использовать оптроны.

§ 2.10. Обеспечение электромагнитной совместимости аналоговых узлов экранированием

Если при разработке конструкции аналогового узла указанные меры по обеспечению электромагнитной совместимости окажутся недостаточными, то осуществляют *экранирование*, уменьшающее перекрестные помехи в требуемое число раз. Однако это увеличивает сложность аппаратуры, ее габариты, массу, стоимость. Экранирование заключается в локализации электромагнитной энергии в определенном пространстве. Поглощая и отражая поток электромагнитной энергии, создаваемой источниками поля, экран отводит его от защищаемой области. Эффективностью экранирования (\mathcal{E}) называют отношение напряжений, токов, напряженностей электрического и магнитного полей в экранируемой области при отсутствии и при наличии экрана: $\mathcal{E} = U/U' = I/I' = E/E' = H/H'$. В технике проводной связи эту величину принято оценивать в неперах: $B = \ln \mathcal{E} = 0,115A$. В радиотехнике эффективность экранирования (экранное затухание) оценивают в децибелах: $A = 20 \lg \mathcal{E} = 8,7B$.

В ближней зоне (на низких частотах) используется экранирование электрической или магнитной составляющей поля, а в дальней зоне (на высоких частотах) — электромагнитного поля. При конструировании необходимо ясно представлять физику работы электростатического, магнитоэлектрического и электромагнитного экранов.

Электростатическое экранирование основано на замыкании электрического экрана (паразитной емкости) на шину с нулевым потенциалом (корпус, «землю»). Например, помещение заземленного электростатического экрана между точками A и B (рис. 2.55) приводит к замыканию емкостей C_1 и C_2 на землю, а емкость $C_{\text{пар}}$ уменьшается до $C'_{\text{пар}}$ (за счет увеличения длины силовых линий поля между точками A и B). Эффективность экранирования $\mathcal{E} = C_{\text{пар}} / C'_{\text{пар}}$.

Если установка крышки блока увеличивает емкость $C'_{\text{пар}}$ между точками A и B (за счет емкостей C_1, C_2, C_3 , рис. 2.56, a), экран плохо соединен с землей или имеет значительную индуктивность соединительного проводника (рис. 2.56, b), то эффективность экранирования резко снижается.

При выполнении электростатического экрана в виде сплошной замкнутой поверхности емкость $C_{\text{пар}} \rightarrow 0$ и $\mathcal{E} \rightarrow \infty$. В реальных конструкциях имеются отверстия для доступа внутрь экрана, и оценить емкость $C'_{\text{пар}}$ можно только экспериментально. Однако если отверстия и щели в электростатическом экране соизмеримы с длиной волны электромагнитных колебаний, то через них может проникать электромагнитное поле.

Эффективность экранирования электростатического поля не зависит от толщины и металла экрана, так как токи, протекающие по нему, малы. Часто электростатические экраны выполняют в

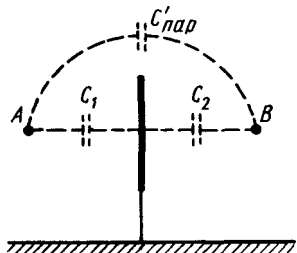


Рис. 2.55. Действие электростатического экрана, соединенного с земляной шиной

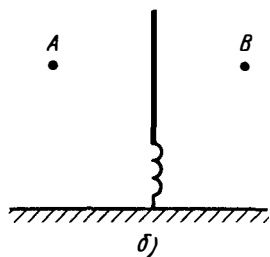
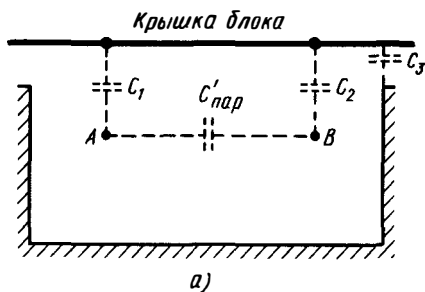


Рис. 2.56. Влияние металлической крышки блока (a) и индуктивности провода, соединяющего экран с корпусом (b), на паразитную связь между точками A и B

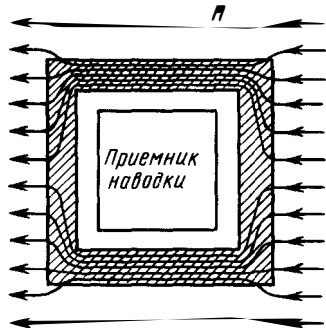


Рис. 2.57. Действие экрана из ферромагнитного материала

виде тонкого слоя металлизации диэлектрика (нижней стороны металлокерамического корпуса ИС, пластмассового каркаса экрана катушек индуктивности). В трансформаторах часто электростатический межобмоточный экран выполняют в виде незамкнутого кольца из медной фольги или обмотки, один конец которых соединен с «землей».

Магнитостатические экраны применяют для защиты от постоянного и медленноменяющихся магнитных полей (частотой 0...3000 Гц). Их изготавливают из ферромагнитных материалов (пермаллой, сталь, ферриты) с большой относительной магнитной проницаемостью. Толщина экрана из металла составляет 0,5...1,5 мм. При наличии такого экрана силовые линии магнитного поля H проходят в основном по его стенкам (рис. 2.57), которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с сопротивлением воздушного пространства около экрана (эффект поглощения). Эффективность экранирования таких полей зависит от магнитной проницаемости экрана и его толщины, а также от наличия стыков и швов, расположенных перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Этот вид экранирования называется магнитным шунтированием и дает сравнительно небольшой и практически одинаковый экранирующий эффект во всем диапазоне НЧ.

С ростом частоты возрастает роль вихревых токов, происходит вытеснение магнитного поля из толщи экрана, что эквивалентно уменьшению магнитной проницаемости, и экран переходит в электромагнитный режим работы. Магнитный экран одинаково пригоден для защиты от воздействия внешнего магнитного поля и внешнего пространства от магнитного поля, созданного источником внутри экрана. Эффективность экранирования магнитостатическим экраном можно определить по формуле $\mathcal{E} = 1 + \mu d / D$, где μ — относительная магнитная проницаемость материала экрана; d — толщина стенок экрана; D — диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий длине стенки кубического экрана.

При экранировании постоянных магнитных полей следует выполнять следующие рекомендации: применять материалы с возможно более высокой магнитной проницаемостью; избегать в конструкции экрана стыков и швов с большим сопротивлением на пути магнитных силовых линий поля помех; не допускать крепления экранируемого элемента и оболочек экрана стальными деталями, которые могут образовывать пути с малыми магнитными сопротивлениями для магнитных силовых линий поля помех;

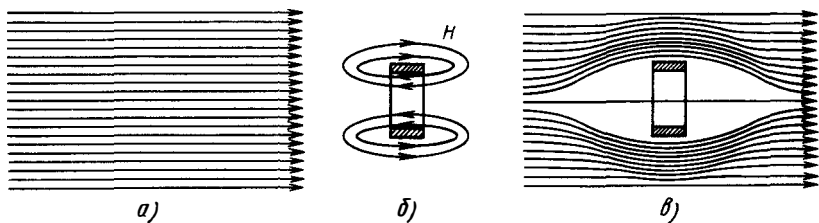


Рис. 2.58. Вытеснение электромагнитного поля вихревыми токами в экране: а — внешнее поле; б — поле от вихревых токов; в — суммарное поле

повышать эффективность экрана, применяя материалы с большим значением μ или многослойные конструкции тонких экранов, а не увеличивая толщину. Так, если вместо стали взять пермаллой с $\mu=5000$, то при той же толщине экрана эффективность экранирования возрастает в 3...5 раз. Конструктивно расстояние между экранирующими оболочками принимают равным расстоянию между первой оболочкой и ближайшим краем экранируемого объекта.

Электромагнитное экранирование применяют на частотах выше 3000 Гц. Экраны изготавливают из немагнитных и ферромагнитных металлов (табл. 2.17), что дает одновременное ослабление электрической и магнитной составляющих поля. Упрощенно суть экранирования сводится к тому, что под действием источника электромагнитной энергии на стороне экрана, обращенной к источнику, возникают заряды, а в его стенках — токи, образующие во внешнем пространстве поля, по напряженности близкие полю источника, а по направлению — противоположные ему (рис. 2.58). В результате внутри экрана происходит взаимная компенсация полей, а снаружи его — вытеснение внешнего поля полями вихревых токов (эффект отражения). Кроме того, происходит поглощение поля за счет потерь на джоулеву теплоту (при протекании вихревых токов по стенкам экрана) и на перемагничивание (если экран выполнен из ферромагнитного материала). Сталь и на высоких частотах дает больший экранирующий эффект, чем немагнитные материалы, однако надо учитывать, что стальной экран может вносить значительные потери из-за своего большого удельного сопротивления и явления гистерезиса.

Плотность вихревых токов уменьшается в металлическом экране от поверхности в глубь него. Это уменьшение тем больше, чем выше частота поля и чем больше удельное сопротивление материала экрана. За глубину проникновения δ принято расстояние, на котором плотность тока меньше, чем на поверхности, в e раз ($1/2,72$), т. е. составляет 0,37 плотности и напряженности на поверхности. Из табл. 2.17 следует, что начиная с частоты 10^4 Гц экран из любого металла толщиной

Электрические параметры экранирующих материалов

Параметр	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь Э44	Сталь Э330	Пермаллой 79НМ
Удельное сопротивление, Ом·мм ² /м	0,0175	0,06	0,03	0,1	0,1	0,65
Удельная проводимость, См·мм ⁻¹	57·10 ⁷	16,6·10 ⁷	33·10 ⁷	10·10 ⁷	10·10 ⁷	1,54·10 ⁷
Относительная магнитная проницаемость	1	1	1	50	100	12000
Эквивалентная глубина проникновения, мм, при частоте, Гц:						
10 ²	6,7000	12,4000	8,8000	—	1,540	0,380
10 ³	2,1000	3,9000	2,7500	—	0,490	0,120
10 ⁴	0,6700	1,2400	0,8800	—	0,154	0,038
10 ⁵	0,2100	0,3900	0,2750	—	0,049	0,012
10 ⁶	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	—	—
10 ⁷	0,0210	0,0390	0,0275	0,0070	—	—
10 ⁸	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	—	—

0,5...1,5 мм действует весьма эффективно, а на частотах выше 10 МГц медная и тем более серебряная фольга толщиной около 0,1 мм дает значительный экранирующий эффект, что делает целесообразным использование фольгированного диэлектрика. При выборе материала экрана и его толщины необходимо учитывать не только электрические свойства материала, но и его механическую прочность, массу, коррозионную стойкость, удобство изготовления, обеспечение надежного контакта с шиной нулевого потенциала, теплоотвод и т. д.

На низких частотах, когда толщина экрана d меньше глубины проникновения δ , поверхностный эффект можно не учитывать и эффективность экранирования определять по приближенной формуле

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + [\omega\mu_0\sigma Dd/(2m)]^2},$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, с⁻¹; D — ширина коробки прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического и сферического экрана, см; d — толщина стенок экрана, см; m — коэффициент формы экрана ($m=1$ для прямоугольного, $m=2$ для цилиндрического и $m=3$ для сферического экрана); σ — удельная проводимость материала экрана, См·мм⁻¹·10³; $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$ Гн/см — магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума).

На высоких частотах при $d > \delta$ действуют оба фактора и эффективность экранирования можно определить по приближенной формуле

$$\Xi = e^{d/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8m\mu\delta} \right),$$

где D , δ , d берутся в миллиметрах или сантиметрах.

Для уменьшения потерь при экранировании ВЧ-катушек диаметр экрана обычно в два раза превышает диаметр катушек. Область частот, где используются стальные экраны, представлена на рис. 2.59.

На частоте 10^8 Гц длина волны становится соизмеримой с размерами экрана и он переходит в волновой режим работы, отличающийся колебательным характером изменения затухания электрической и магнитной волны с изменением частоты и наличием резонансов. Резонансные явления имеют место как для плоской волны, так и для электрической и магнитной составляющих поля. Например, для волны E резонанс наступает при отношениях поперечного размера экрана к длине волны, равных 1,22; 2,234; 3,238 и т. д. При резонансе происходит суммирование всех полей отраженных стоячих волн. Это приводит к уменьшению экранного затухания (A_3), обусловленного отражением ($A_{отр}$) и поглощением ($A_{пгл}$) на величину, обусловленную резонансными потерями ($A_{рез}$). Кроме того, имеет место уменьшение экранного затухания на величину A_ϕ из-за отличия формы экрана от плоской ($A_\phi=0$ для плоского экрана, $A_\phi=10$ для цилиндрического, $A_\phi=9,6$ для сферического). Тогда общее экранное затухание $A_3 = A_{отр} + A_{пгл} - A_{рез} - A_\phi$. Резонансные потери для экранов из алюминия, меди и стали в диапазоне частот $10^8 \dots 10^{12}$ Гц иллюстрирует рис. 2.60.

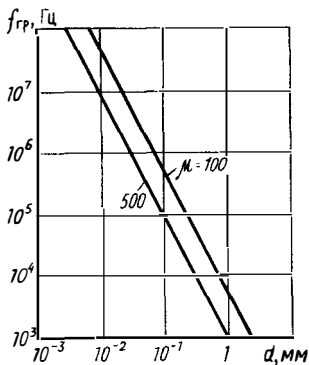


Рис. 2.59. Зависимость граничной частоты $f_{гр}$ от толщины экрана d из стали и магнитной проницаемости μ

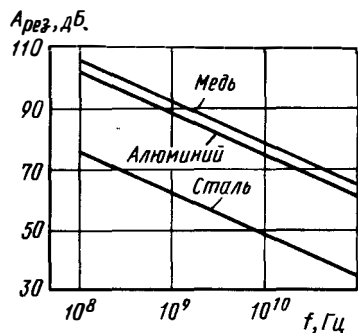


Рис. 2.60. Частотные зависимости коэффициента $A_{рез}$ для различных материалов, имеющих поверхностную проводимость, соответствующую основной массе металла

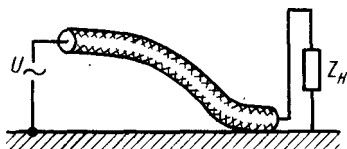


Рис. 2.61. Экранирование электрического поля

длиной волны. Поэтому при разработке конструкции ВЧ- и СВЧ-узлов особое внимание должно быть уделено экранированию проводов и кабелей, а также обеспечению электрогерметичности волноводов и экранов.

Использование в качестве электромонтажных связей экранированных проводников требует соблюдения ряда условий при заземлении экранирующей оболочки. Применение провода с экранирующей металлической оболочкой, не соединенной с корпусом, никакого экранирующего эффекта не дает, так как в оболочке не могут возникнуть дополнительные токи, магнитное поле которых могло бы уменьшить поле, создаваемое основным током в проводе, и отсутствуют условия для стекания электрических зарядов. При соединении оболочки с корпусом в любой точке (рис. 2.61) емкость оболочки — корпус замыкается накоротко, все электрическое поле концентрируется в емкости провод — оболочка и внешне электрическое поле отсутствует. Экранированный провод заземляется в одной точке, если его длина $l \leq 0,05\lambda$, где λ — длина волны самой высокочастотной составляющей спектра сигнала. Такое заземление резко увеличивает емкостный ток, который протекает минуя нагрузку.

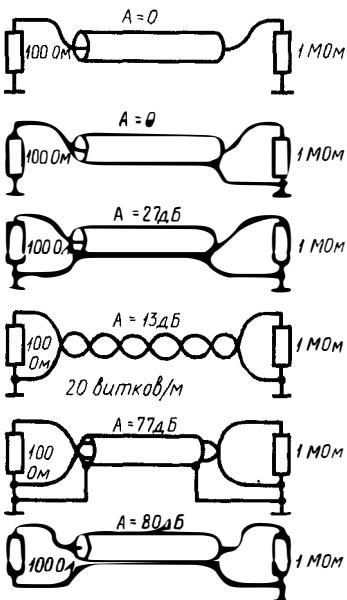


Рис. 2.62. Эффективность схем подавления индуктивных помех на низкой частоте экрана на частоте 50 кГц

Эффективность экрана может снижаться при проникновении электромагнитной волны не только через материал экрана, но и по проводам, проходящим через экран к защищаемым элементам, и через отверстия и щели, предназначенные для облегчения доступа к элементам регулирования, если их размеры соизмеримы с длиной волны. Поэтому при разработке конструкции ВЧ- и СВЧ-узлов особое внимание должно быть уделено экранированию проводов и кабелей, а также обеспечению электрогерметичности волноводов и экранов.

Использование в качестве электромонтажных связей экранированных проводников требует соблюдения ряда условий при заземлении экранирующей оболочки. Применение провода с экранирующей металлической оболочкой, не соединенной с корпусом, никакого экранирующего эффекта не дает, так как в оболочке не могут возникнуть дополнительные токи, магнитное поле которых могло бы уменьшить поле, создаваемое основным током в проводе, и отсутствуют условия для стекания электрических зарядов. При соединении оболочки с корпусом в любой точке (рис. 2.61) емкость оболочки — корпус замыкается накоротко, все электрическое поле концентрируется в емкости провод — оболочка и внешне электрическое поле отсутствует. Экранированный провод заземляется в одной точке, если его длина $l \leq 0,05\lambda$, где λ — длина волны самой высокочастотной составляющей спектра сигнала. Такое заземление резко увеличивает емкостный ток, который протекает минуя нагрузку. При заземлении экранирующей оболочки необходимо принимать меры для уменьшения площади контура заземления, а также исключения последовательного включения с контуром генератора шумов. На низких частотах это достигается подведением сигнала скрученной парой, заключенной в экран.

Для подавления индуктивных помех на низкой частоте экран на приемном конце линии соединяется с корпусом, а на обоих концах линии —

с земляным (обратным) проводом скрученной пары (рис. 2.62). Если устройство помещено в двойной экран, то оболочка экранированного провода соединяется с внутренним экраном. Для уменьшения шумов используют специальные схемы заземления операционных усилителей. Соединение оболочки с корпусом не исключает наличия магнитного поля в окружающем пространстве. Если обратный ток пропустить по экрану, то экранируется как электрическое, так и магнитное поле (рис. 2.62, 2.63). Для этого необходимо, чтобы оболочка была единственным проводником обратного тока, т. е. ее не шунтировали другие проводники и корпус.

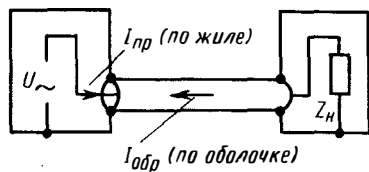


Рис. 2.63. Полное экранирование электрического и магнитного полей

Из-за поверхностного эффекта на частотах выше 10 МГц обратный ток протекает в основном по внутренней поверхности оболочки. Чем выше частота, тем меньше глубина проникновения тока внутрь оболочки, тем меньшая часть тока протекает по ее наружной поверхности и тем меньше проявляется эффект нарушения экранирования при наружном коротком замыкании оболочки. На низких частотах дополнительное соединение корпусов или частичное замыкание оболочки может нарушить экранирование, так как при этом часть обратного тока $I_{обр}$ протекает минуя оболочку (рис. 2.64). Наличие экранирующей оболочки резко увеличивает емкость провода на корпус, что обычно нежелательно, за исключением случаев экранирования проводов питания, когда эта емкость оказывается включенной параллельно емкости выходного конденсатора источника питания.

Экранированные провода громоздки, неудобны при монтаже, и требуется предохранять их от случайных соединений с другими деталями. Длина экранированного участка должна быть меньше четверти длины самой короткой волны спектра передаваемого сигнала. Если это условие не выполняется, то провод следует рассматривать как линию с распределенными параметрами. Особое внимание необходимо уделять тщательной заделке концов кабеля в ВЧ-соединители. При плохом контакте может уменьшиться амплитуда сигналов и появятся отражения.

Особую важность вопросы экранирования и заземления приобретают при конструировании микросистемных РЭС, имеющих разборно-стыковочные соединения. Представленные на рис. 2.65 конструкции обеспечивают высоконадежные и стабильные электрогерметичные контакты. Наиболее эффективным решением задачи хорошей электрогерметизации является применение в

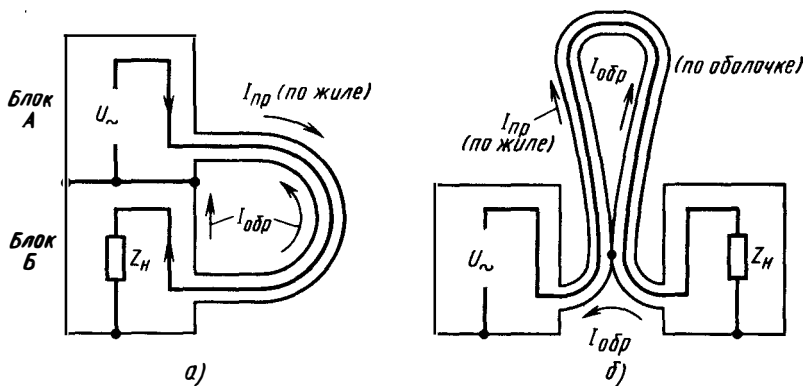


Рис. 2.64. Нарушение экранировки при замыкании корпусов приборов (а) или экранирующей оболочки провода (б)

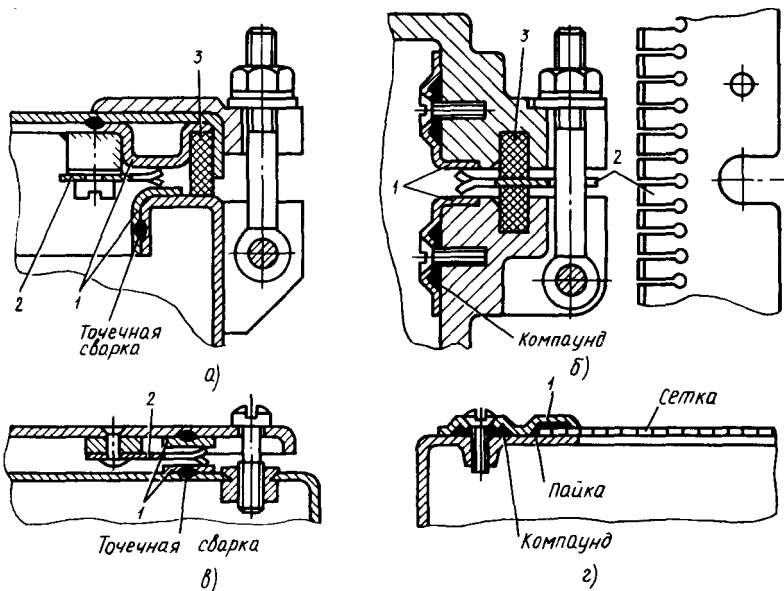


Рис. 2.65. Экранирующие узлы разъемных соединений деталей корпусов из алюминиевых сплавов, выполненных с применением проката (а), литья (б), штампованных деталей (в), сетки (г):

1 — контакты из плакированного алюминия; 2 — упругодеформируемая лента (бериллиевая бронза); 3 — герметизирующая прокладка из резины

стыковочных устройствах высокочастотных блоков промежуточных контактных элементов двух типов: несъемных (на каждой

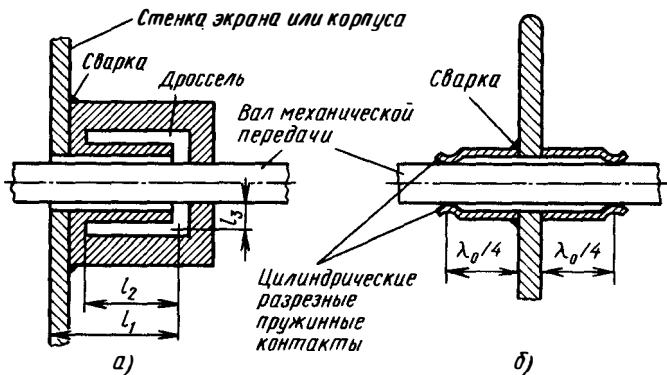


Рис. 2.66. Конструктивные схемы узлов в экранах СВЧ и корпусах для механической передачи:

а — на основе электрического дросселя ($l_1 \approx \lambda/4$; $l_2 + l_3 \approx \lambda/4$); *б* — на основе дросселя с хорошим контактом

стыкуемой части корпуса) и съемного (рис. 2.65). Несъемные контактные элементы изготовляют из тонкой листовой меди или латуни с соответствующими покрытиями, а также из листового биметалла Al—Cu. Промежуточный контактный элемент во всех случаях выполняют из тонкой листовой термически обработанной бериллиевой бронзы. Контактный элемент имеет по всему периметру упругодеформируемые зубцы, разведенные в разные стороны. При стыковке блока зубцы деформируются и в местах их вдавливания в несъемные промежуточные контактные элементы создается прерывистый электрический контакт по всему периметру стыка. Для обеспечения электрогерметичности на длительное время промежуточный контактный элемент покрывают кадмием, никелем или подвергают горячему лужению. Для защиты элементов внутри корпуса от перепадов давления и влаги используют уплотняющие элементы из кремнийорганической резины, устанавливаемые в каждой части стыкуемого корпуса.

Для экранирования элементов механической передачи настройки и регулировки устройств СВЧ применяют дроссельные устройства, позволяющие разместить электрический контакт в узле стоячей волны тока; при этом требования к качеству контакта значительно снижаются. Плечи дроссельного устройства (рис. 2.66, *а*) выбирают такими, чтобы они были равны примерно четверти средней длины волны. Поэтому дроссельные устройства являются очень узкополосными и применяют их для защиты устройств СВЧ только от внутреннего излучения. Обеспечение электрогерметичности устройств СВЧ требует высокой точности изготовления волноводов и их взаимной ориентации.

§ 2.11. Конструкторский анализ электрической схемы РЭС

Прежде чем приступить к конструкторской разработке электро-монтажа, необходимо провести анализ электрической схемы— принципа работы, специфики элементной базы, требований к источникам питания и тепловой совместимости. Оцениваются следующие характеристики элементной базы: быстродействие, помехоустойчивость, габариты, требования к установке и формовке выводов, методы крепления, необходимость теплоотвода и т. д. Оцениваются токи и напряжения в схеме путем поверочного расчета или по картам напряжений, составленных схемотехниками. Анализируется чувствительность элементов к тем или иным помехам: тепловым шумам во входных цепях, помехам по цепям питания и заземления, перекрестным помехам. Выявляются элементы и связи, способные создавать помехи, а также элементы, наиболее чувствительные к помехам. Особое внимание следует обращать на однородность элементов по быстродействию (выявляются элементы с необоснованно завышенным быстродействием) и по температурному диапазону работы (уточняются элементы с заниженным температурным диапазоном). Определяются тепло-выделяющие элементы и намечаются меры их теплоизоляции, а также определяется тип производства элементов (серийное, массовое), их стоимость и дефицитность. В результате анализа вырабатываются требования к компоновке отдельных узлов и РЭС в целом, намечаются те или иные конструктивные решения по реализации электрических связей (межконтактная коммутация и контактирование). В том случае, если принятые меры не обеспечивают электромагнитной совместимости или других характеристик РЭС (габаритов, массы, стоимости, надежности и т. д.), разрабатываются другие варианты конструкции.

При разработке конструкции электрических соединений аналогового узла особое внимание уделяется технологичности конструкции: использованию несущей конструкции из латуни или другого металла с покрытием (лужение и др.) для облегчения контактирования с земляной шиной в ближайшей к элементу точке; использованию конструкцией электрических соединений, поддающихся автоматизации и механизации (печатные платы и шлейфы, контакты для группового контактирования, стежковый монтаж, контактирование накруткой, наличие контактных площадок для автоматизированных контрольных устройств); обеспечению надежных соединений экранов с земляной шиной (в том числе ВЧ-соединителей с оплеткой коаксиальных кабелей); удобству подготовки компонентов к сборке и монтажу (зачистка изоляции, формовка выводов, лужение контактных площадок и т. д.). При изготовлении экранов следует использовать высокопроизводи-

тельные методы формообразования и сборки (штамповка, прессование, термическое распыление и т. д.), минимальное количество драгоценных металлов, дефицитных и токсичных материалов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие функции выполняют электрические соединения РЭС?
2. Как влияют электрические соединения на качество конструкции РЭС?
3. Какие виды электрических соединений используют в РЭС?
4. Какие конструкторско-технологические методы печатного электромонтажа используют в конструкции РЭС? Каковы их специфика и область применения?
5. Какие конструкторско-технологические способы электромонтажа из объемного провода используют в конструкциях РЭС? Какова область их применения?
6. Назовите способы автоматизированного электромонтажа. Какова область их применения?
7. Какие виды контактных соединений используют в конструкции РЭС? Каковы их специфика, область применения?
8. Каким требованиям должны отвечать контактные соединения РЭС?
9. Какова специфика межплатных и межблочных соединений РЭС?
10. Что такое внутренняя электромагнитная совместимость РЭС?
11. Какова помехоустойчивость основных видов логических элементов?
12. Какие линии связи являются электрически длинными и какие — короткими?
13. Как влияет согласованность линии связи на искажения сигнала?
14. Какие виды паразитных связей Вам известны?
15. Как определить амплитуду сигнала перекрестной помехи?
16. Какими системно- и схмотехническими методами можно уменьшить перекрестные помехи?
17. Какими конструкторско-технологическими методами можно уменьшить перекрестные помехи?
18. Какие задачи решают при конструировании узла на печатной плате? В чем системность этих задач?
19. В чем системность обеспечения электромагнитной совместимости аналоговых узлов?
20. Какими системно- и схмотехническими методами можно обеспечить электромагнитную совместимость аналоговых узлов?
21. Как осуществляется электростатическое экранирование?
22. Как осуществляется магнитостатическое экранирование?
23. Как осуществляется электромагнитное экранирование?

§ 3.1. Влияние теплового режима на эффективность и качество конструкций РЭС

Тепловой режим характеризуется совокупностью температур всех элементов, из которых состоит РЭС, т. е. его температурным полем (рис. 3.1). Основными тенденциями эволюции современных РЭС в микроэлектронном исполнении являются увеличение их сложности и снижение габаритов, с одной стороны, и увеличение требований к стабильности параметров — с другой. Эти тенденции противоречивы, так как увеличение сложности и уменьшение габаритов приводят к увеличению напряженности теплового режима, а требование обеспечения стабильности параметров системы связано с необходимостью его облегчения.

Увеличение напряженности теплового режима характеризуется плотностью теплового потока, который в конце 60-х годов составлял $0,1 \dots 0,3$ Вт/см², в 70-е годы — $0,5 \dots 1,0$ Вт/см², а в перспективе к 2000 г. ожидается, что он составит $8 \dots 10$ Вт/см². Эффективность и качество конструкций РЭС в значительной степени зависят от их способности отводить теплоту. Так, удельная мощность на единицу объема и массы составляет для источников вторичного электропитания на дискретных элементах и печатных платах $20 \dots 30$ Вт/дм³ и $25 \dots 30$ Вт/кг соответственно, на микросборках в металлическом корпусе — $100 \dots 150$ Вт/дм³ и $60 \dots 80$ Вт/кг и на основе металлических подложек, охлаждаемых жидкостью, — $200 \dots 300$ Вт/дм³ и $180 \dots 300$ Вт/кг. Эти данные

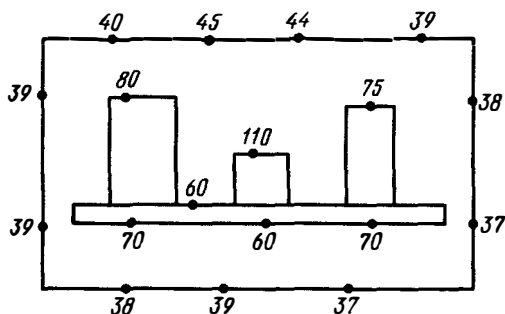


Рис. 3.1. Температурное поле РЭС (цифрами указана температура в градусах Цельсия)

приведены без учета параметров системы охлаждения, масса, габариты, потребляемая мощность, стоимость, надежность которых могут быть соизмеримы с параметрами охлаждаемого источника питания.

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС может подвергаться воздействию положительных и

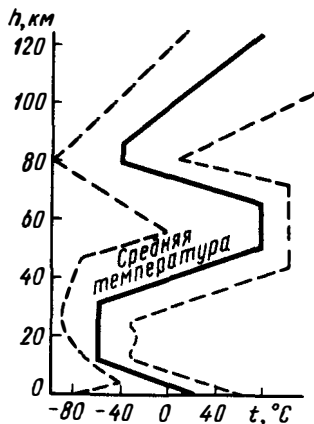


Рис. 3.2. Изменение температуры атмосферного воздуха в зависимости от высоты

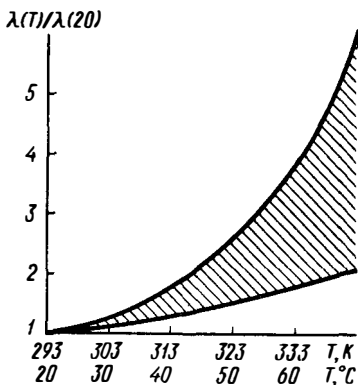


Рис. 3.3. Изменение интенсивности отказов λ с температурой для РЭС с воздушным охлаждением (заштрихована зона разброса параметров)

отрицательных температур, обусловленных влиянием окружающей среды, объекта установки и тепловыделения самого РЭС. В наземных условиях температура окружающей среды может меняться от -88°C (станция Мирный в Антарктиде) до $+90^\circ\text{C}$ (нагрев темных поверхностей в странах с жарким и сухим климатом). Диапазон изменения температуры в атмосфере на высотах до 80 км (рис. 3.2) может достигать $\pm 100^\circ\text{C}$. Для космоса этот диапазон еще шире: от -150 до $+300^\circ\text{C}$, что является результатом прямого и отраженного от Земли излучения Солнца, собственного излучения Земли, космического излучения, экранирования от излучения планет и частей объекта установки РЭС.

Диапазоны изменения температуры внутри объектов, где установлены РЭС, достигают в отапливаемых помещениях $+5 \dots +50^\circ\text{C}$; на наземных подвижных объектах $-60 \dots +60^\circ\text{C}$; на самолетах $-70 \dots +150^\circ\text{C}$ и т. д. Кроме того, на объекте установки аппаратуры могут быть локальные источники тепла (двигатели) и холода (баки с охлажденным горючим, резервуары с охладителем для повышения чувствительности фотоприемников). Само РЭС является, как правило, источником теплоты вследствие того, что его КПД менее 100%. КПД приемника на электровакуумных лампах составляет менее 1%, модулей активной фазированной антенной решетки — около 1...1,5%, транзисторного усилителя — 50...60%, т. е. значительное количество подведенной к аппаратуре энергии выделяется в виде теплоты. Если эта энергия не рассеивается в элементах конструкции или

окружающем пространстве, то повышаются температура устройства и интенсивность отказов (например, для блоков РЭС с воздушным охлаждением при изменении температуры от 40 до 70° С интенсивность отказов увеличивается в 2... 6 раз; рис. 3.3). Если температура в любой точке температурного поля РЭС не выходит за допустимые (с точки зрения надежности элементов) пределы, то тепловой режим называется *нормальным*.

Тепловой режим характеризуется напряженностью и стационарностью. Если плотность теплового потока не превышает 5 мВт/см² (перегрев поверхности аппаратуры относительно окружающей среды не более 0,5 °С), то режим считается *нетеплонапряженным*. В теплонапряженном режиме требуется обеспечение нормального теплового режима, например за счет естественной конвекции.

Стационарный тепловой режим характеризуется неизменностью температурного поля во времени вследствие наступления термодинамического баланса между источниками и поглотителями тепловой энергии. *Нестационарный тепловой режим* характеризуется зависимостью температурного поля от времени. Этот режим имеет место при быстром изменении подведенной к РЭС мощности P (включении и выключении, разовых и повторно-кратковременных режимах работы), когда часть ее идет на нагрев конструкции (P_n), часть рассеивается в окружающем пространстве (P_p) и часть идет на обеспечение полезных функций РЭС ($P_{п}$). Баланс энергии в этом случае описывается соотношением $P = P_{п} + P_p + P_n$. Тепловой режим становится стационарным, когда в результате установившегося термодинамического равновесия между окружающей средой и изделием нагрев изделия прекращается ($P_n = 0$) и соотношение для баланса энергии имеет вид $P = P_{п} + P_p$.

Воздействие отрицательных и положительных температур может снизить надежность устройства. Различают параметрическую надежность, характеризующую постепенным отклонением выходных параметров от номинальных значений, и надежность, характеризующую интенсивностью внезапных (катастрофических) отказов. *Причинами постепенных отказов*, вызванных тепловыми воздействиями, являются: снижение изоляционных свойств материалов; увеличение токов утечки; снижение пробивного напряжения; изменение коэффициента усиления и нулевого тока коллектора транзистора; изменение параметров магнитных сердечников (снижение индуктивности насыщения при повышении температуры или пропадание магнитных свойств при достижении точки Кюри); изменение емкости конденсаторов, электрической прочности, потерь; изменение сопротивлений резисторов; увеличение тепловых шумов в резисторах и транзисторах и т. д. Все эти явления могут привести к искажению сигналов до уровня, при котором нормальное функционирование РЭС становится невозможным.

Внезапные отказы РЭС, вызванные изменением температуры, обусловлены: нарушением целостности элементов конструкции вследствие различия ТКЛР ее материалов (обрыв проводников; растрескивание металлостеклянных спаев; отслаивание и растрескивание подложек; появление внутренних напряжений, приводящих к нарушению паяных, сварных и клеевых соединений, растрескиванию компаундов; заклинивание кинематических пар и т. д.); замерзанием влаги, приводящим к расширению микротрещин в подложках; отслаиванием печатных проводников, раскраиванием МПП; конденсацией влаги, создающей закорачивающие перемычки и условия для возникновения электрохимической коррозии; затвердеванием или размягчением резины, что снижает качество герметизирующих прокладок и элементов амортизации; изменением вязкости смазок; выделением газообразных составляющих из диэлектрических конструкционных материалов, что ведет к снижению электрической прочности и образованию агрессивных сред; старением припоев (перекристаллизация, образование пор) и т. д.

Электрорadioэлементы и механические части РЭС характеризуются *термостойкостью*, под которой понимается способность материалов и компонентов кратковременно выдерживать воздействие высоких и низких температур, а также резких изменений температуры (термоударов). Термостойкость определяют по температуре, соответствующей началу существенных изменений свойств или параметров компонентов, обусловленных различными физико-химическими процессами. Например, термостойкость *p-n*-переходов транзистора ограничена при высоких температурах собственной проводимостью кристалла полупроводника, а также явлением кумулятивного разогрева, приводящего к недопустимому возрастанию нулевого тока коллектора и пробую *p-n*-перехода. Считается, что допустимая температура для германиевого перехода составляет 85...110 °С, для кремниевого 125...150 °С, для непропитанных волокнистых материалов (бумага, картон, натуральный шелк) +90 °С; для материалов из стекловолокна, пропитанного эпоксидными лаками, +133 °С. В тех случаях, когда конструкция не обеспечивает нормального теплового режима обычных элементов, могут быть использованы элементы, работающие в широком температурном диапазоне благодаря введению устройств термокомпенсации. Это усложняет электрическую схему и конструкцию, ухудшает энергетические и массогабаритные параметры, стоимость РЭС и не всегда обеспечивает требуемую надежность.

§ 3.2. Системы обеспечения теплового режима РЭС

Для обеспечения теплового режима РЭС используются системы обеспечения нормального теплового режима (СОТР), каждая из

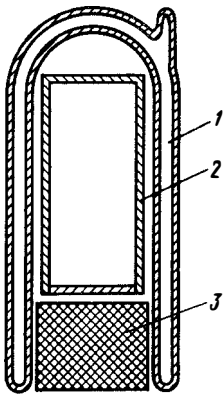


Рис. 3.4. Пассивный термостат:

1—сосуд Дьюара; 2—камера термостата; 3—теплоизоляционная пробка

которых характеризуется особенностями структуры, интенсивностью теплоотвода, техническими показателями (массой, габаритами, потребляемой мощностью, стоимостью, надежностью и т. д.).

Особенности структуры СОТР определяются:

режимом работы системы, зависящим от соотношения температуры внешней среды и температуры РЭС (нагревание, охлаждение, термостатирование);

характером связи хладагента с внешней средой (хладоагент—внешняя среда, хладагент изолирован от внешней среды, комбинированная система);

режимом работы РЭС (непрерывный, периодический);

способом передачи теплоты (конвекция, теплопроводность, излучение, за счет термоэлектрического эффекта; комбинированный способ);

способом поглощения теплоты (за счет термоаккумулирующих свойств окружающей среды и материалов конструкции, за счет термоэлектрического эффекта).

Кроме того, структура СОТР определяется областью использования с учетом условий, в которых работает система (на Земле, в атмосфере, в космосе, стационарно, на подвижном объекте и т. д.), уровнем разукрупнения РЭС (ИС, ячейка, блок, стойка и т. д.), видом аппаратуры (лазер, мощный прибор СВЧ, быстродействующая ЭВМ и т. д.).

Если средняя температура окружающей среды близка нормальной для РЭС, то система должна обеспечить изоляцию от влияния быстрых изменений температуры внешней среды. Это достигается применением пассивных (теплоизоляция, отражающие покрытия) или активных (нагрев, охлаждение, реверс) систем термостатирования. Если средняя температура окружающей среды значительно отличается от нормальной для РЭС, то используются системы для уменьшения этой разности путем дополнительного нагревания или охлаждения РЭС до средней температуры окружающей среды. Охлаждение используется в тех случаях, когда необходимо уменьшить влияние выделяющейся в аппаратуре теплоты, отвести тепловой поток от аппаратуры и затем рассеять его. Это осуществляется с помощью различных систем охлаждения, для которых имеют значение такие факторы, как способ передачи теплоты, тип хладагента и его связь с окружающей средой, режим работы аппаратуры и способ поглощения теплоты.

В тех случаях, когда объект не содержит нестабильных источников теплоты и мала теплопроводность внешних электри-

Характеристики теплоизоляционных материалов при нормальном давлении и температуре

Материалы	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³	Гигроскопичность массы, %
Волокнистые:				
минеральная вата	0,03 ... 0,04	0,75	100 ... 150	1
стекловата	0,027 ... 0,047	0,9	60 ... 130	1
стекловолокно	0,041 ... 0,048	0,9	100 ... 130	—
Порошковые:				
аэрогель	0,015 ... 0,018	0,7	60 ... 100	50
перлит	0,025 ... 0,034	—	80 ... 100	1 ... 6
Ячеистые:				
пенопласт	0,038	1,34	80 ... 100	1,5 ... 5
мипора	0,03 ... 0,033	1,4	40 ... 50	40
пеностекло	0,06 ... 0,1	0,72	100 ... 400	1

Таблица 3.2

Параметры композиций экранно-вакуумной многослойной изоляции при оптимальной плотности (граничные температуры 293 ... 300 и 77 ... 90 К, давление 10⁻³ Па)

Материал	Характеристики прокладок		Число экранов на 1 см толщины многослойной структуры	Плотность изоляции, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , мВт/(м·К)
	материал	толщина, мм, (поверхностная плотность, г/м ²)			
Отожженная алюминиевая фольга толщиной 6,3 ... 12,7 мкм	Стеклобумага СБР	(22)	20	98	0,05
	Стеклохолст ЭВТИ	0,2(40)	20	135	0,085
Полиэтилентерефталатная пленка толщиной 5 ... 12 мкм, алюминированная с двух сторон	Стекловоаль ЭВТИ-7	(7)	30	80	0,045
Рифленая алюминированная с одной стороны полиэтилентерефталатная пленка толщиной 5 ... 12 мкм	Димплар (прокладки из гладкой алюминированной пленки)	0,013	8	16	0,2

ческих связей, защиту объекта от быстрых внешних тепловых воздействий можно осуществить с помощью теплоизоляции: вакуумной (сосуд Дьюара); экранно-вакуумной (табл. 3.2); специальными материалами (табл. 3.1). Простейшим пассивным

термостатом является сосуд Дьюара (рис. 3.4), который применяются для термостатирования малогабаритных узлов. Сосуды с диаметром внутренней полости 25 мм и внешним диаметром 40 мм при длине 90 мм устойчивы к воздействиям вибрации в диапазоне частот от 10 до 200 Гц при ускорении до 15 g и к ударным перегрузкам с ускорением до 150 g. Сосуд Дьюара имеет теплопроводность, значительно меньшую теплопроводности пористой изоляции, при равной толщине. Если волокнистую, порошковую или ячеистую изоляцию расположить в вакууме (например, между стенками сосуда Дьюара), то коэффициент теплопроводности λ снижается на два порядка, например для аэрогеля до 0,02 мВт/(м·К). Достоинствами изоляции теплоизоляционными материалами являются сравнительно низкая стоимость (перлит), низкий коэффициент теплопроводности (аэрогель), высокая эффективность (вакуумно-стекловолоконная теплоизоляция диаметром волокна около 1 мкм, удельной плотностью 150...200 кг/м³, с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,5...0,6$ мВт/(м·К) в диапазоне температур 300...79 К).

Дальнейшего уменьшения λ можно достичь, используя для космических объектов или для сосудов Дьюара экранно-вакуумную изоляцию, представляющую собой чередующиеся слои тонкой (5...15 мкм), обычно алюминиевой, фольги и изолирующих прослоек из стеклотрубки, капроновой сетки, рифленой полиэтилентерефталатной пленки (майлар) и других материалов. Высокая эффективность теплоизоляции достигается благодаря как высокой экранирующей способности (коэффициенты экранирования слоев перемножаются), так и низкой теплопроводности между слоями. Конструктивно такая теплоизоляция представляет многослойные (8...60 слоев на 1 см толщины) маты шириной 0,5...1,5 м, длиной до 10 м, толщиной 10...30 мм. Из этих матов можно сшивать многослойные защитные экраны, повторяющие форму защищаемых устройств. Подобная изоляция может также располагаться и между стенками сосуда Дьюара. Для уменьшения потерь на теплопроводность расстояние между

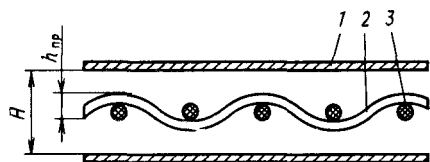


Рис. 3.5. Структура экранно-вакуумной теплоизоляции:

1 — металлическая фольга; 2, 3 — теплоизоляционные нити; H — расстояние между слоями фольги; $h_{пр}$ — толщина прокладки из нитей

экранирующими слоями должно быть в 10 раз больше толщины диэлектрических прокладок (рис. 3.5). Иногда металлическая пленка толщиной 0,02...0,04 мкм напыляется на основание из полиимидной или майларовой пленки. Для уменьшения эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$ пленка может золотиться. Для лучших 60-слойных струк-

тур $\lambda_{\text{эф}} = 0,014 \dots 0,017$ мВт/(м·К), а масса их в несколько раз меньше массы порошковых материалов. Алюминиевая фольга имеет высокую отражающую способность, малую массу, низкую стоимость. Для изготовления экранов используют мягкую фольгу, отожженную при температуре $400 \dots 450$ °С и имеющую шероховатость поверхности $R_z = 0,025 \dots 0,05$. Для снижения степени черноты содержание примесей в алюминии не должно превышать 0,5%. Фольга тоньше 5 мкм имеет малую прочность, а толще 15 мкм — способствует увеличению теплового потока по твердому телу.

В качестве межслойных прокладок используют пленку толщиной $0,005 \dots 0,012$ мм и иногда в качестве основы экранов — рифленую полиэтилентерефталатную пленку (ПЭТФ-ОА), позволяющую обходиться без прокладок.

При конструировании пассивных термостатов необходимо учитывать, что увеличение теплового сопротивления теплоизоляции целесообразно лишь до величины, равной тепловому сопротивлению электрических выводов из термостатируемого объема. Если колебания температуры внутри камеры превышают допустимое значение, то между камерой и объектом термостатирования должен быть размещен тепловой демпфер, в противном случае — материал с хорошей теплопроводностью.

Активное термостатирование позволяет поддерживать температуру с необходимой точностью, что особенно важно для таких объектов, как задающие генераторы частоты. В большинстве случаев термостатируется не сам объект, а изотермическая камера с объектом (рис. 3.6). По точности поддержания температуры различают грубые ($\pm 0,5$ °С), средней точности ($\pm 0,1 \dots 0,5$ °С) и прецизионные ($\pm 0,05$ °С) системы активного термостатирования РЭС. В состав активных термостатов входят измерители температуры (датчики), подогреватели (охладители), изотермические камеры, системы регулирования. Толщина стенок изотермической камеры должна выравнять температурный градиент, вызванный распределением теплового потока нагревателя (охладителя). В термостатах высокой точности поддержания температуры стационарных устройств внутреннюю камеру изготавливают из красной меди, в термостатах меньшей точности и бортовых устройствах — из алюминия и его сплавов. При проволочном нагревателе толщина стенок термостатов составляет $1 \dots 3$ мм; при пленочном нагревателе толщину стенок камеры можно уменьшить до $0,5 \dots 1$ мм; в термостатах высокой точности толщину стенок камеры желательно увеличивать до $3 \dots 10$ мм. Тепловое сопротивление между датчиком температуры и камерой термостата должно быть минимальным, воздушные зазоры недопустимы. Постоянная времени датчика должна быть меньше, чем время изменения возмущающего воздействия. Для уменьшения тепловых потерь внешняя теплоизоляция камеры должна иметь макси-

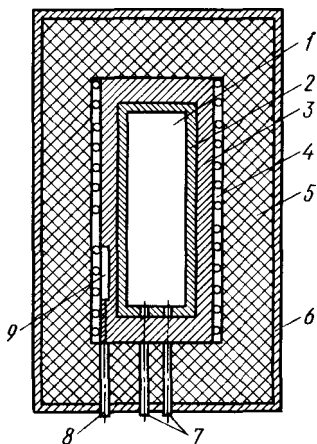


Рис. 3.6. Активный термостат с подогревателем:

1—объект термостатирования; 2—теплоизоляция теплового демпфера; 3—изотермическая камера; 4—нагреватель; 5—термоизоляция; 6—защитный корпус; 7, 8—выводы датчика и объекта термостатирования; 9—датчик температуры

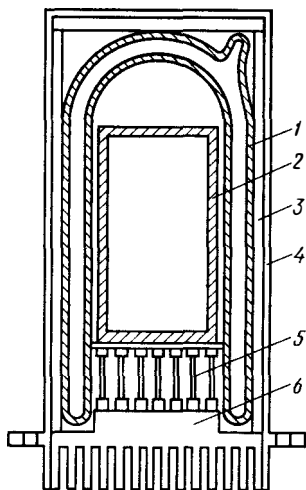


Рис. 3.7. Активный термостат с термобатарей:

1—сосуд Дьюара; 2—камера термостата; 3—прокладка; 4—кожух; 5—термоэлементы; 6—радиатор

мально возможное тепловое сопротивление. Для малогабаритных термостатов высокой точности рекомендуется применять вакуумную, вакуумно-порошковую и особенно вакуумно-слоистую изоляцию. При использовании пористой изоляции вместо вакуумной энергопотребление термостата из-за потерь возрастает в 3,8... 4,2 раза. Одна из конструкций малогабаритных термостатов представлена на рис. 3.7, где в качестве активного элемента применена термобатарея.

Если разница между средними температурами среды и аппаратуры велика, то используют СОТР, работающие в режиме нагрева или охлаждения. Нагрев используют для РЭС, работающих в северных, высокогорных районах или в открытом космосе (в тени). В остальных случаях используют СОТР, служащие для охлаждения.

Система обеспечения теплового режима может охватывать отдельные узлы, блоки или систему в целом. Так, жидкостная СОТР часто используется только для охлаждения мощных приборов СВЧ в передатчиках, а блоки обработки информации ею не охватываются. Стационарные РЭС имеют, как правило, общую СОТР.

Вещество, отводящее теплоту, называется *хладоагентом*. Это может быть газ, жидкость, твердое тело. В качестве хладоагента может быть использована окружающая среда (воздух для аппаратуры наземных и низколетящих объектов; вода (для аппаратуры, устанавливаемой на плавсредствах); материалы конструкции РЭС (при отводе тепла за счет теплопроводности). Для высоколетящих объектов или РЭС с большой теплонапряженностью, установленных на летательных аппаратах, использование в качестве хладоагента окружающей среды нецелесообразно. В комбинированных СОТР в качестве хладоагента выступают как окружающая среда, так и другие вещества. Изоляция хладоагента позволяет создавать высокоэффективные автономные (например, самолетные) жидкостные системы.

Режим работы аппаратуры влияет на тепловой режим и конструкцию СОТР. Аппаратура может работать непрерывно или периодически. Непрерывный режим работы бывает иногда кратковременным (РЭС головки наведения противотанковой ракеты).

Возможности того или иного вида СОТР и их конструкция в значительной степени определяются способом передачи теплоты (теплообмена): конвекция, теплопроводность, излучение.

§ 3.3. Теплоотвод конвекцией

Перенос теплоты конвекцией связан с движением жидкой или газообразной среды, соприкасающейся с твердым телом (элементом конструкции). Тепловая энергия передается при конвекции как между твердым телом и средой, так и в самой среде. Конвекция называется естественной, если она осуществляется при свободном движении среды за счет разности плотностей холодной и горячей ее областей, и принудительной, если движение среды происходит за счет внешних сил (вентилятора, насоса). В невесомости естественная конвекция отсутствует. Конвекционный теплообмен может быть усилен поглощением теплоты при испарении (парообразовании). Передача теплоты с помощью конвекции подчиняется закону Ньютона—Рихмана: $P_{\text{кв}} = \alpha S \Delta T$, где $P_{\text{кв}}$ — мощность теплового потока, Вт, переносимого при конвективном теплообмене газом или жидкостью в окружающую среду или из окружающей среды; α — коэффициент теплоотдачи конвекцией от компонента к окружающей среде, Вт/(м²·К); S — площадь поверхности теплоотдачи, м²; ΔT — перегрев поверхности относительно окружающей среды или среды относительно поверхности, К.

Значения α для различных конвективных способов охлаждения приведены в табл. 3.3. Конкретное значение α определяется физико-механическими и кинематическими свойствами жидкостей или газов, скоростью их перемещения; формой, шероховатостью и размерами поверхностей, соприкасающихся с хладоагентом, и т. д. Например, на интенсивность теплообмена при свободной

Значения коэффициентов теплопередачи α , Вт/(м²·К)

Охлаждающая сред, процесс	Движение среды	
	свободное	вынужденное
Газ	2...10	10...100
Вязкая жидкость (масла)	200...300	300...1000
Вода	200...600	1000...3000
Кипящая вода	500...40 000	500...40 000
Конденсация капель водяного пара	1000...100 000	1000...100 000
Конденсация паров органических жидкостей	200...2000	200...2000

конвекции влияет около десяти физических и геометрических величин. На основе теории подобия можно объединить физические и геометрические параметры; в этом случае тот же процесс можно описать с помощью небольшого числа безразмерных комплексов. К наиболее используемым безразмерным комплексам относятся следующие критерии подобия: Нуссельта (Nu), Грасгофа (Gr), Прандтля (Pr), Рейнольдса (Re) и др. Они определяются соотношениями $Nu = \alpha L / \lambda$; $Gr = g\beta\Delta t L^3 / \nu$; $Pr = \nu / a$; $Re = vL / \nu$, где

λ — коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К); β — коэффициент объемного расширения жидкости или газа, 1/К; ν — коэффициент кинематической вязкости среды, м²/с; a — коэффициент температуропроводности, м²/с; g — ускорение силы тяжести, м/с²; V — скорость потока жидкости или газа, м/с; L — определяющий размер конструкции, м (это может быть длина обтекания элемента или узла конструкции, длина пластины или цилиндра). Коэффициент α можно вычислить через коэффициент Нуссельта: $\alpha = Nu\lambda / L$.

На основании значения критериев подобия можно определить характер течения хладагента (ламинарное, турбулентное), от которого зависят эффективность теплоотвода (величина α) и уровень шума, вызванного движением хладагента. Так, при теплообмене естественной воздушной конвекцией в неограниченном пространстве (проводной монтаж одиночными проводниками) условие ламинарного течения: $GrPr = 1000...500$, для вынужденной конвекции — это условие $Re < 4 \cdot 10^4$. Для теплообмена при вынужденном движении в трубах $Re < 2200$ и значение критерия Нуссельта может быть найдено из зависимости $Nu_{лтр} = 0,15 \sqrt[3]{Re Gr^{0,1} Pr_c^{0,43} (Pr_c / Pr_{тр})^{0,25}} \epsilon_L$, где $Nu_{лтр}$ — значение критерия Нуссельта для случая ламинарного течения жидкости в трубе; Pr_c — коэффициент Прандтля для охлаждающей среды (жидкости) в центре потока; $Pr_{тр}$ — коэффициент Прандтля для

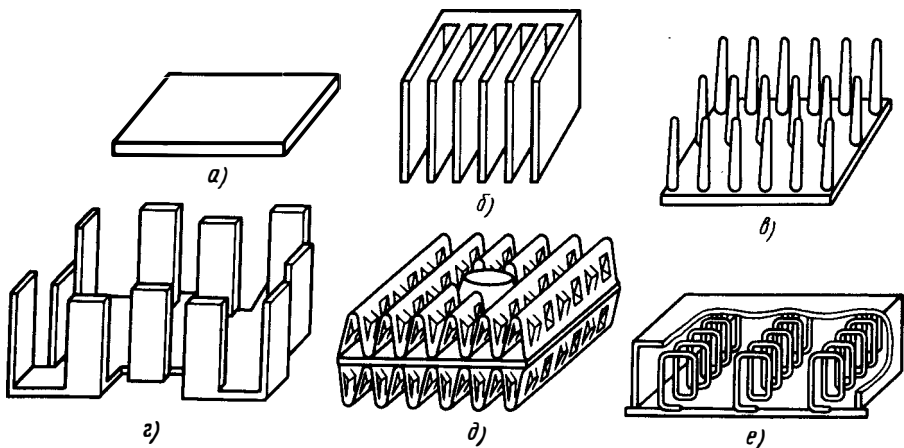


Рис. 3.8. Радиаторы воздушного охлаждения:
a — в виде пластины; *б* — в виде группы пластин; *в* — игольчатый; *г* — с пластинами по периферии; *д* — с перфорированными пластинами; *е* — спиральный

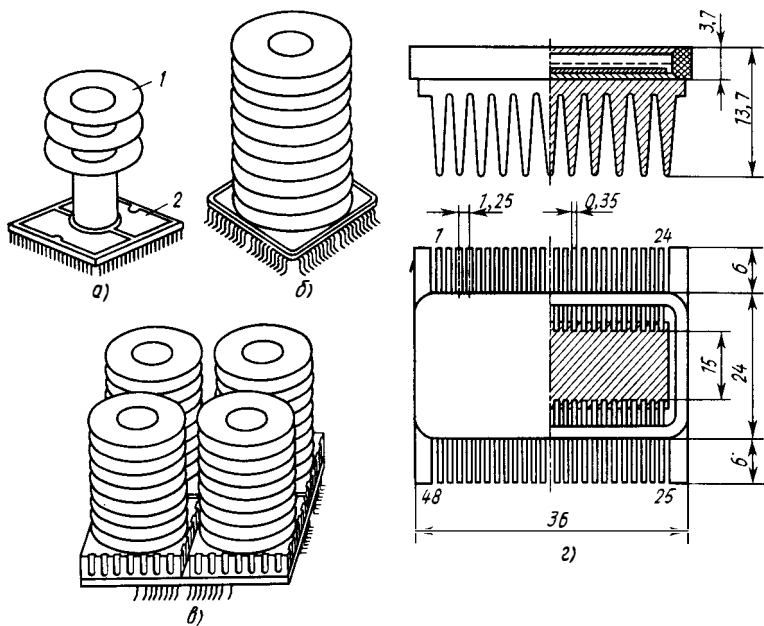


Рис. 3.9. Радиаторы воздушного охлаждения для БИС:
a — 3-реберный радиатор; 1 — дисковые ребра радиатора, 2 — БИС; $P=3$ Вт; *б* — 10-реберный радиатор; $P=10$ Вт; *в* — микросборка с четырьмя 10-реберными радиаторами; $P=40$ Вт; *г* — корпус типа 421.48-3

жидкости в пристенном участке; ε_L — поправочный коэффициент, зависящий от соотношения диаметра и длины трубы и определяемый по таблице. Аналогичные экспериментально найденные формулы существуют и для других вариантов конвективного теплообмена; они могут быть взяты из справочных материалов.

Системы воздушного конвективного теплообмена (естественного или принудительного) используются в 90...95% наземных РЭС. Применение этих систем для бортовых РЭС ограничено из-за больших габаритов системы воздушного охлаждения и низкой плотности воздуха на высоте более 12 км.

Для интенсификации воздушного охлаждения широко используют теплообменники с развитой поверхностью (рис. 3.8), называемые радиаторами. При выборе конструкции радиатора следует учитывать тип производства. В единичном производстве применимы радиаторы, изготавливаемые фрезерованием (рис. 3.8, б, г), а в серийном производстве может быть использовано литье под давлением (рис. 3.8, б, в) или штамповка (рис. 3.8, г, д). Спиральный радиатор имеет высокую эффективность, но низкую технологичность из-за трудности равномерной припайки спиралей к пластинам. Радиаторы, показанные на рис. 3.9 а—в, используют за рубежом (Япония) благодаря меньшим габаритам и стоимости воздушной системы охлаждения по сравнению с жидкостной.

Для принудительного воздушного охлаждения стоек, шкафов, пультов и блоков часто используют малогабаритные осевые вентиляторы (табл. 3.4, рис. 3.10). К недостаткам этих вентиля-

Таблица 3.4

Характеристики малогабаритных осевых вентиляторов

Тип вентилятора	Параметр				Размеры вентиляторов для компоновки РЭС, мм			Масса, кг
	производительность, м ³ /мин	скорость вращения, мин ⁻¹	потребляемая мощность, Вт	звуковое давление, дБ	диаметр крыльчатки	сторона фланца	высота корпуса	
ВМ-2	2,5	2200	20	65		129	39	0,6
ВВФ-36	0,25					40	32	0,5
ВВФ-45	0,35	2800	16	60		50	40	0,6
ВВФ-56	0,45					62	42	0,7
ВВФ-71	0,75	2850	22	55		80	42	0,8
ВВФ-90	1,50	2820	20	55		100	42	0,9
ВВФ-112М	2,30	2720	20	48		120	42	1,0
ВВО-140М	1,5				140	80	60	1,2
ВВО-180М	3,50				180	80	70	1,3
ВВО-224М	6,50	2310	20	55	224	100	75	1,5
ВВО-280М	10,0				280	100	80	2,0

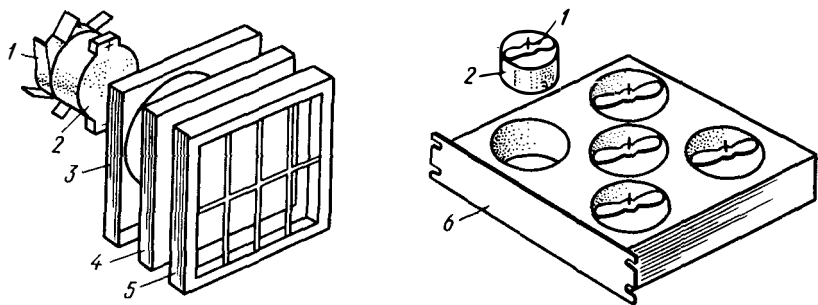


Рис. 3.10. Конструкция блоков охлаждения:

1—крыльчатка; 2—электродвигатель; 3—десущая панель; 4—фильтр от пыли; 5—защитная решетка; 6—блок осевых вентиляторов

торов относится высокий уровень шума и сравнительно небольшой напор воздуха (это затрудняет их использование для РЭС, имеющих значительное аэродинамическое сопротивление воздушных каналов). Для принудительной вентиляции сложных стационарных РЭС используют центробежные вентиляторы (табл. 3.5, рис. 3.11) значительной мощности и габаритов, работающие на приток (рис. 3.11,а), приток или вытяжку (рис. 3.11,в) или приток/вытяжку (рис. 3.11,б,г). Перегородка 3 на рис. 3.11,в позволяет разделить верхнюю и нижнюю части стойки с целью уменьшения перепада температуры. На рис. 3.11,д показан характер изменения температуры по высоте стойки (рис. 3.11,г).

Таблица 3.5

Характеристики вентиляторов для подвижных РЭС

Тип вентилятора	Производительность, м ³ /ч	Напор, Па	Тип двигателя	Потребляемая мощность, Вт	Скорость вращения, мин ⁻¹	Габариты, мм	Масса, кг
Осевой	700	120	УАД-74	30	1280	300 × 300 × 165	4,2
Осевой	300	60	УАД-32	7	2700	235 × 235 × 128	1,2
ВН-8	—	—	—	25	2750	140 × 140 × 190	0,8
Центробежный Ц13-69	1500	600	АОЛ-2-22-4	1500	1450	605 × 612 × 610	78
Центробежный »	100	150	ДАТ-100	100	8000	129 × 165 × 75	1,6
»	60	120	ОД-7А	7	7000	120 × 120 × 75	0,5
Осевой	2200	240	АОЛП-12-10	270	4600	270 × 270 × 278	6,7

Для снижения температуры использованы трубы водяного охлаждения.

В тех случаях, когда необходимо интенсифицировать теплоотвод при одновременном снижении уровня шума, используют жидкостные конвективные системы охлаждения. Ввиду того, что жидкий хладагент имеет более высокий коэффициент теплоотдачи α (из-за большой удельной теплоемкости и плотности), его скорость (а следовательно, и шум) может быть снижена. Однако поглощение выделяемой теплоты окружающей средой требует, как правило, применения (рис. 3.12) жидкостно-воздушных теплообменников, создающих шум, но расположенных вне охлаждаемого объекта. Уровень шума можно уменьшить используя теплообменники типа жидкость-жидкость (например, поглощать энергию за счет нагрева заборной или водопроводной воды).

Жидкостные СОТР являются сложными системами, что обуславливает их высокую стоимость при изготовлении и эксплуатации. Тем не менее эти системы широко используют в бортовых

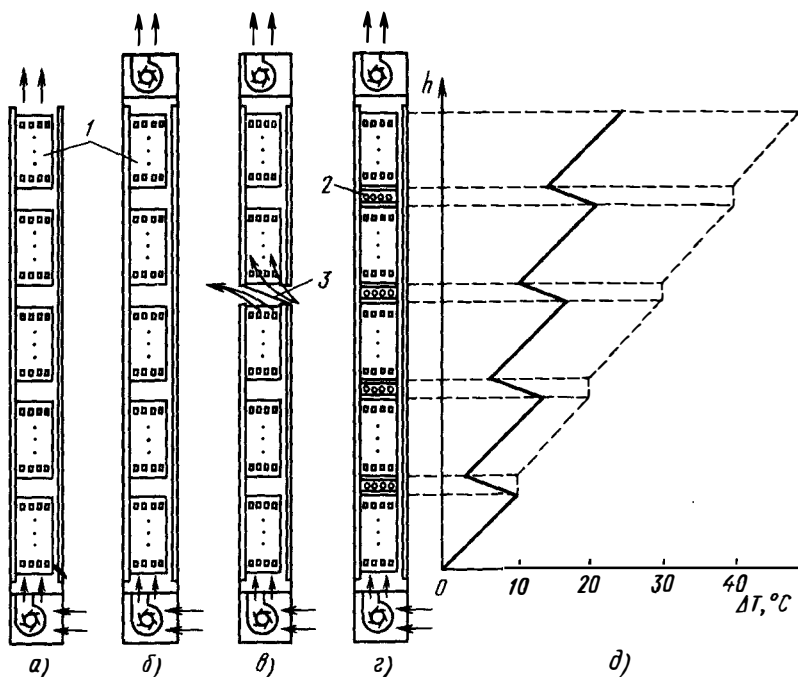


Рис. 3.11. Варианты различных принудительных систем воздушного охлаждения стационарных РЭС:

1 — ячейка; 2 — трубы водяного охлаждения; 3 — наклонная перегородка

Основные параметры жидкостей, используемых в испарительных СОТР (при нормальном давлении)

Жидкость	Температура, С		Теплота парообразования, кДж/кг	Плотность, кг/м ³
	кипения	плавления		
Вода	+ 100	0	2259	1000
Этиловый спирт	+ 78	- 115	860	790
Аммиак	- 33	- 78	1370	683
Углекислота	- 79	- 57	575	1155
Фреон-142	- 10	- 130	224	1205
Фреон-12	- 30	- 155	170	1394
Фреон-22	- 85	- 160	234	1285
Фреон-14	- 128	- 184	143,5	1960
Этиленгликоль	+ 197	- 12	—	—

РЭС, так как удельная масса лучших самолетных жидкостных СОТР составляет 9...11 кг на киловатт отводимой мощности. Обычно жидкостные СОТР разрабатывают и поставляют специализированные субподрядные организации. Хладагент в жидкостных системах может быть изолированным от охлаждаемых элементов и транспортироваться с помощью трубопроводов (рис. 3.12) либо непосредственно омывать охлаждаемые элементы (рис. 3.13). Охлаждающая жидкость, в которую погружаются элементы (например, генераторные лампы), должна обладать рядом свойств: химической инертностью по отношению к металлам и диэлектрикам (примерно такой же, как сжиженные инертные газы); небольшой и сравнительно стабильной во всем температурном диапазоне диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 1,6...1,9$); небольшими потерями ($\text{tg } \delta < 2 \cdot 10^{-3}$) в диапазоне частот до 500 МГц; высокой электрической прочностью (до 200 кВ/см) при температурах кипения, не ухудшающейся после многократных электрических пробоев; теплофизическими свойствами, лучшими, чем у трансформаторного масла и кремнийорганических жидкостей. Этим требованиям в наибольшей степени сегодня удовлетворяют (табл. 3.6) фторорганические жидкости (фреоны). Кроме того, фреоны позволяют осуществить теплоотвод при сравнительно низких температурах (из-за низкой температуры кипения). Однако в будущем производство и применение фреона будет ограничено по экологическим соображениям. В системах с изолированным жидким теплоносителем используют воду, аммиак и др., иногда в качестве хладагента применяют этиленгликоль. Эти жидкости могут быть использованы и для испарительно-конденсационных систем.

При разработке жидкостных систем следует учитывать, что причинами коррозии компонентов СОТР могут быть электрохи-

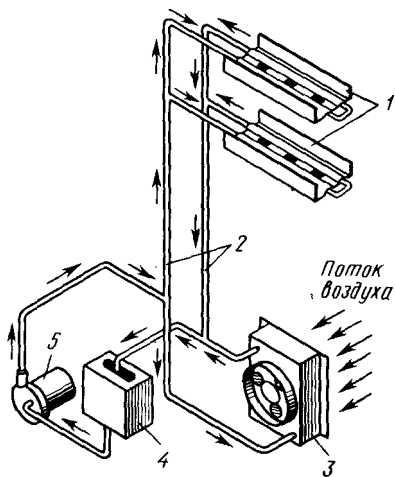


Рис. 3.12. Система жидкостного охлаждения оснований двух блоков:

1—охлаждаемые основания; 2—система трубопроводов; 3—воздушно-жидкостный радиатор с вентилятором; 4—бак-накопитель жидкости и компенсатор температурных расширений; 5—насос

мическая активность, высокая температура, органические и механические примеси, рентгеновское излучение. Поэтому для исключения коррозии следует избегать использования материалов, далеко отстоящих друг от друга в ряду активности. Нежелательно применять резины, особенно в системах, использующих в качестве теплоносителя смеси этиленгликоля с дистиллированной водой. Шланги, в том числе и гибкие, следует выполнять из полиэтилена, а трубопроводы — из нержавеющей стали. Для уменьшения передачи вибрации применяют металлические сильфонные шланги. Использование шлангов, имеющих разъемы с автоматическими клапанами, исключающими вытекание жидкости при разборке, позволяет улучшить ремонтпригодность жидкостной СОТР (возможен ремонт без слива жидкости).

Общим достоинством жидкостных и испарительных систем является постоянство температуры охлаждающей среды. Однако если температура превышает некоторое критическое значение, то у стенки образуется сплошная пленка пара и эффективность теплоотвода падает. Теплоотвод ухудшается и при наличии ламинарной пленки при течении теплоносителя. Применение

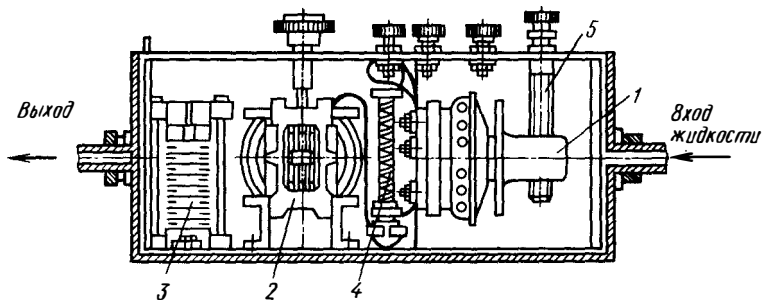


Рис. 3.13. Конструкция экспериментального высокочастотного блока, собранного на лампе ГУ-27А:

1—лампа; 2—шаровой вариометр; 3—конденсатор постоянной емкости для связи с антенной; 4—анодный дроссель; 5—сеточный дроссель

различных систем конвекционного теплоотвода иллюстрирует диаграмма, представленная на рис. 3.14, где по оси ординат отложен перегрев ΔT поверхности элемента относительно окружающей среды, по оси абсцисс — плотность теплового потока g . Верхнюю часть диаграммы используют для выбора системы охлаждения крупных элементов — мощных ламп, магнитов, дросселей и т. д., нижнюю — для выбора системы охлаждения блоков и стоек микроселектронной аппаратуры.

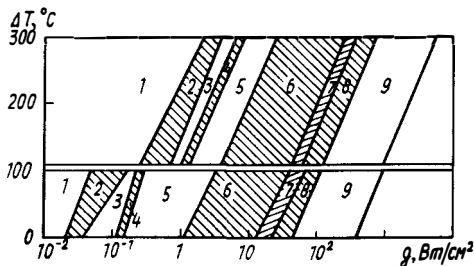


Рис. 3.14. Применение способов конвективного охлаждения в зависимости от плотности теплового потока и перегрева:

1 — свободное воздушное; 2 — свободное и принудительное воздушное; 3 — принудительное воздушное; 4 — принудительное воздушное и жидкостное; 5 — принудительное испарительное; 6 — принудительное жидкостное и свободное испарительное; 7 — принудительное жидкостное, принудительное и свободное испарительное; 8 — принудительное жидкостное и свободное испарительное; 9 — свободное и принудительное испарительное

§ 3.4. Теплоотвод тепловыми трубами

Одной из наиболее эффективных испарительно-конденсационных систем являются теплопроводящие устройства, называемые тепловыми трубами и работающие по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла, основанного на испарении жидкости в зоне подвода теплоты, передаче теплоты с потоком пара, конденсации пара в зоне отвода теплоты и возвращении жидкости в зону подвода теплоты за счет капиллярных или гравитационных сил. Тепловая труба (рис. 3.15) представляет замкнутую вакуумированную камеру, внутренняя поверхность которой облицована капиллярной структурой («фитилем»), заполненной конденсатом рабочей жидкости.

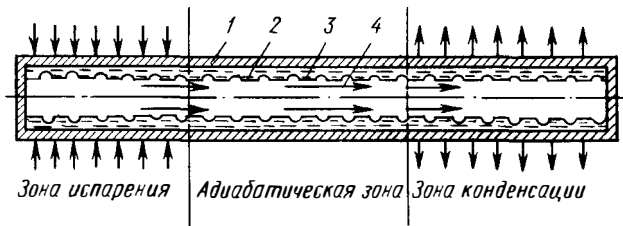


Рис. 3.15. Схема цилиндрической тепловой трубы: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — жидкость в фитиле; 4 — поток пара

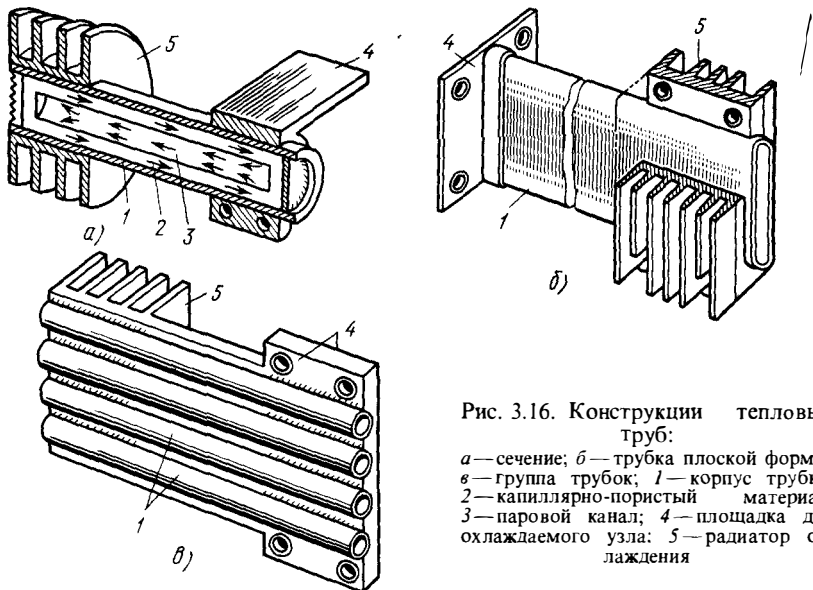


Рис. 3.16. Конструкции тепловых труб:

a — сечение; *б* — трубка плоской формы; *в* — группа трубок; 1 — корпус трубки; 2 — капиллярно-пористый материал; 3 — паровой канал; 4 — площадка для охлаждаемого узла; 5 — радиатор охлаждения

Тепловые трубы могут использоваться при температурах от -273 до $+2700$ °С, что обуславливает разнообразие их конструкции. Кроме того, тепловые трубы могут являться частью конструкции узлов РЭС. Они обладают высокой изотермичностью, работоспособностью в невесомости, большим сроком службы (16000 ч для труб на воде), малой массой, высоким КПД (около 90%). Недостатком тепловых труб является сложность воспроизведения их параметров.

Примеры конструкции тепловых труб представлены на рис. 3.16—3.18. Гибкая тепловая труба (рис. 3.17) служит для охлаждения

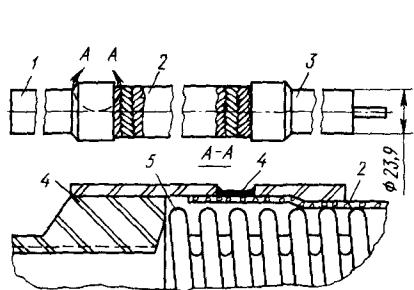


Рис. 3.17. Гибкая криогенная тепловая труба для ИСЗ:

1 — конденсатор (16 см); 2 — гибкая секция (92,4 см); 3 — испаритель (16 см); 4 — пайка; 5 — сифлон

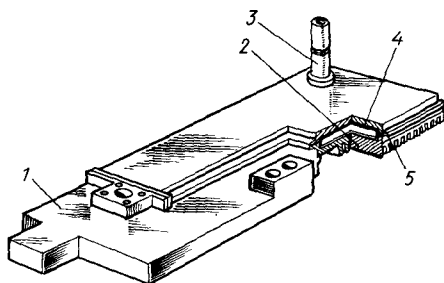


Рис. 3.18. Корпус узла РЭС с тепловой трубой:

1 — корпус РЭС; 2 — радиатор; 3 — отключающий штенгель; 4 — фитиль; 5 — место лайки двух половин корпуса тепловой трубы

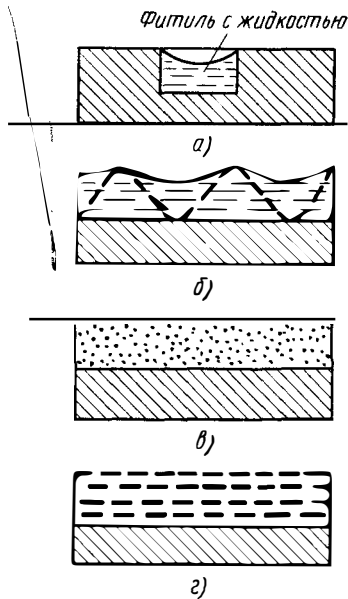


Рис. 3.19. Структура простых фитилей тепловых труб:

а) стенка с продольными канавками;
 б) — уложенная вдоль стенки гофрированная сетка; в) пористая структура;
 г) многослойная сетчатая структура

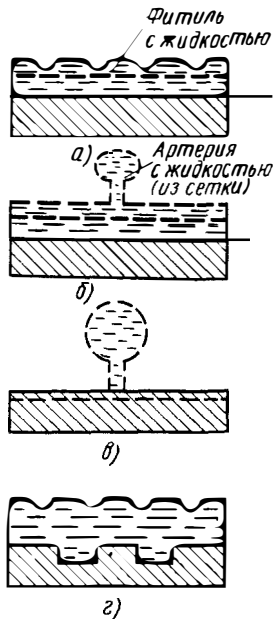


Рис. 3.20. Составные фитили тепловых труб:

а) перфорированный экран и сетка;
 б) многослойная сетка с подпитывающей артерией; в) — резьба на стенке трубки и подпитывающая артерия; г) — канавки на стенке трубки и сетка

датчиков инфракрасного излучения до температуры -173°C на искусственном спутнике Земли; допускается ее изгиб с радиусом $0,23\text{ м}$; мощность 20 Вт , масса $1,15\text{ кг}$. Конструкция в виде корпуса со встроенной плоской тепловой трубой (рис. 3.18) обеспечивает его хорошую изотермичность.

Важнейшим элементом тепловых труб является фитиль (рис. 3.19, 3.20), изготавливаемый различными способами. Для тепловых труб РЭС наибольшее применение нашли фитили из металлической сетки (однослойной, многослойной). Размер пор фитиля зависит от типа теплоносителя, например для воды он составляет $30\text{...}70\text{ мкм}$. Некоторые характеристики тепловых труб приведены в табл. 3.7.

§ 3.5. Теплоотвод теплопроводностью

Теплопроводность — молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный разностью температур. В РЭС широко используется теплопроводность твердых тел (несущих конструкций). Блоки РЭС (особенно бортовые) имеют высокий коэффи-

Характеристики тепловых труб

Тип трубы	Теплоноситель	Диапазон температур, °C	Плотность теплового потока		Материал корпуса и фитиля
			в осевом направлении, кВт/см ²	на поверхности, Вт/см ²	
Криогенная	Гелий, аргон, криптон, азот, кислород, этан, фреоны	-273...-73	—	—	Никель, алюминий, нержавеющая сталь 12ХН9Т
		-200...-76	0,01	—	
Низкотемпературная	Азот Фреоны, аммиак, спирты, ацетон, вода, органические соединения	-73...+777	0,1...0,7	3...15	Медь, никель, нержавеющая сталь 12ХН9Т, керамика
		-70...+60	0,1...0,3	0,3...3	
		-45...+120	0,45	7,5...10	
		+5...+230	0,67	14,8	

цент заполнения объема и весьма малые внутренние каналы для передачи теплоты конвекцией.

Для планарной конструкции передача теплоты с помощью теплопроводности подчиняющаяся обобщенному закону Фурье, может быть описана линейным уравнением $P_T = K_T S \Delta T$, где P_T — тепловой поток, передаваемый с помощью теплопроводности, Вт; K_T — тепловая проводимость; для плоской стенки $K_T = \lambda / \delta$, Вт/(м²·К); δ — толщина элемента конструкции стенки, через которую проходит тепловой поток (длина теплоотводящей шины), м; λ — коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К); S — площадь поперечного сечения теплового потока, м²; ΔT — перепад температур между двумя сторонами стенки, К. Величина, обратная K_T , называется *тепловым сопротивлением* (м²·К/Вт): $R_T = 1/K_T = \delta/\lambda$. Коэффициенты теплопроводности различных материалов приведены в табл. 3.8. Если стенка многослойная и плоская, то полное тепловое сопротивление теплопроводности $R_{T\Sigma} = \sum_{i=1}^n \delta_i/\lambda_i = \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n$, а *тепловая проводимость* $K_{T\Sigma} = 1/R_{T\Sigma} = (\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n)^{-1}$.

Если тепловой контакт с наружных сторон тонкостенной конструкции осуществляется с помощью конвекции, то в расчетах вместо тепловой проводимости K_T используют *коэффициент теплопередачи* $K_{Тп} = (1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n + 1/\alpha_2)^{-1}$, где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи конвекцией с одной и второй стороны, Вт/(м²·К). При построении тепловой схемы устройства используется величина, *называемая удельным теп-*

Коэффициент теплопроводности λ некоторых материалов

Материал	λ , Вт/(м·К)	Материал	λ , Вт/(м·К)
Газы	0,01	Сплав 12Х12Н10Т	14...33
Воздух	0,023...0,027	Ковар Н29К18	15...21
Стеклянная вата	0,051...0,059	Поликор (99,7% Al_2O_3)	25,1...42
Пенопласты	0,03...0,06	Сталь	45...92
Жидкости	0,09...0,5	Германий	58
	(вода 0,6)	Бронза	64...88
Полихлорвиниловая пленка	0,12	Олово	34...67
Резина	0,11...0,16	Никель	60...95
Эпоксидная смола	0,1...0,2	Кремний	83...105
Парафин	0,27	Латунь Л63	86
Слюда	0,43...0,6	Свинец	35...92
Стеклотекстолит	0,34...0,74	Алюминиевые сплавы:	
Пластмасса ЭФП-63	0,7	дюралюминий	160...180
Клей ВК-9	0,7...0,8	сплав АЛ2	175
Паста КРТ-8	0,7...0,8	Бериллиевая керамика	60...209
		Брокерит (Be_2O_4)	217
Стекло С48-1	1,2...1,5	Золото	293...297
Ситалл	1,2...4,0	Медь	259...400
Керамика 22ХС	20...30	Серебро	416...425
Титановый сплав	14...16		

ловым сопротивлением (К/Вт): $R = R_r/S = \delta/(\lambda S)$, где S — площадь сечения, через которое распространяется тепловой поток. Удельное тепловое сопротивление характеризует, например, тепловые параметры корпуса ИС. Так, для керамических корпусов $R = 30...40$ К/Вт, для пластмассовых $55...60$ К/Вт, т. е. перепад температур для пластмассовых корпусов при одной и той же мощности ИС в два раза выше.

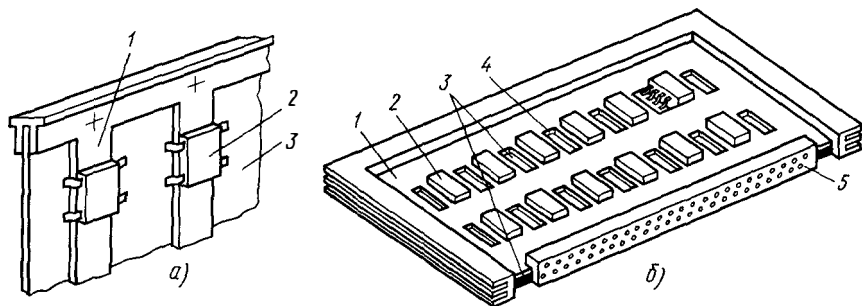


Рис. 3.21. Охлаждение ИС с помощью теплоотводящих шин:

а — ячейка с шинами-тепlostоками и торцевой накладкой; б — ячейка со сплошным теплоотводом и периферийным радиатором; 1 — элементы теплоотвода; 2 — ИС; 3 — печатная плата; 4 — окна в теплоотводящей шине; 5 — розетка соединителя

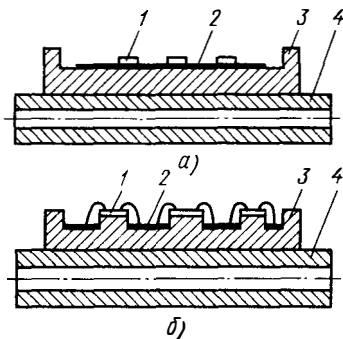


Рис. 3.22. Отвод теплоты от бескорпусных компонентов, установленных на плату (а) и выступы основания (б):

1 — компонент; 2 — полиимидная плата; 3 — основание из алюминия; 4 — охлаждаемая жидкостью плита

В ряде случаев для построения тепловой схемы необходимо знать контактное тепловое сопротивление $R_{т\text{кн}}$. Его значение зависит от сочетания материалов в тепловом контакте, удельной нагрузки, шероховатости поверхности контактной пары. Для удельной нагрузки 1000 Н/см^2 и шероховатости $Rz 20$ контактное тепловое сопротивление ($\text{см}^2 \cdot \text{К/Вт}$) некоторых пар равно: медь — алюминий — 0,08; медь — медь — 0,1; медь — латунь — 0,18; медь — сплав Д16 — 0,2; сплав Д16 — сплав Д16 — 0,25; сталь — медь — 0,8; сталь — сплав Д16 — 1,2; сталь — сталь — 2,5; металл — краска — металл — 20,0. Тепловое сопротивление контакта (К/Вт) определяется по формуле $R_{к} = R_{т\text{кн}} / S$.

Для улучшения теплоотвода в конструкции РЭС используются материалы с *высокой теплопроводностью* (поликор, керамика 22ХС, оксид бериллия, медь, алюминий, теплопроводящий клей ЭТК-21 с наполнителем из нитрида бора), а также по возможности принимаются меры для исключения воздушных зазоров в местах тепловых контактов (например, с помощью паст типа КПТ-8 или клея ЭТК-21), уменьшения шероховатости поверхности (уменьшения микронеровностей), увеличения площади теплового контакта, увеличения контактного усилия.

Теплоотвод от компонентов, установленных на печатных платах, осуществляется с помощью теплоотводящих шин, которые располагают непосредственно под корпусами ИС (рис. 3.21, а).

В ряде случаев ИС в пластмассовом корпусе содержат встроенные теплоотводящие шины (см. рис. 1.18), которые могут присоединяться к шинам на плате или к корпусу РЭС (через шины).

Шины на плате могут выполняться вместе с рамкой (рис. 3.21, б). Радиаторы, расположенные по краю платы, могут сами рассеивать теплоту или служить теплосоединителями, передающими теплоту к охлаждаемому жидкостью корпусу радиоэлектронного средства.

Бескорпусные компоненты могут устанавливаться на тонкие основания из полиимидной пленки (рис. 3.22, а) или непосредственно на выступы основания (рис. 3.22, б), проходящие через отверстия в платах. Теплоотводящие шины через рамку ячейки или корпус блока соединяют с теплостоком, который может представлять собой тепловые трубы или основание, охлаждаемое жидкостью.

§ 3.6. Теплоотвод излучением

Теплообмен излучением возможен в теплопрозрачных, т. е. пропускающих теплоту, средах (газах, вакууме). В жидкости он практически отсутствует. При излучении тепловая энергия переносится электромагнитными волнами. Количество энергии, отводимой излучением, пропорционально четвертой степени температуры тела. Уровень рабочих температур для большинства компонентов и узлов РЭС невелик, поэтому часто переносом теплоты излучением (при наличии отвода теплоты конвекцией или теплопроводностью) можно пренебречь. Однако для вакуума (космоса) этим способом теплоотвода пренебречь нельзя, хотя плотность теплового потока не превышает $0,001 \dots 0,005 \text{ Вт/см}^2$.

Количество теплоты, отводимой от блока с помощью излучения в неограниченное пространство, $P_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} S \Delta T$, где $P_{\text{л}}$ — излучаемая тепловая мощность, Вт; S — площадь излучающей поверхности, м^2 ; $\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \varphi f(T_1, T_2)$, — коэффициент лучеиспускания, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; ΔT — перегрев поверхности лучеиспускания относительно окружающей температуры, К; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент черноты поверхности пары тел, являющийся функцией степени черноты ε_1 и ε_2 взаимодействующих поверхностей (табл. 3.9); для теплообмена между неограниченными плоскопараллельными поверхностями приведенная степень черноты $\varepsilon_{\text{пр}1,2} = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$ при $\varphi = 1$; для РЭС в микроэлектронном исполнении принимают $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,8$; φ — коэффициент облучения (взаимной облученности) соседних компонентов, обычно $\varphi = 1$; $f(T_1, T_2)$ — функция температуры одиночного блока, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, нагретого до температуры t_1 и находящегося в среде с температурой t_2 , определяется по табл. 3.10.

Таблица 3.9

Коэффициент черноты ε некоторых тел

Материал и состояние поверхности тела	T, К	ε	Материал и состояние поверхности тела	T, К	ε
Алюминий полированный	323...773	0,04...0,06	Лак черный	313...373	0,96...0,98
Алюминий сильно окисленный	323...773	0,2...0,3	Муар серый, черный	293	0,89...0,90
Дюралюминий Д16	323...623	0,37...0,41	Краска алюминиевая	373	0,28
Медь шлифованная	293	0,03	Картон, бумага, ткань	293...573	0,93
Краски эмалевые	293...373	0,92			

Значения функции $f(T_1, T_2) = 5,67 \cdot 10^{-8} (T_1^4 - T_2^4) / (T_1 - T_2)$

$T_1, \text{ }^\circ\text{C}$	Температура $T_2, \text{ }^\circ\text{C}$									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
15	5,32									
20	5,45	5,59								
25	5,59	5,76	5,90							
30	5,76	5,90	6,05	6,20						
35	5,90	6,05	6,20	6,35	6,51					
40	6,06	6,20	6,35	6,51	6,60	6,82				
45	6,20	6,35	6,51	6,60	6,83	7,00	7,14			
50	6,35	6,51	6,60	6,83	7,00	7,17	7,35	7,50		
60	6,70	6,87	7,04	7,19	7,35	7,51	7,69	7,87	8,05	
70	7,06	7,21	7,39	7,55	7,72	7,86	8,05	8,24	8,42	8,80
80	7,44	7,59	7,75	7,80	8,07	8,26	8,45	8,65	8,83	9,20
90	7,82	7,98	8,13	8,31	8,49	8,67	8,86	9,04	9,25	9,65
100	8,19	8,37	8,53	8,72	8,91	9,09	9,28	9,46	9,66	10,08

Примечание. T_1 — температура аппаратуры; T_2 — температура окружающей среды.

Для увеличения интенсивности теплоотода излучением можно увеличить площадь излучения (например, заменяя перфорацию на корпусе блока на жалюзи), степень черноты поверхности (например, радиатора) или температуру поверхности излучающих компонентов (это ограничено термостойкостью компонентов РЭС).

§ 3.7. Теплоотвод с использованием термоэлектрического эффекта

Термоэлектрический эффект открыл в 1834 г. французский физик Ж.Ш.А.Пельтье; в 30-е годы нашего столетия советский ученый А.Ф.Иоффе предложил использовать его для построения термобатарей путем последовательного соединения полупроводников p - и n -типа (рис. 3.23). При протекании через элемент тока I на холодном спае за единицу времени поглощается теплота $Q_x = Q_{\text{пс}} - Q_{\text{дж}} - Q_\lambda$, где $Q_{\text{пс}} = \alpha_T I T_x$ — тепло Пельтье; α_T — коэффициент Зеебека (коэффициент термоЭДС); T_x — температура холодного спае; $Q_{\text{дж}} = I^2 R / 2$ — джоулева теплота, выделяющаяся на сопротивлении элемента R ; $Q_\lambda = (\lambda / \delta) S \Delta T$ — теплота, передающаяся от горячего спае к холодному за счет теплопроводности.

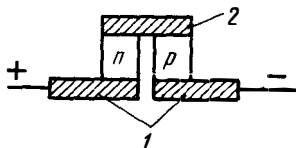


Рис. 3.23. Звено термобатареи:
1 — токоподводы; 2 — перемычка

Термобатарея может осуществлять как охлаждение, так и нагрев, что особенно важно при работе в режиме активного

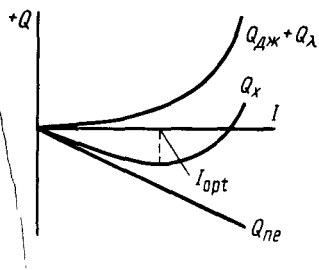


Рис. 3.24. Зависимость джоулевой теплоты $Q_{дж}$, теплоты Пельтье $Q_{пе}$ и теплоты Q_{λ} , передаваемой теплопроводностью, выделяющихся на холодном спае термобатареи от тока I

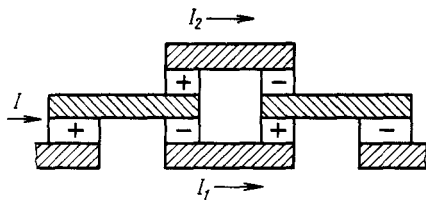


Рис. 3.25. Двухкаскадная термобатарея

термостатирования (для этого необходимо изменить направление тока). Для поддержания низкой температуры одного из концов термобатареи необходимо поддерживать заданную температуру другого (горячего) конца, охлаждая его (например, за счет конвекции). Зависимость выделяемой в термоэлементе теплоты от протекающего по нему тока представлена на рис. 3.24. При некотором значении тока I_{opt} имеет место максимальное понижение температуры холодного спае. Если ток существенно больше I_{opt} , то эффект охлаждения может вообще исчезнуть из-за возрастания джоулевой теплоты.

Для повышения эффективности охлаждения применяют двухкаскадные батареи (рис. 3.25). Использование многокаскадных батарей позволяет снижать температуру до 70 К. В многокаскадных батареях каскады могут соединяться последовательно или параллельно. Лучшими материалами для элементов каскадов являются твердые растворы на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3) с легирующими добавками. Для различных диапазонов температур, в которых работают термоэлементы многокаскадной батареи, используют растворы различного состава (табл. 3.11). На рис. 3.26 приведен общий вид однокаскадной термобатареи, а на рис. 3.27 — перепад температуры по каскадам и массы термобатареи в зависимости от числа каскадов N . При снижении температуры на 150 К холодопроизводительность термобатареи не превышает 1 Вт; при холодопроизводительности более 300 Вт применение термобатареи вообще нецелесообразно ввиду их низкого КПД и большой массы (15...90 г/Вт) по сравнению с жидкостной самолетной системой охлаждения (9...11 г/Вт). Жидкостные системы на холодопроизводительность в несколько единиц или десятков ватт отсутствуют.

Зависимость оптимальных параметров материала элементов термобатарей от температуры каскада

Рабочий интервал температур, °С	Тип проводимости элемента	Параметры материала при 27° С	
		σ , См/см	$e \cdot 10^{-6}$, В/К
-43...+57	<i>p</i>	1000 ± 100	210 ± 10
	<i>n</i>	900 ± 100	210 ± 10
-103...-27	<i>p</i>	800 ± 100	225 ± 10
	<i>n</i>	700 ± 100	230 ± 10
-123...-73	<i>p</i>	650 ± 50	235 ± 5
	<i>n</i>	550 ± 50	245 ± 5
		или	или
		7200 ± 100*	90 ± 5*

*Параметры исходного материала $\text{Bi}_{0,95}\text{Sb}_{0,05}$.

Примечания: 1. Состав шихты и количество легирующих добавок *p*-типа проводимости: $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3 + 4\%$ (вес.), $\text{Te} + 0...1\%$ (вес.), Se в твердом растворе (26 мол. % Bi_2Te_3 и 74 мол. % Sb_2Te_3); *n*-типа проводимости: $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3} + 0,09...0,03\%$ (вес.), CdCl_2 в твердом растворе (4 мол. % Bi_2Te_3 и 96 мол. % Bi_2Se_3).

2. e — коэффициент термоЭДС.

На рис. 3.28 приведено распределение температуры по каскадам пятикаскадной термобатареи с холодопроизводительностью 1 Вт, потребляемая мощность составляет 240 Вт, рабочий ток 300 А. К недостаткам термобатарей следует отнести: низкий КПД (30% для однокаскадной батареи; 12% для двухкаскадной, 3% для трехкаскадной и 0,013% для десятикаскадной); большую массу; сравнительно небольшую механическую прочность (если элементы соединены только с помощью медных шин); довольно

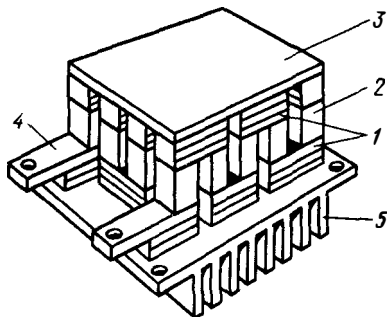


Рис. 3.26. Конструкция термоэлектрической батареи:
1 — теплопереходы; 2 — термоэлементы;
3 — «холодная» площадка; 4 — токоподводы; 5 — радиатор

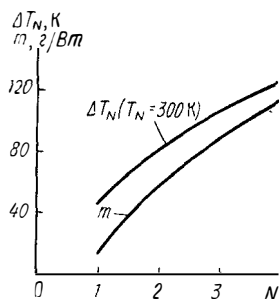


Рис. 3.27. Зависимость перепада температуры ΔT_N и удельной массы m от числа каскадов N термобатареи

большую постоянную времени. Плотность теплового потока через термобатареи не должна превышать 10 Вт/см^2 . Одним из важнейших преимуществ термобатарей является возможность получения температуры ниже температуры окружающей среды. Это позволяет применять термобатареи, например, для снижения темнового тока в чувствительных элементах передающих телевизионных трубок на приборах с зарядовой связью.

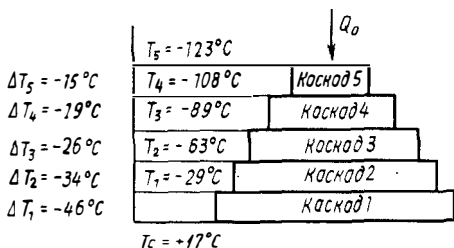


Рис. 3.28. Распределение температуры по каскадам пятикаскадной термобатареи холодопроизводительностью $Q_0 = 1 \text{ Вт}$ относительно температуры окружающей среды

§ 3.8. Способы поглощения теплоты. Технологичность конструкции СОТР

На параметры СОТР в значительной степени влияют используемые способы поглощения теплоты, которые основаны на способности к теплоаккумуляции окружающей среды и материалов конструкции, а также на использовании термоэлектрического эффекта. При теплоаккумуляции происходит нагрев окружающей среды или конструкции, могут произойти фазовые превращения в материалах конструкции (плавление, испарение). Количество теплоты (кал), которое может поглотить среда или материал конструкции при нагреве, определяется соотношением $Q = mC_p\Delta T$, где C_p — удельная теплоемкость материала среды или конструкции, ккал/(г·К); m — масса среды или конструкции, г; ΔT — перегрев среды или конструкции по отношению к начальной температуре, °С. Если нагреву подвергается окружающая среда (воздух, вода), массу которой можно считать практически бесконечной, то количество поглощаемой теплоты также бесконечно.

Для примера определим перегрев алюминиевого корпуса массой 570 г, в котором в течение 180 с выделяется мощность 40 Вт. Удельная теплоемкость алюминия $0,22 \text{ ккал/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$. Учитывая, что $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 0,24 \text{ ккал}$, получаем $\Delta T = 40 \cdot 180 \cdot 0,24 / (570 \cdot 0,22) = 13,76^\circ\text{C}$.

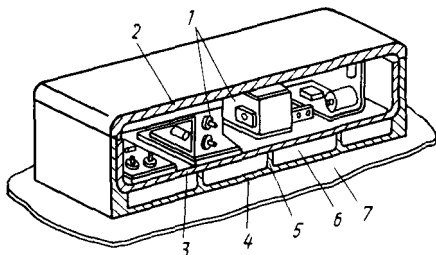


Рис. 3.29. Общий вид блока, охлаждаемого с помощью плавящегося вещества: 1 — блок; 2 — кожух; 3 — плата из оксида бериллия; 4 — основание; 5 — ребра; 6 — емкость с плавящимся веществом; 7 — основание

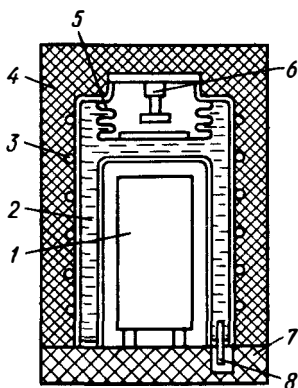


Рис. 3.30. Конструкция термостата:

1 — термостатируемый объем с РЭС; 2 — плавящееся вещество; 3 — обмотка обогрева; 4 — изоляция; 5 — сильфон; 6 — микровыключатель; 7 — крышка; 8 — заправочная трубка

но требуется обеспечить хороший тепловой контакт компонента с контейнером, содержащим плавящееся вещество. Иногда плавящиеся вещества используют для построения активного термостата (рис. 3.30).

Если тепловая энергия, выделяемая в РЭС, поглощается внешней средой (газом или жидкостью) и расходуется только

В тех случаях, когда РЭС работает в режиме повторно-кратковременных включений, для поглощения теплоты могут быть использованы вещества, обладающие относительно большой теплотой обратимых фазовых превращений (табл. 3.12). Во время работы теплота поглощается за счет скрытой удельной теплоты плавления вещества $L_{пл}$, а после отключения происходит остывание и затвердевание вещества (по истечении достаточного времени). Наиболее распространены два способа взаимного расположения охлаждаемых элементов РЭС и плавящихся веществ: 1) компоненты находятся вне объема с плавящимся веществом (рис. 3.29), в этом случае при ремонте не требуется удаления вещества; 2) компоненты находятся внутри плавящегося вещества, в этом случае ремонт затруднен, но условия теплоотвода лучше. Первый способ применяют чаще,

Таблица 3.12

Характеристики некоторых плавящихся веществ, предназначенных для охлаждения РЭС, работающих в режиме кратковременно-повторных включений

Вещество	Химическая формула, состав	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, $L_{пл} \cdot 10^{-3}$, Дж/кг
Парафин	$C_n H_{2n+2}$	40...56	156
Кислота:			
элаидиновая	$C_{18} H_{34} O_2$	45	214
лауриновая	$C_{12} H_{24} O_2$	44	180
Кристаллический азотнокислый никель	$(NiNO_3)_2 \cdot 6H_2O$	56,7	155
Дифенил	$C_6 H_5$	69,5	120
Нафталин	$C_{10} H_8$	79,5	157
Сплав Вуда	Bi — 50%; Cd — 12,5%; Sn — 12,5; Pb — 25%	65	35

на изменение теплосодержания среды (без фазовых превращений), то отводимая на нагрев мощность (Вт) $P_{\text{нагр}} = C_p \gamma G_V (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})$, где C_p — удельная теплоемкость хладагента, Дж/(кг·К); γ — его плотность, кг/м³; G_V — объемный расход газа или жидкости, м³/с; $T_{\text{вых}}$ и $T_{\text{вх}}$ — средняя температура хладагента на входе и выходе системы. Если не только изменяется теплосодержание, но и происходят фазовые изменения, то необходимо учитывать дополнительные затраты теплоты (кал): $Q_{\text{пл}} = m_{\text{пл}} L_{\text{пл}}$; $Q_{\text{исп}} = m_{\text{исп}} L_{\text{исп}}$, где $m_{\text{пл}}$ и $m_{\text{исп}}$ — масса плавящегося и испаряющегося вещества соответственно, г; $L_{\text{пл}}$ и $L_{\text{исп}}$ — удельная теплота плавления и испарения соответственно, кал/г. Зная время плавления или испарения, можно определить затрачиваемую дополнительную мощность $P_{\text{пл}}$ или $P_{\text{исп}}$.

Технологичность теплонапряженной РЭС с СОТР сильно зависит от технологичности СОТР, которая обеспечивается максимально простой конструкцией СОТР, ее отработанностью в производстве, недефицитностью покупных узлов. При обеспечении теплового режима с использованием конвекции наиболее технологичной является система естественной воздушной конвекции, менее технологичны принудительная воздушная, жидкостная и испарительная. Наиболее технологичным способом кондуктивного теплоотвода является заполнение воздушных зазоров более теплопроводными материалами (клеем, компаундом, прокладкой из слюды и т. д.). Менее технологично использование тепловых шин и тепловых труб. При изготовлении тепловых труб применяют такие операции, как вакуумирование, заполнение теплоносителем, герметизация. Эти операции усложняются, если корпус тепловой трубы одновременно является частью несущей конструкции РЭС. Ввиду сложности изготовления компоненты системы термоэлектрического и жидкостного охлаждения чаще всего приобретаются по кооперации, что требует учета степени их освоенности и дефицитности.

При выборе СОТР без использования систем автоматизированного проектирования предварительная их оценка может быть осуществлена по диаграмме, представленной на рис. 3.14. Для этого необходимо определить условную поверхность охлаждаемой аппаратуры по формуле $S = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2) l_3 K_3]$, где l_1 , l_2 , l_3 — габаритные размеры аппаратуры, м; K_3 — коэффициент заполнения, определяемый отношением суммарного объема элементов к полному объему РЭС. Затем вычисляется удельная тепловая мощность $g = P/S$, где P — в Вт; S — в м². Откладывая по оси ординат допустимый перегрев, а по оси абсцисс — g , можно определить область, соответствующую тому или иному способу теплоотвода. Далее производится разработка конструкции РЭС и СОТР, составляется тепловая модель (определяются наиболее значимые способы теплоотвода для различных уровней иерархии), составляется тепловая схема РЭС и отдельных узлов (тепловые

сопротивления элементов конструкции), рассчитывается температура компонентов и узлов. Критерием правильности выбора СОТР является отсутствие перегревов в конструкции. При расчете используются отраслевые нормативные и руководящие технические материалы.

При выборе типа СОТР с использованием систем автоматизированного проектирования, например системы ПРАМ-9, в ЭВМ вводятся сведения об используемых уровнях разукрупнения РЭС, мощности и размещении источников теплоты; система выбирает способ охлаждения и определяет температуру всех компонентов с выдачей результатов в виде карты тепловых режимов компонентов и узлов, таблицы перегретых элементов (если они имеются).

Вопросы для самоконтроля

1. Чем характеризуется тепловой режим РЭС?
2. Как влияет тепловой режим на качество РЭС?
3. Что такое нормальный тепловой режим РЭС?
4. Когда в РЭС имеет место нестационарный тепловой режим?
5. Назовите причины тепловых внезапных отказов.
6. Назовите причины тепловых параметрических отказов.
7. Что такое СОТР?
8. Какие Вам известны виды СОТР?
9. В каких случаях целесообразно применять термостатирующие устройства?
10. Назовите способы передачи теплоты.
11. Что такое конвективный теплообмен? Когда он применяется?
12. Что такое «тепловые трубы»? Когда они применяются?
13. Что такое теплообмен теплопроводностью? Какова его применимость?
14. Что такое теплообмен излучением? Какова его применимость?
15. Назовите преимущества и недостатки термобатарей.
16. Назовите известные способы поглощения теплоты. В каких случаях они применяются?
17. Как выбрать тип СОТР на начальных этапах конструирования?

ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАГИ

§ 4.1. Влияние влаги на эффективность и качество конструкций РЭС

Источники и пути проникновения влаги в РЭС. В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС могут подвергаться воздействию влаги, содержащейся в окружающем пространстве, внутренней среде гермоблоков, материалах конструкции, а также в используемых при изготовлении РЭС материалах (электролитах, травителях, моющих средствах). Максимально возможное содержание влаги в воздухе зависит от температуры и давления. При нормальном давлении (750 мм. рт. ст. = 0,1 МПа) зависимость содержания влаги в воздухе от температуры представлена на рис. 4.1. При снижении температуры влажного воздуха ниже уровня, соответствующего максимально возможному содержанию влаги (точке росы), избыток влаги выпадает в виде конденсата (росы).

Наличие влаги во внутренней среде гермокорпуса РЭС обусловлено следующими причинами: 1) проникновением ее через

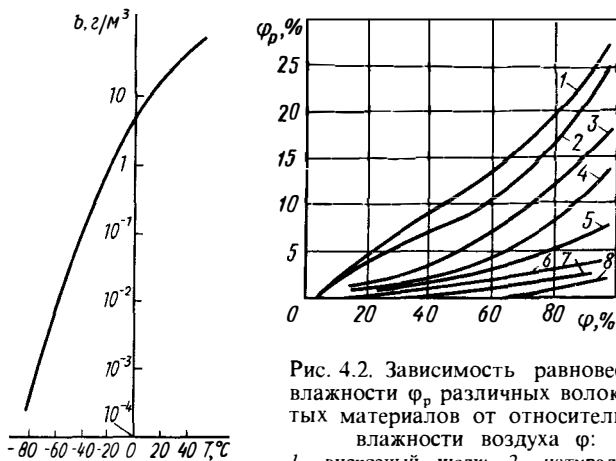


Рис. 4.2. Зависимость равновесной влажности φ_p различных волокнистых материалов от относительной влажности воздуха φ :

1 — вискозный шелк; 2 — натуральный шелк; 3 — хлопчатобумажное волокно; 4 — ацетатный шелк; 5 — капрон; 6 — поливинилхлоридное волокно; 7 — полиэтилентерфталатное волокно; 8 — полиэтиленовое волокно

Рис. 4.1. Зависимость содержания влаги в воздухе от температуры

микропоры из внешней среды; 2) невозможностью полной осушки (без влагопоглотителя) среды заполнения (например, точка росы газообразного азота после централизованной осушки составляет -70°C); 3) наличием влаги в конструкционных материалах гермокорпуса. Значительно увеличивают содержание влаги полимерные материалы, использование которых в конструкции РЭС обусловлено экономическими соображениями (уменьшение трудоемкости сборки, расхода материалов и энергии). Так, применение при сборке клеевых соединений позволяет: уменьшить трудоемкость сборки на 20...30% благодаря исключению таких операций, как сверление, сварка, пайка, нарезание резьбы и т. д.; снизить требования к шероховатости поверхности; увеличить допуски на геометрические размеры; повысить степень механизации и автоматизации технологических процессов. Полимерные материалы применяют для герметизации соединителей, контровки резьбовых соединений, в качестве демпфирующих и виброизолирующих слоев, для маркировки, выполнения неразъемных соединений при сборке узлов из деталей и компонентов, изготовленных из различных материалов (металлов, сплавов, керамики, ферритов, резин, пластмасс и т. д.) и различного конструктивного исполнения (печатные платы и шлейфы, объемные проводники, экраны, влагозащитные и теплоотводящие конструкции и т. д.). Полимеры входят в состав таких конструкционных материалов, как стеклотекстолит, гетинакс, лакоткань.

Все полимерные материалы гигроскопичны (рис. 4.2, табл. 4.1). Материалы анизотропного строения поглощают влагу в разных направлениях с различной скоростью (дерево впитывает скорее вдоль волокон, слоистые пластики—вдоль слоев). Пористые (волокнистые) материалы более гигроскопичны, чем плотные материалы. В процессе производства и хранения полимерные материалы поглощают влагу из окружающей среды, а при нагреве эта влага выделяется во внутреннюю среду гермокорпуса. Часто в конструкциях полимеры имеют вид гонких пленок, испарение влаги из которых может происходить лишь с торцевых поверхностей. Это обуславливает длительность процесса выделения влаги и накопления ее во внутренней среде до концентрации, при которой могут происходить отказы РЭС.

Используемые в технологическом процессе *жидкие материалы* также являются источником влаги и загрязнений, которые усиливают действие влаги. Так, электролиты, травители, моющие средства и другие материалы (глицерин, флюсы) нарушают структуру, создают полости для накопления влаги и вносят загрязнение. К таким же последствиям приводит механическая обработка (фрезерование, сверление) слоистых пластиков. Источниками влаги и загрязнения являются отпечатки пальцев и пыль; отрицательное воздействие может оказать и неполная сушка после промывки компонентов и узлов.

Влагопоглощение некоторых полимерных материалов и композиций

Материал	Влагопоглощение за 24 ч, %	Материал	Влагопоглощение за 24 ч, %
Фторопласт-4	0,0	Компаунды:	
Полиэтилен	0,01	КП-34	5,5
Полипропилен	0,01	КП-101	1,9
Эпоксидные компаунды	0,01 ... 0,02	КТ-102	0,3
Лавсан	0,02	П-68	3,2
Полистирол	0,05	Эмали:	
Полихлорвиниловая пленка	0,02 ... 0,04	ЭП-51	1,95
Пенополиуретаны	0,1 ... 0,3	КО-918	0,0
Полиимиды	0,8	Слоистые пластики:	
Лаки:		гетинакс	2,9
МЛ-92	0,76	стеклотестолит	1,6 ... 1,85
УР-231	1,0	Хлопок	5,0
КО-916К	0,0	Шелк	15 ... 20
Э-4100	0,9		

Взаимодействие влаги с материалами конструкций РЭС.

Механизм взаимодействия зависит от характера материала (органический, неорганический) и его способности поглощать (сорбировать) влагу или удерживать ее на поверхности (адсорбировать). Поглощение влаги обусловлено тем, что материалы содержат поры, значительно большие размера молекулы влаги, равного $3 \cdot 10^{-10}$ м (межмолекулярные промежутки в полимерах — 10^{-9} м, капилляры в целлюлозе — 10^{-7} м, поры в керамике — 10^{-5} м). Органические материалы поглощают влагу через капилляры или путем диффузии. Неорганические взаимодействуют с влагой, конденсирующейся или адсорбируемой на поверхности. С металлами влага вступает в химическое взаимодействие, вызывающее коррозию; она также может проникать через поры и капилляры. Действие влаги усиливается при контакте металлов с сильно отличающимися электрохимическими потенциалами, а также в местах сварных швов, содержащих интерметаллические соединения.

Вода (сконденсированная влага) — полярное, химически активное вещество, легко вступающее в соединение с различными металлами и неметаллами (газами, жидкостями, твердыми веществами, инертными газами). При этом образуются гидраты, устойчивые при низких температурах. Еще более активно вода окисляется кислородом; она реагирует с фтором, хлором, соединениями углерода. Щелочные и щелочно-земельные металлы разлагают воду уже при комнатной температуре. Вода является

активным катализатором. Она обладает высокими диэлектрической проницаемостью в жидкой фазе ($\varepsilon=79 \dots 84$) и потерями ($\text{tg}\delta$): при частоте $f=50$ Гц $\text{tg}\delta$ весьма велик; при $f=10^5$ Гц $\text{tg}\delta=1,6$; при $f=10^7$ Гц $\text{tg}\delta=0,3$; при $f=10^9$ Гц $\text{tg}\delta=0,03$. При наличии примесей ионного типа вода имеет высокую проводимость (удельное сопротивление водопроводной воды составляет $10^6 \dots 10^7$ Ом·м; дважды дистиллированной на воздухе воды — 10^8 Ом·м; перегнанной в вакууме — 10^{10} Ом·м).

Воздействие влаги на материалы и компоненты может привести к постепенным и внезапным отказам РЭС. Увлажнение органических материалов сопровождается следующими явлениями: увеличением диэлектрической проницаемости (ε) и потерь ($\text{tg}\delta$); уменьшением объемного сопротивления, электрической и механической прочности; изменением геометрических размеров и формы (короблением при удалении влаги после набухания); изменением свойств смазок. Это приводит к увеличению емкости (в том числе паразитной), уменьшению добротности контуров, снижению пробивного напряжения и появлению отказов РЭС. *Постепенные отказы* систем радиолокации и навигации проявляются в ухудшении точности определения координат и снижении дальности действия РЛС. У радиовещательных и телевизионных приемников снижается чувствительность и избирательность, сужаются диапазоны рабочих частот (в сторону более низких), появляется неустойчивость работы гетеродина. *Внезапные отказы* обуславливаются электрическим пробоем, расслоением диэлектриков и т. д. При увлажнении металлов отказы могут произойти из-за коррозии, приводящей к нарушению паяных и сварных герметизирующих швов, обрыву электромонтажных связей, увеличению сопротивления контактных пар (что ведет к увеличению шумов неразъемных и обгоранию разъемных контактов); уменьшению прочности и затруднению разборки крепежа; потускнению отражающих и разрушению защитных покрытий; увеличению износа трущихся поверхностей и т. д.

При температуре ниже точки росы представляет опасность сконденсированная влага. Наличие влаги на поверхности прозрачных окон (например, телевизионных передающих трубок на ПЗС-структурах) приводит к смазыванию изображения. Попадание влаги на поверхность тонкопленочных резистивных элементов может привести к изменению их сопротивления (уменьшению при шунтировании влагой, увеличению при коррозии); влага в диэлектриках пленочных конденсаторов увеличивает их емкость и приводит к пробое диэлектрика; влага на поверхности полупроводниковых элементов ИС способствует скоплению на границе Si — SiO₂ положительных ионов (Na⁺ и др.), образованию слоя накопленных зарядов в полупроводнике под влиянием поверхностных ионов и изменению параметров полупроводниковых приборов (дрейфу обратных токов, пробивных напряже-

ний, коэффициента усиления биполярных транзисторов, порогового напряжения и крутизны передаточной характеристики МДП-транзисторов).

При замерзании сконденсировавшейся влаги и электрохимической коррозии может нарушиться механическая прочность паяных и сварных герметизирующих швов, произойти расслоение многослойных печатных плат, обрыв печатных проводников при их отслаивании от подложки, появление трещин в подложках гибридных ИС.

Все это, как правило, приводит к полному отказу РЭС, как негерметичных, так и герметичных, но в первом случае воздействие оказывает внешняя среда, а во втором — и внутренняя.

Способы влагозащиты РЭС. Для обеспечения надежности функционирования РЭС при воздействии влаги требуется применять *влагозащитные конструкции*, которые (рис. 4.3) разделяют на две группы: монолитные и полые. Монолитные оболочки составляют неразрывное целое с защищаемым узлом. От конструкции влагозащиты зависят такие параметры РЭС, как масса, габариты, стоимость, надежность; удобство ремонта, обслуживания, изготовления; возможность механизации и автоматизации производства. Сложность создания конструкции влагозащитной оболочки состоит также в том, что на нее часто возлагаются функции несущей конструкции, теплоотвода, защиты от электромагнитных воздействий и ионизирующих излучений, пыли, света, микроорганизмов.

Монолитные пленочные оболочки используются в основном как технологическая защита бескорпусных компонентов, подлежащих герметизации в составе блока, а также компонентов с улучшенными частотными свойствами (за счет уменьшения паразитных параметров внешних выводов). Монолитные оболочки из органических материалов, выполняющие функции несущих конструкций, изготавливают методами опрессовки, пропитки, обволакивания, заливки. Обычно компоненты с такой защитой предназначены для использования в негерметичных наземных РЭС, и в этом случае приходится принимать дополнительные меры для обеспечения влагозащиты электрических соединений (например, лакировать печатные платы).

Полые влагозащитные оболочки позволяют освободить защищаемые компоненты от механического контакта с оболочкой, что обеспечивает работу в более широком диапазоне температур и исключает химическое взаимодействие оболочки и защищаемого компонента. Полые оболочки, особенно из неорганических материалов, обеспечивают более высокую надежность влагозащиты, но имеют значительные габариты, массу, стоимость. Наиболее эффективно использование полых оболочек для групповой герметизации бескорпусных компонентов в составе блока. Это объясняется уменьшением длины герметизирующего шва (по сравнению

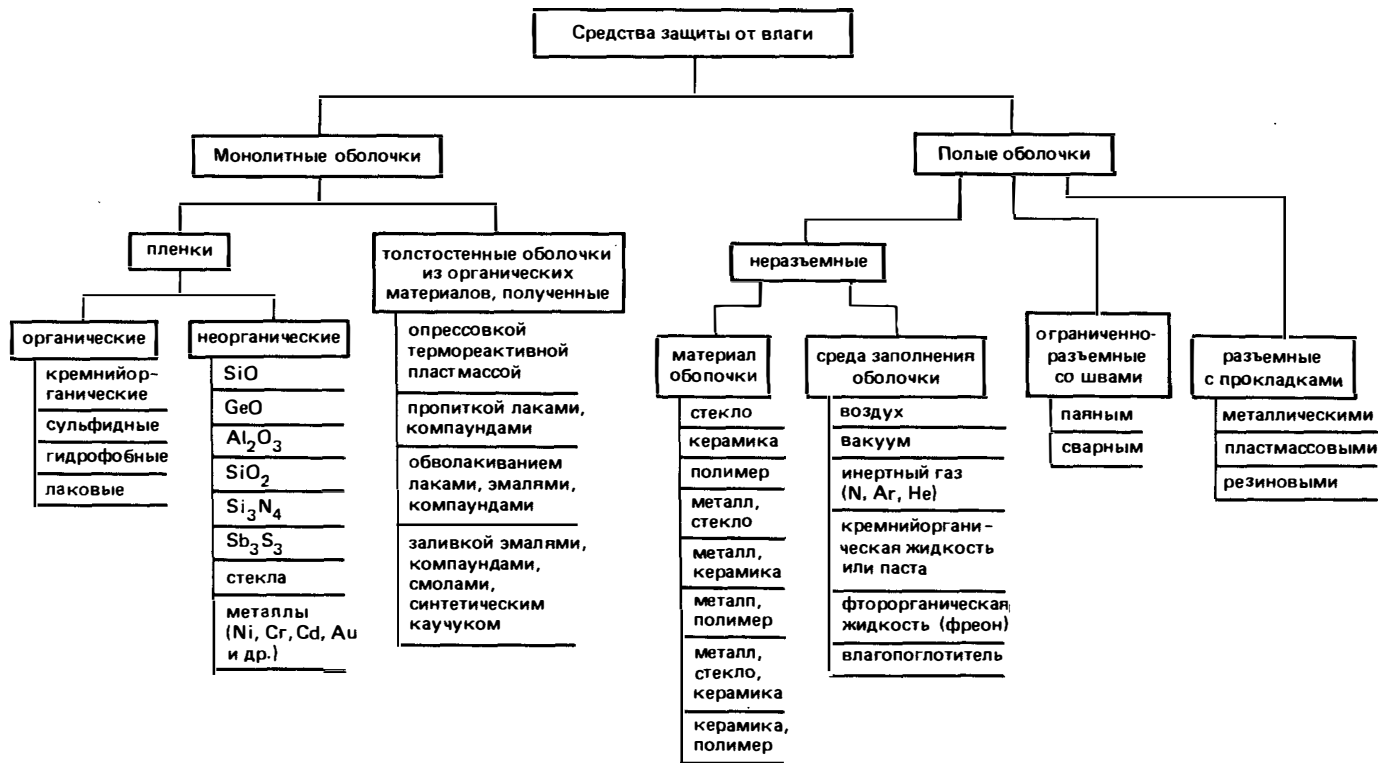


Рис. 4.3. Классификация конструкторско-технологических средств защиты от влаги

с индивидуальной герметизацией компонентов), а также возможностью создания внутри гермоблоков при заполнении контролируемой по влажности и химическому составу инертной среды. Однако стоимость таких оболочек высокая, а ремонтпригодность — низкая, поэтому они находят применение в основном для бортовой и СВЧ-аппаратуры.

§ 4.2. Защита от влаги элементов и узлов РЭС монолитными оболочками

Монолитные оболочки можно использовать для защиты элементов и узлов от влаги на этапе изготовления и сборки (пленочные оболочки) или для защиты их при эксплуатации (толстостенные оболочки). Пленочная защита не может служить конструктивной основой для крепления внешних выводов, а является лишь технологической защитой компонентов (см. рис. 1.19) до герметизации их в монолитных (полых) оболочках или до сборки в узлы с общей герметизацией. Пленочные оболочки выполняются из органических и неорганических материалов и имеют толщину (для различных способов защиты от влаги) 0,2...20 мкм.

К материалам защитных пленок (рис. 4.3) предъявляется ряд требований: хорошие влагозащитные свойства (малая влагопроницаемость, отсутствие пор, пассивирующие свойства), возможность работы в диапазоне температур (близость ТКЛР пленки и материала компонента, эластичность), хорошая адгезия к защищаемому компоненту. Одновременно всем свойствам не отвечает ни один из материалов, поэтому в каждом конкретном случае выбирается тот или иной вариант пленочной защиты. ТКЛР пленок SiO_2 значительно отличается от ТКЛР кремния. Поэтому пленки SiO_2 плохо работают в широком диапазоне температур и при большой толщине. Для усиления их защитных свойств используется дублирование пленками силанов Si_3N_4 , которые имеют высокую адгезию и термостойкость. *Гидрофобные пленки* имеют способность к водоотталкиванию, но их температурная стойкость не превышает 250 °С и они неустойчивы при длительном воздействии влаги. *Пленки из эластичных лаков* (МК-4У, КО-961п, ПЭ-518 и др.) хорошо защищают от влаги, но трудно контролировать толщину и равномерность пленки. В ряде случаев для защиты полупроводниковых компонентов можно использовать пленки из стекла. При выборе стекла того или иного химического состава необходимо, чтобы ТКЛР стекла и защищаемого компонента были близки, а также учитывать температуростойкость стекла (в случае установки кристалла в корпус с использованием эвтектики Al—Si нагрев превышает 577 °С).

Для защиты от влаги компонентов и узлов с помощью монолитных оболочек, являющихся одновременно несущей

Параметр	Покровные лаки			
	МК-4У	КО-938В	КО-961п	СБ-1С
Вязкость по ВЗ-4, с	25	18	—	15—35
Время высыхания, ч (при температуре, °С)	5 (200)	1 (150)	4 (20)	2 (120)
Водопоглощение за 24 ч, %	—	—	0,1	0,45
Рабочая температура, °С	-40...+180	-60...+260	-60...+150	-60...+120
Электрическая прочность, МВ/м:				
до воздействия влаги (при температуре, °С)	40 (200)	50 (200)	85 (20)	50 (120)
после воздействия 98%-ной влаги (в течение времени, ч)	30 (48)	40 (48)	65 (56)	20 (24)
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,009	0,004...0,006	0,02...0,06
Диэлектрическая проницаемость	—	4,5...6	3...3,4	3,4...6
Удельное объемное сопротивление, Ом/м:				
до воздействия влаги (при температуре, °С)	10 ⁸ (200)	10 ¹⁰ (200)	10 ¹²	10 ¹³
после воздействия 98%-ной влаги	10 ⁸	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ⁷

конструкцией для внешних выводов, используются пропитка, заливка, обволакивание и опрессовка.

Пропитка нашла наибольшее применение для защиты от влаги обмоток электродвигателей, катушек трансформаторов и т. д. При пропитке из полостей и пор вытесняется воздух и они заполняются лаком или компаундом. Это приводит к увеличению электрической и механической прочности, улучшению теплопроводности, но одновременно увеличиваются масса, паразитная емкость, интенсифицируются химические и электрохимические процессы в местах пайки или сварки внешних выводов. В конструкциях изделий, предназначенных для пропитки, должна быть предусмотрена возможность свободного выхода воздуха и заполнения пор пропиточным составом (например, в «щечках» катушек трансформаторов делаются вырезы). Выбор пропиточного состава определяется требованиями, которые являются наиболее важными для данного изделия (проникающая способность, химическая нейтральность, цементирующая способность, электрическая прочность изоляции, высокая адгезия, теплопроводность, значения ϵ и $\text{tg}\delta$, холодо- и термостойкость). Характеристики некоторых пропиточных составов приведены в табл. 4.2.

		Прониточные лаки			
УР-231	Э-4100	ГФ-95	ПФЛ-86	КО-916	ЭТР-5
≥ 11 3 (80)	11...14 4 (80)	30...50 2 (110)	— 0,5 (120)	15...17 0,25 (200)	60...100 2 (150)
1,0 -60...+80	0,9 -60...+120	1,1 -60...+120	0,8 -60...+120	0,1 -60...+120	0,7 -40...+155
34 (80)	70 (120)	40 (100)	35 (100)	30 (200)	60 (155)
30 (48)	50 (24)	—	—	—	—
0,02...0,08	0,013...0,56	0,07...0,4	—	0,01...0,02	0,005
4,2...4,3	4,2...6,3	3,6...4,6	—	2,5...3,0	—
10^{13}	10^{13}	$10^{10} \dots 10^{13}$	$10^{11} \dots 10^{13}$	$10^9 \dots 10^{11}$	$10^8 \dots 10^{13}$
10^8	10^7	—	—	—	—

Заливка — это сплошная упаковка компонента или узла в изоляционную массу путем заполнения ею свободного промежутка между изделием и стенками корпуса или между изделием и заливочной формой (рис. 4.4). Материал формы в последнем случае выбирают таким (например, фторопласт), чтобы он обеспечивал минимальную адгезию заливочного материала; иногда стенки формы покрывают смазкой. Заливка пенопластом позволяет значительно увеличить механическую прочность узла при минимальном увеличении массы, но теплоотвод (без теплоотводящих шин) резко ухудшается. Толщина стенок влагозащитной конструкции выбирается из соображений получения требуемого времени влагозащиты. Для улучшения теплопроводности в заливочный компаунд иногда добавляют кварцевую пудру или прокаленный порошок оксида алюминия, а для улучшения влагозащитных свойств можно добавлять порошок цеолита, поглощающего влагу.

Расчетное время (τ) защиты оболочки (без цеолита) можно определить по формуле

$$\tau = -\frac{4d^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{p_{кр}}{p_0} \right) \right],$$

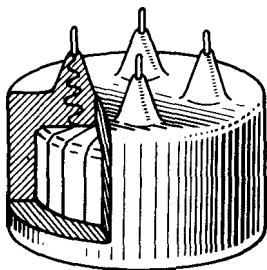


Рис. 4.4. Защита тороидального трансформатора от влаги заливкой

где d — толщина оболочки, м; D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; p_0 — давление паров окружающей среды; $p_{\text{кр}}$ — давление паров влаги, соответствующее ее критической концентрации, после достижения которой появляются отказы. Расчетное время влагозащиты не является определяющим при выборе материала, так как надо оценить внутренние напряжения после полимеризации и в диапазоне температур, адгезию оболочки к компоненту, ϵ и $\text{tg}\delta$, электрическую и механическую прочность, теплопроводность, токсичность и т. д.

При выборе заливочного материала особое внимание следует обращать на близость ТКЛР материала заливки и защищаемого компонента или узла (это влияет на внутренние напряжения в компаунде), а также ТКЛР материала заливки и внешних выводов (это влияет на образование каналов проникновения влаги при изменении температуры). Для защиты заливаемых элементов от механических нагрузок, возникающих в результате внутренних напряжений в компаунде, принимают следующие меры: ограничивают толщину заливки; наиболее чувствительные компоненты располагают ближе к центру (рис. 4.5); отдельные компоненты, например магнитные, помещают в защитные каркасы; перед заливкой защищаемые компоненты покрывают тонким слоем эластичного компаунда (например, СКТН), вазелина (КВ-3, КВ-Н и др.), смазки (ВНИИНП, ЦИАТИМ-201 и др.) (рис. 4.6). Смазка толщиной 0,025; 0,062; 0,087 мм снижает контактное давление на 30, 70 и 80% соответственно. Увеличивать толщину слоя смазки для изделий, работающих в широком диапазоне температур, нецелесообразно из-за высокого значения ТКЛР силиконовых материалов (около $200 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) и возникающего вследствие этого большого гидростатического давления в замкнутом объеме.

Применяют различные *компаунды*: эпоксидные (ЭЗК, ЭК-16Б, Э-242 и др.), эластичные полиуретановые для заливки ферритовых элементов (типа 10-10, 10-20 и др.), кремнийорганические (Виксинт, Сизл и др.), полиэфирные (МБК) и др. Особое место занимают пенокомпаунды, имеющие малые плотность ($10 \dots 300 \text{ кг/м}^3$), диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 1,05 \dots 2,1$) и потери ($\text{tg}\delta = 0,002 \dots 0,03$). Они выполняются на основе фенолформальдегидной смолы (ФК-20), полиуретанов (ПУ-101 и др.), эпоксидной смолы (ПЭ-1, ПЭ-5 и др.), кремнийорганических материалов (ВПГ, СИЛПЕН, К-40 и др.). Пенокомпаунды последней группы обладают демпфирующими свойствами, работают в диапазоне температур $-60 \dots +250 \text{ }^\circ\text{C}$. Жесткие пенокомпаунды

обладают высокой удельной механической прочностью, что позволяет использовать их в качестве конструкционных материалов. Чтобы уменьшить механические нагрузки на залитые жестким компаундом компоненты, в качестве демпфера часто используют слой эластичного пенокомпаунда толщиной 1...3 мм (ВГО-1, СИЛПЕН, У-1-18 и др.). После заливки пенокомпаундами повышается вибропрочность узла вследствие смещения резонансных частот. При использовании жестких пенокомпаундов (ПУ-101 и др.) допускается эксплуатация изделий при температурах от $-25...60$ до $+40...150$ °С, эластичных (например, ВПГ) — в диапазоне температур от -60 до $+250$ °С, пеностекла — до 1000 °С.

Обволакивание применяют для защиты от влаги печатных плат, дискретных ЭРЭ, бескорпусных полупроводниковых приборов, микросборок. Основным преимуществом обволакивания является высокая экономичность, недостатками — довольно толстый и неконтролируемый слой покрытия, возможность использования только для нежестких условий эксплуатации (как и для всех видов полимерной защиты от влаги), сложность удаления попавшей под защитный слой влаги. Обволакивание печатных плат лаками и компаундами позволяет повысить пробивное напряжение работающей в наземных условиях аппаратуры. Для обволакивания применяют лаки (УР-231, Э-4100 и др.), компаунды (ЭКМ, ЭК-42 и др.), эмали. К обволакиванию можно отнести также герметизацию компаундами паяных и сварных швов и мест контактирования металлов с различными электрохимическими потенциалами, которые весьма чувствительны к воздействию влаги. Но даже при наличии герметизирующих компаундов следует избегать контакта металлов с сильно различающимися электрохимическими потенциалами, например алюминия (-667 мВ) и меди ($+10$ мВ), находящихся в морской воде (рН 7,5).

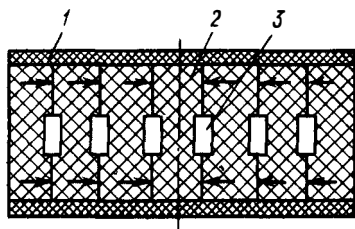


Рис. 4.5. Тангенциальные силы в герметизированном блоке с навесными компонентами:
1 — плата; 2 — компаунд; 3 — компонент

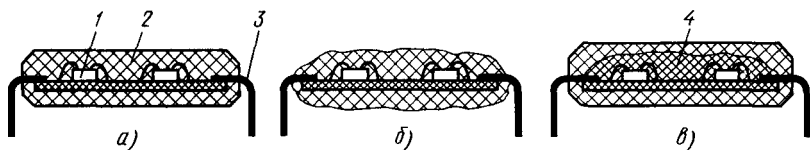


Рис. 4.6. Монолитные влагозащитные конструкции узлов РЭС:

а — заливка в форму без подслоя; б — обволакивание; в — двухслойная заливка с подслоем из эластичного материала; 1 — элементы; 2 — герметизирующий полимерный материал; 3 — выходы; 4 — подслой из эластичного материала

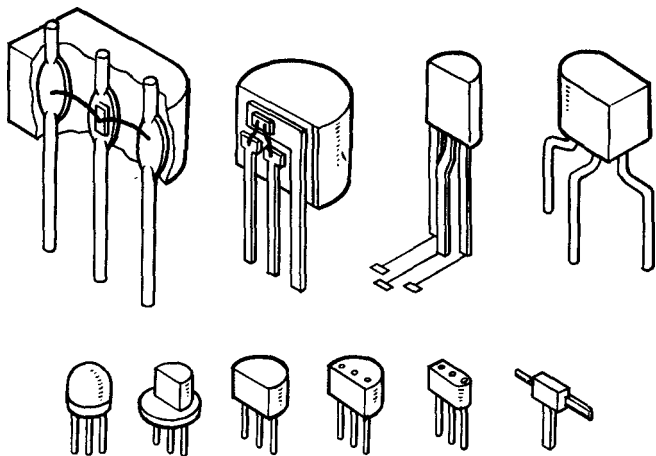


Рис. 4.7. Транзисторы в монолитных полимерных корпусах различной конструкции

Опрессовка—это защита изделия от влаги толстым слоем полимерного материала (термореактивная или термопластичная пластмасса) методом литьевого или трансферного прессования в специальных формах. Этот вид влагозащиты используют в основном для малогабаритных компонентов (ИС, ЭРЭ, микросборок; см. рис. 1.17, б, 1.18, 4.7, 4.8), что позволяет надежно укрепить внешние выводы и создать несущую конструкцию, которая способна выдерживать механические перегрузки и пригодна для автоматизации установки компонентов

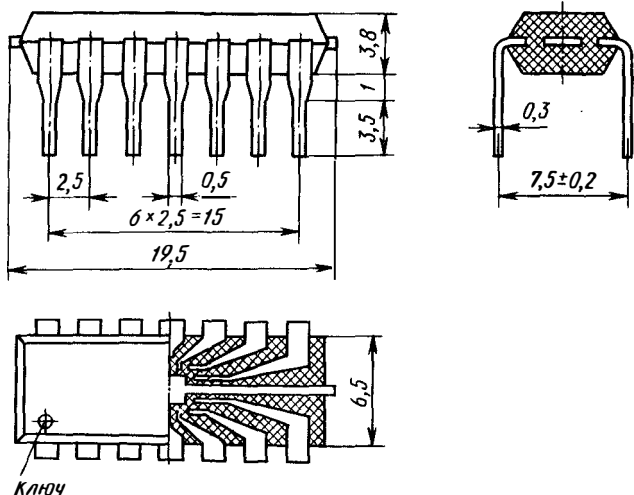


Рис. 4.8. Монолитный полимерный корпус ИС типа 201.14-1

Температурный коэффициент линейного расширения некоторых материалов

Материал	ТКЛР, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Материал	ТКЛР, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Прессматериалы:		латунь	18...19
К-124-18	19...36	медь	16...23
К-124-38	20...30	серебро	22
АГ-4В	10...15	золото	13,9
К-21-22	43...53	никель	13,3
ВЧ-70	37	Конструкционные материалы:	
ЭФП-60АК	48		сталь углеродистая
Проводники:		нержавеющая сталь	10,5
алюминий	22...26	ковар	6

на плату. Используется для нежестких условий эксплуатации (отапливаемые помещения), имеет низкую стоимость (в 2-3 раза ниже стоимости полых корпусов). При разработке конструкции учитывается необходимость использования материалов корпуса и выводов с близкими значениями ТКЛР (табл. 4.3). Толщина опрессовки выбирается с учетом надежности влагозащиты, технологических требований (при толщине стенки менее 2 мм возможно повреждение защищаемого компонента в пресс-форме), внутренних напряжений (при больших толщине и изменении температуры могут возникнуть большие внутренние напряжения). При выборе материала для опрессовки необходимо учитывать его параметры ϵ , $\text{tg}\delta$, электрическую прочность.

Время влагозащиты рассчитывается по той же формуле, что и для заливки. Для компонентов СВЧ этот вид влагозащиты не используется. Защита полимерными материалами от влаги экономична, но используется только для нежестких условий эксплуатации (отапливаемые помещения). Применяя гермокорпус, можно создать более надежную влагозащиту компонентов, при этом в ряде случаев целесообразно переходить на бескорпусную элементную базу.

Для защиты от коррозии несущих корпусных конструктивных узлов из металлов и сплавов широко применяют монолитные пленочные металлические покрытия, нанесенные горячим способом, гальванически, путем диффузии. Толщина таких покрытий единицы — десятки микрометров. Из приведенных в табл. 4.4 металлических покрытий наибольшей температурной стабильностью обладает хромовое (тускнеет при $+500 \text{ } ^\circ\text{C}$). Золотое покрытие не взаимодействует с кислотными, щелочными и сернистыми соединениями, но оно мягкое и легко поддается истиранию.

Характеристики некоторых металлических антикоррозионных покрытий

Покрытие	Назначение и область применения покрытия	Материал защищаемых деталей	Толщина покрытия, мкм
Цинковое	Защита от коррозии корпусов, крышек, панелей, шасси, каркасов, резьбовых крепежных деталей, получение светопоглощающих поверхностей	Сталь, медь, медные сплавы	6...30
Кадмиевое	Защита от коррозии в морских условиях корпусов, крышек, каркасов, панелей, шасси, экранов и т. д.	То же	12...30
Никелевое	Защита от коррозии экранов, сердечников, корпусов, резьбовых крепежных деталей; придание деталям повышенной отражательной способности; увеличение твердости деталей, работающих на трение	»	3...18
Хромовое (с подслоем)	Защита от коррозии и декоративная отделка корпусов, ручек, петель и т. п., увеличение твердости деталей, работающих на трение (оси, втулки, стержни)	»	9...48, для листа 6...12
Сплав олово—свинец	Улучшение условий пайки контактов, лепестков, проводов	»	6...24
Серебряное (с подслоем)	Улучшение электропроводности и защита от коррозии контактов, пружин, лепестков, резьбовых крепежных деталей, улучшение пайки	Сталь, медь, медные сплавы, алюминий и его сплавы, квар	6...60, для листа 3...6
Золотое (с подслоем)	Уменьшение переходных сопротивлений контактов, пружин, лепестков, создание покрытия, не имеющего оксидной пленки	Медь, медные сплавы, квар	9...12 (серебро 6...9, золото 3)

В ряде случаев защитное покрытие делают многослойным, например слой меди толщиной 6...10 мкм (высокая адгезия к стали), слой никеля толщиной 3...6 мкм (высокая твердость), слой хрома толщиной 0,5 мкм (антифрикционность, гидрофобность). Для защиты корпусов из алюминиевых сплавов используют многослойные покрытия, например Cu—Ni—(Sn—Bi). Добавка висмута позволяет избежать оловянной чумы при низких температурах и препятствует росту дендритов при нанесении покрытия.

В зависимости от поляризуемости пленки металла различают два вида покрытий: катодные и анодные. Если электродный потенциал металла покрытый в данной среде (табл. 4.5) более положительный, чем электродный потенциал основного металла, то покрытие называется катодным, а если он более отрица-

тельный, то покрытие называется анодным. Катодные покрытия защищают основной металл лишь механически, изолируя его от внешней среды. Анодные покрытия защищают его не только механически, но и электрохимически. Продукты разрушения заполняют поры, и процесс разрушения замедляется.

Таблица 4.5

Электрохимические потенциалы металлов

Металл	Электрохимический потенциал, мВ	Металл	Электрохимический потенциал, мВ
Пресная вода, pH 6		Морская вода, pH 7,5	
Серебро	+194	Серебро	+149
Медь	+140	Никель	+46
Никель	+118	Медь	+10
Алюминий	-169	Свинец	-259
Олово	-175	Цинк	-284
Свинец	-283	Сталь	-335
Сталь	-350	Кадмий	-519
Кадмий	-574	Алюминий	-667
Цинк	-823	Олово	-809

В конструкторской документации на изделие указывается материал покрытия, его толщина, последовательность нанесения слоев. Например, медно-никелево-хромовое покрытие, служащее защитой от коррозии и одновременно являющееся декоративной отделкой, обозначается М24Н12Х (толщина меди 24 мкм, никеля 12 мкм, хрома до 1 мкм). В ряде случаев несущие конструкции защищают от влаги с помощью лакокрасочных покрытий. Такие покрытия вследствие химической инертности обладают лучшими антикоррозионными свойствами, чем металлические, но механическая прочность и влагостойкость их меньше. Перед нанесением лакокрасочных покрытий металл для улучшения адгезии грунтуют.

§ 4.3. Защита от влаги элементов и узлов РЭС полыми оболочками

Применение полых влагозащитных оболочек. Полые влагозащитные оболочки применяют для защиты компонентов и узлов РЭС (ИС, микросборок), в качестве дополнительной защиты от влаги наземных РЭС на корпусированных элементах, для бортовых РЭС на бескорпусных элементах, для аппаратуры диапазона СВЧ. Применение полых оболочек позволяет исключить механический контакт их с защищаемым изделием, что позволяет исключить передачу изделию механических напряжений, которые

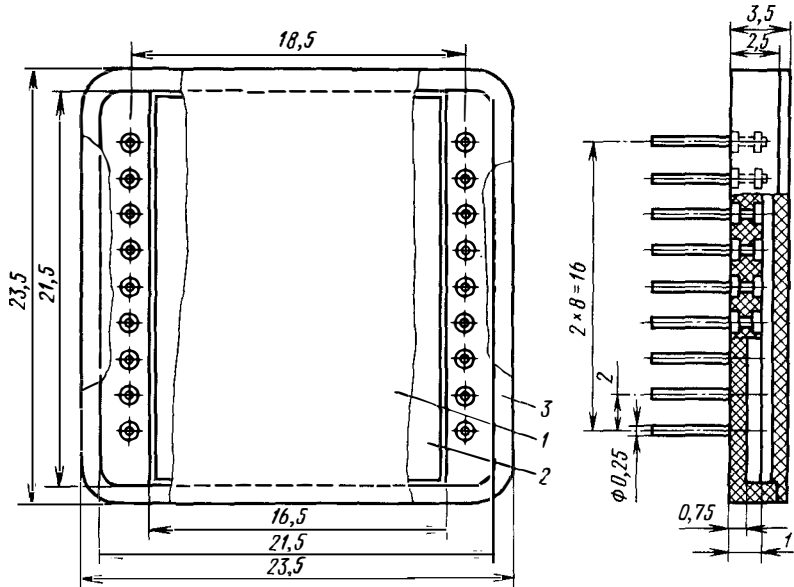


Рис. 4.9. Полый полимерный корпус со штыревыми выводами:
1—крышка; 2—углубление для микросборки; 3—корпус с выводами

могут возникнуть в них. Кроме того, устраняется химическое взаимодействие оболочки с защищаемым изделием. Одновременно часто улучшается теплоотвод (при использовании оболочек, теплопроводность которых выше теплопроводности полимеров), повышается надежность влагозащиты и обеспечивается электромагнитное экранирование (при использовании оболочки из металла или металлизированной керамики), ослабляются паразитные связи ввиду уменьшения ϵ при замене полимера воздухом.

Необходимость дополнительной защиты от влаги компонентов наземных РЭС с помощью полых оболочек вызвана недостаточной надежностью монокристаллических полимерных оболочек, а также необходимостью защиты от влаги электрических связей (печатных плат, объемных проводников, соединителей). Требования к массогабаритным параметрам наземных РЭС сравнительно мягкие, поэтому наличие дополнительной оболочки не приводит к их значительному ухудшению. Жесткие требования к массогабаритным параметрам бортовых РЭС обуславливают использование бескорпусной элементной базы и герметизацию ее, а также электрических соединений в составе блока.

Использование полых оболочек РЭС диапазона СВЧ позволяет использовать бескорпусную элементную базу (имеющую лучшие частотные свойства), ослабить паразитные связи, улучшить теплоотвод и обеспечить экранирование.

Влажностные параметры некоторых герметизирующих полимерных материалов

Материал	B , с	D , м ² /с	h , с ² /м ²	Назначение материала
Фторопласт-4	$1,0 \cdot 10^{-16}$	$8,34 \cdot 10^{-13}$	$12 \cdot 10^{-5}$	Герметизирующие прокладки, основание печатных плат
Полиэтилен	$6,27 \cdot 10^{-16}$	$6,4 \cdot 10^{-13}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	Элементы конструкции высокочастотных узлов
Полистирол	$4,22 \cdot 10^{-15}$	$3,32 \cdot 10^{-11}$	$12,6 \cdot 10^{-5}$	То же
Пресс-материал ЭФП-63	$1,83 \cdot 10^{-16}$	$6,1 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-5}$	Монолитный пластмассовый корпус
Порошковый компаунд ПЭП-17	$8,0 \cdot 10^{-16}$	$1,14 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-4}$	Герметизация узлов вихревым напылением
Клей ВК-9	$3,3 \cdot 10^{-16}$	$6,5 \cdot 10^{-13}$	$5,63 \cdot 10^{-4}$	Крепление элементов на плату
Лак ФП-525	$4,5 \cdot 10^{-16}$	$1,18 \cdot 10^{-12}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	Бескорпусная герметизация ИС
Компаунд ЭК-16Б	$2,08 \cdot 10^{-16}$	$6,4 \cdot 10^{-13}$	$3,25 \cdot 10^{-4}$	Заливка элементов и узлов РЭС
Пластмасса К-124-38	$1,66 \cdot 10^{-16}$	$8,34 \cdot 10^{-14}$	$2,0 \cdot 10^3$	Полый пластмассовый корпус
Компаунд ЭКМ	$4,1 \cdot 10^{-16}$	$7,1 \cdot 10^{-13}$	$5,77 \cdot 10^{-4}$	Герметизация полупроводниковых ИС
Кремнийорганический эластомер СКТН	$8,2 \cdot 10^{-15}$	$8,2 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Заливка ферритовых элементов
Компаунд ПЭК-19	$7,8 \cdot 10^{-16}$	$2,1 \cdot 10^{-12}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	Заливка узлов РЭС
Лак УР-231	$5,2 \cdot 10^{-16}$	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	Обволакивание печатных плат

Для наземных РЭС, работающих в отапливаемых помещениях, можно использовать дешевые полимерные полые оболочки (рис. 4.9), к пластмассовому основанию которых приклеивается пластмассовая крышка. Основной недостаток подобных оболочек заключается в возможности проникновения влаги в результате диффузии через полимерную оболочку, а также по границе вывод—пластмасса при образовании каналов из-за различия ТКЛР материала вывода и пластмассы.

При использовании полого полимерного корпуса *время влагозащиты* (τ) определяется временем задержки проникновения влаги через слой полимеров и временем накопления влаги внутри корпуса до наступления критического давления паров ($p_{кр}$):

$$\tau = \frac{Vhd}{SB} \ln \frac{p_0}{p_0 - p_{кр}} + \frac{d^2}{D},$$

где V —внутренний объем оболочки, м³; h —коэффициент растворимости влаги в материале оболочки, с²/м²; d —толщина стенки оболочки, м; S —площадь проникновения влаги через оболочку, м²; p_0 —давление окружающей среды, Па; D —коэф-

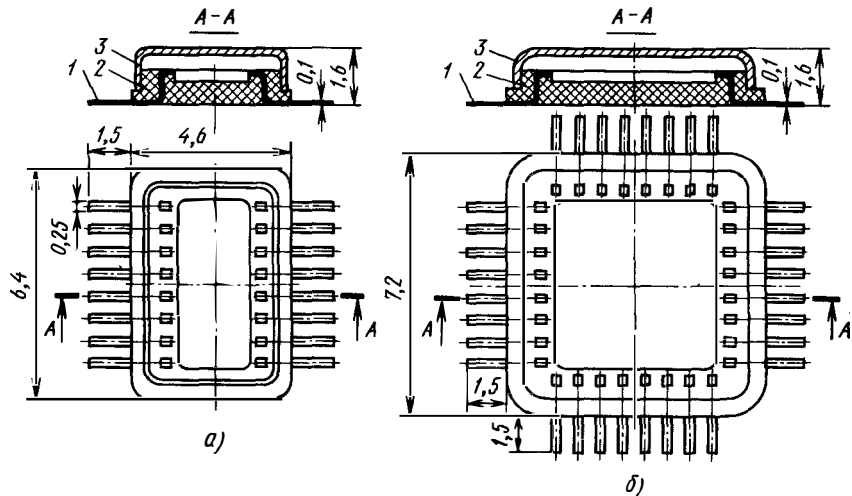


Рис. 4.10. Металлополимерные корпуса ИС с планарными выводами (на виде сверху крышки условно не показаны): а—16-выводный; б—32-выводный; 1—никелевые выводы; 2—полимер; 3—металлическая крышка

фициент диффузии материала оболочки, m^2/c ; B —коэффициент влагонепроницаемости оболочки, с. Влажностные параметры некоторых полимерных материалов приведены в табл. 4.6.

Более дорогими, но и более надежными являются полые неразъемные металлополимерные оболочки (рис. 4.10—4.12). Наличие металлических крышек уменьшает площадь, через которую может диффундировать влага, однако по границе вывод—полимер влага может проникать (как в монолитных, так и в полых полимерных оболочках). Зависимость времени влагозащиты от относительной влажности для некоторых неразъемных металлополимерных оболочек приведена на рис. 4.13, 4.14. Обычно время влагозащиты подобных оболочек при влажности окружающей среды 98% не превышает 10...30 сут. В условиях космоса это время может быть значительно больше (например, РЭС космического аппарата «Луноход-1»). Для

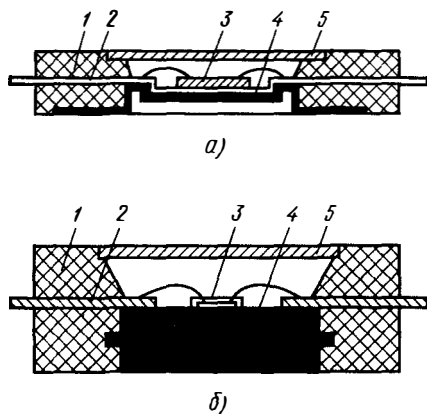
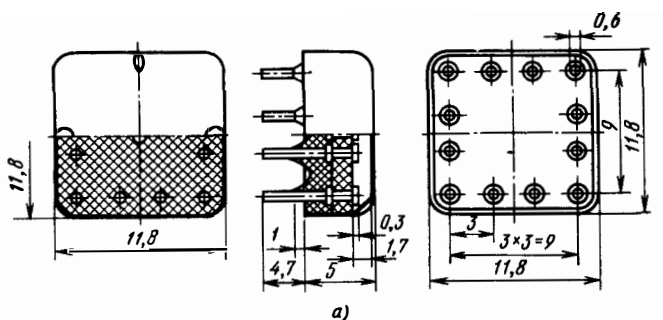
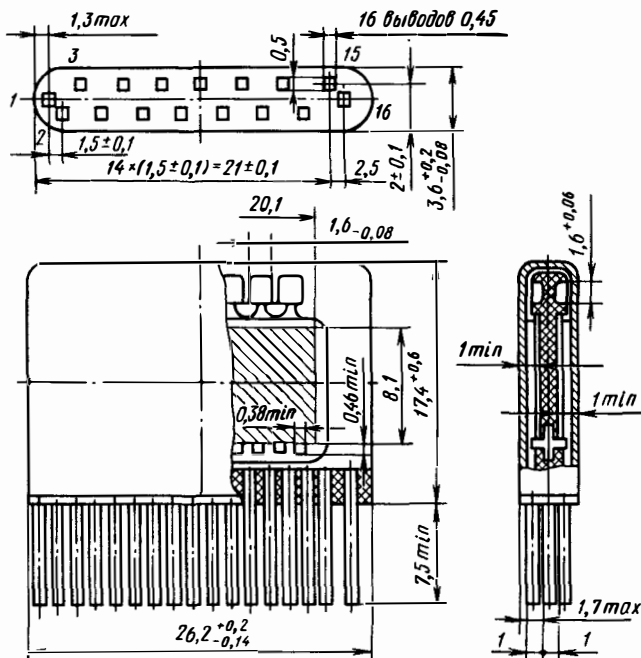


Рис. 4.11. Металлополимерные корпуса с теплоотводящей шиной малого сечения выполненной штамповкой (а), и с шиной увеличенного сечения (б): 1—полимер; 2—вывод; 3—ИС; 4—теплоотводящая шина; 5—металлическая крышка



а)



б)

Рис. 4.12. Металлополимерный корпус типа «Тропа» (а) и типа «Пенал» (б)

улучшения влагозащитных свойств внутренняя полость полимерных и металлополимерных оболочек заполняется кремнийорганическим эластомером (ЦИАТИМ, КВ и др.), в ряде случаев с наполнителем из цеолита. В этом случае время влагозащиты возрастает в несколько раз. Однако из-за большого значения ТКЛР кремнийорганических эластомеров в оболочке необходимо оставлять свободную полость для размещения увеличивающегося при нагреве объема эластомера.

Из-за низкой теплопроводности полимеров часто для обеспечения отвода тепла используют теплоотводящие шины (см. рис. 1.18, 4.11).

Хороший теплоотвод и высокую надежность обеспечивают полые неразъемные металлокерамические и металлостеклянные оболочки (см. рис. 1.17, а; 4.15—4.17). Металлокерамические оболочки имеют большую стоимость, так как при их изготовлении используются дорогие и дефицитные материалы, содержащие молибден, палладий и др. Кроме того, они имеют значительную массу и излучают α -частицы,

что может привести к отказу полупроводниковых элементов ИС. Для крышек и выводов также используют такие дорогие и дефицитные материалы, как золото (покрытие), ковар. Металлостеклянными полыми оболочками можно герметизировать не только компоненты, но и блоки РЭС, например бортовое РЭС одноразового действия (рис. 4.18). Для улучшения теплоотвода от бескорпусных компонентов оболочка заполнена фторсодержащим веществом. Внешние выводы изолированы от металлического корпуса с помощью стеклянных изоляторов. Соединение крышки с основанием осуществлено неразъемным паяным или сварным швом.

Для изоляции от корпуса внешних выводов используют стекла и проводниковые материалы с близкими значениями ТКЛР, что позволяет получать герметичные металлостеклянные спаи, называемые согласованными, которые могут работать в широком диапазоне температур. Параметры некоторых материалов для металлостеклянных спаев приведены в табл. 4.7. Из табл. 4.7 следует, что для стекла С87-1 наиболее подходящим является платинит, а для стекла С48-1 и С49-2 — ковар (стоимость молибдена приближается к стоимости серебра). Платинит представляет собой двуслойный проволоочный материал — на сердечник из ферроникеля (42% Fe, 59% Ni) нанесена оболочка из меди. Масса медной оболочки составляет 25...30% массы проводника. Стекла делятся на легкоплавкие (1100...1200 °С) и тугоплавкие (1200...1400 °С). ТКЛР легкоплавких стекол более $6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, тугоплавких — менее $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Стекло не сплавляется ни с одним из металлов, так как чистая поверхность

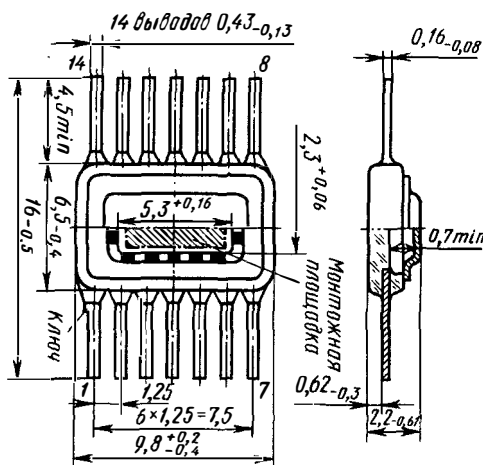


Рис. 4.16. Металлостеклянный корпус типа 4105 (401.14-3)

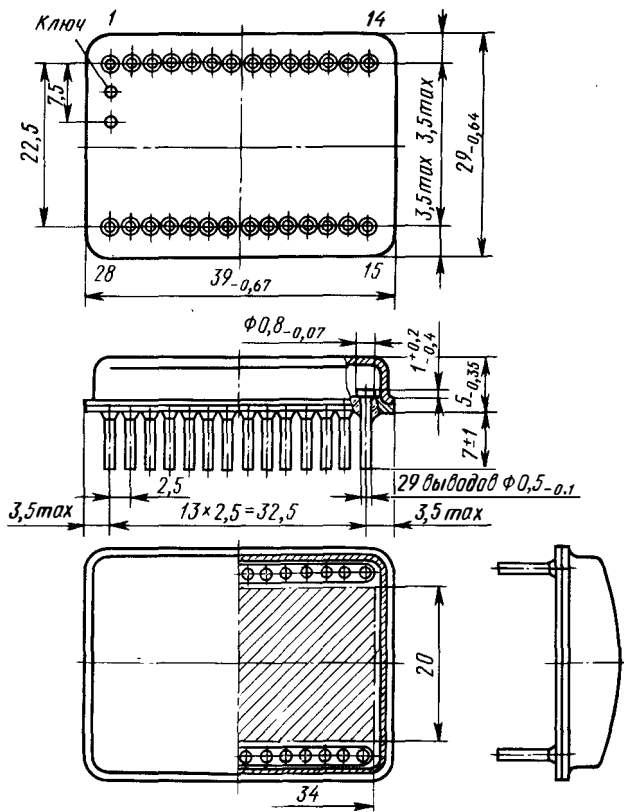


Рис. 4.17. Металлостеклянный корпус типа 1210 (157.29-1)

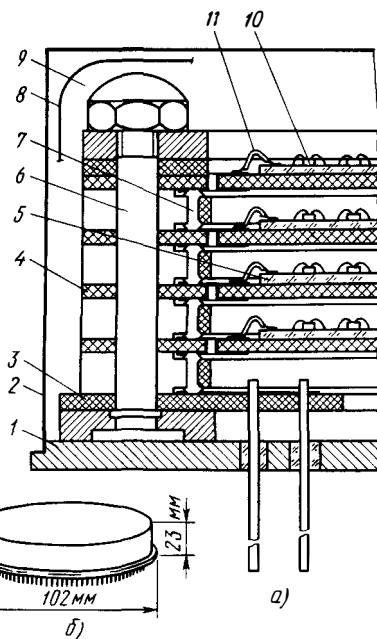
Таблица 4.7

Параметры материалов для герметичных металлостеклянных спаев

Материал	ТКЛР, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	λ , Вт/(м $\cdot^\circ\text{C}$)	ρ , мк Ом $\cdot\text{см}$
Стекло:			
С87-1	8,7	0,84...1,2	—
С48-1	4,8	0,84...1,2	—
С49-2	4,9	0,84...1,2	—
Металл:			
платина	9,0	60...95	10,5
платинит	7,1 (радиальное направление)	—	5,7
ковар Н29 К17 (54% Fe, 29% Ni, 17% Co)	4,7	18...21	44
молибден	5,5	146...160	4,8...5,7
вольфрам	4,4	130...168	5,6

Рис. 4.18. Конструкция герметичного бортового РЭС (США) (а) и его внешний вид (б):

1—основание корпуса со стеклянными изоляторами и внешними выводами; 2—крышка корпуса; 3—керамическая соединительная плата; 4—стеклотекстолитовая соединительная плата; 5—подложка гибридной ИС; 6—стяжной болт; 7—эластомерный контакт для межплатной коммутации; 8—бутиловое покрытие крышки корпуса; 9—фторсодержащее жидкое вещество; 10—БИС; 11—гибкий печатный шлейф на полиимидной пленке



металлов не смачивается или плохо смачивается жидким стеклом. Металл, покрытый слоем оксида, смачивается при нагреве до температуры размягчения стекла (750...850 °С). Оксид частично растворяется в стекле и после охлаждения образуется герметичное соединение.

Ограниченно-разъемные полые оболочки. Для блоков объемом менее 3 дм³ при необходимости обеспечения небольшого (до 3...5 раз) числа разгерметизаций и повторных герметизаций (на этапе производства при настройке или на этапе эксплуатации при ремонте) используется *регенерируемый паяный или сварной шов* (рис. 4.19, 4.20).

Для вскрываемого паяного шва (рис. 4.19) размеры крышки блока должны быть меньше размеров корпуса. Для взаимной ориентации крышки и корпуса, а также для предотвращения попадания внутрь корпуса газов и флюса при пайке между крышкой и корпусом помещают резиновую прокладку, ширина которой на 0,2 мм больше ширины зазора между крышкой и корпусом. Выше прокладки располагают стальную луженую проволоку диаметром 0,8 мм. Для проникновения припоя зазоры между проволокой и стенками должны составлять 0,1...0,2 мм. Свободный конец проволоки выводится в паз, который расположен по всему периметру крышки. Назначение паза—создать условия для пропайки шва и разгрузить паяный шов от механических напряжений при изменении температуры внешней среды.

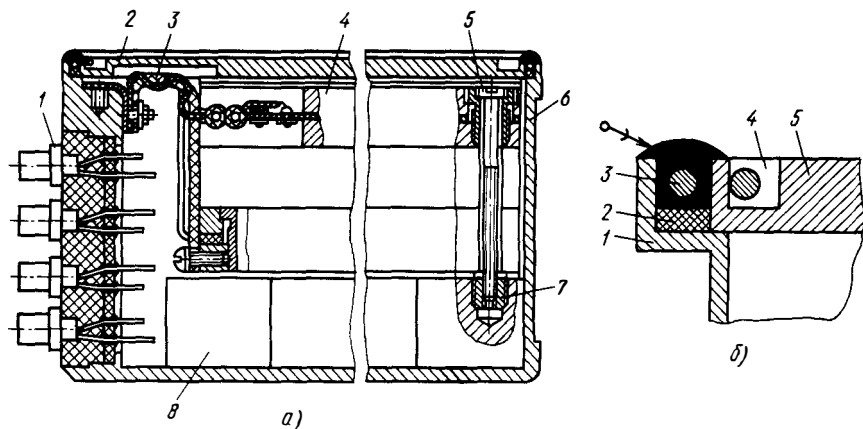


Рис. 4.19. «Книжная» конструкция блока РЭС четвертого поколения:
 а — общая компоновка: 1 — низкочастотный разъем; 2 — крышка; 3 — «ремень»; 4 — двоянная ячейка; 5 — стяжной болт; 6 — кожух; 7 — бобышка; 8 — блок питания; б — конструкция паяного шва: 1 — корпус; 2 — резиновая прокладка; 3 — стальная проволока; 4 — паз по периметру крышки; 5 — крышка

Перед пайкой крышка и корпус из алюминиевого сплава покрываются многослойным покрытием, верхний слой которого представляет собой сплав олово — висмут. Покрытие облегчает также герметизацию гермовводов и опайку соединителей (например, высокочастотных). Чтобы не нарушалась герметичность шва, наружная поверхность паяного соединения не должна являться установочной и все элементы крепления блока должны располагаться на максимально возможном удалении от паяного шва. После запайки из блока откачивается воздух и он заполняется осушенным азотом (аргоном, гелием) под давлением 0,13 МПа, что в значительной степени уменьшает натекание окружающей среды в гермокорпус через микропоры. Данный вид герметизации обеспечивает работоспособность блоков в течение 8...12 лет. К недостаткам данного метода герметизации следует

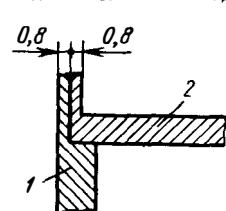


Рис. 4.20. Вариант конструкции регенерируемого сварного шва:
 1 — корпус; 2 — крышка

отнести: большую площадь, занимаемую паяным швом; ограниченное число циклов герметизации — разгерметизации; ограниченный объем блоков, для которого применим этот метод; возможность проникновения газов при пайке внутрь блока и их конденсации на компонентах.

В тех случаях, когда требуется минимизация размеров герметизирующего шва и возможно ограниченное число циклов герметизации — разгерметизации, может быть использовано *регенерируемое сварное соединение* (рис. 4.20). Свариваемые кромки имеют

увеличенный размер, а сварка осуществляется не по всей длине кромок, что позволяет удалять проваренный участок точением или фрезерованием с последующей повторной сваркой. Подвод теплоты при сварке может осуществляться лазером, электронным лучом, нагретой плазмой, электрическим током. Количество теплоты, которое необходимо подвести при сварке, примерно одинаково для различных металлов и составляет около 5 Дж на миллиграмм расплавленного металла.

При герметизации блоков паяным или сварным швом необходимо защитить от тепловых воздействий находящиеся внутри блоков компоненты, а также электрические связи и контакты. Для этого обычно используется технологический теплоотвод, основанный на поглощении выделяющейся теплоты за счет термоаккумуляции. Одна из конструкций подобных теплоотводов представлена на рис. 4.21. Его преимуществом является наличие резервуара с водой, теплоемкость которой на порядок выше теплоемкости меди. Это позволяет уменьшить габариты устройства. Повышение температуры теплоотводящего элемента и связанного с ним корпуса блока может быть определено по формуле $\Delta T = W / (m_m c_m + m_v c_v)$, где m_m , m_v — масса меди и воды соответственно, c_m , c_v — теплоемкость меди и воды соответственно [$c_m = 0,39$ Дж/(г·К); $c_v = 4,187$ Дж/(г·К)]; W — энергия, подведенная при сварке, Дж.

Герметизация соединителей. Особое внимание уделяется герметизации внешних электрических связей, осуществляемой с помощью металлостеклянных гермовводов (рис. 4.22), впаиваемых в стенку блока (рис. 4.23), опайкой соединителей (например, высокочастотных) по периметру, полимерной герметизацией низкочастотных соединителей (рис. 4.24). Гермовводы выполняются из ковара и согласованного с ним по ТКЛР стекла; наружная поверхность покрывается припоем. Для заливки разъемов в корпусе используются компаунд «Виксинт — Победа» или ПДИ-21. Корпус соединителя и печатная плата приклеиваются к корпусу гермоблока РЭС с помощью эпоксидного компаунда ЭЗК-6.

Использование полимерных материалов. В состав гермоблока может входить несколько десятков полимерных материалов: стеклотекстолит, содержащий полимерную связку; полиимидные, лавсановые и другие пленки; лакоткань; хлопчатобумажные и другие нитки; полимерная изоляция проводов; клеевые пленки; заливочные компаунды и т. д.

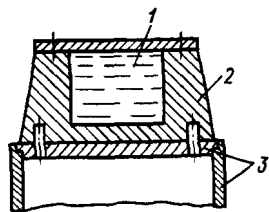


Рис. 4.21. Конструкция технологического теплоотвода при герметизации блока пайкой или сваркой:

1 — вода; 2 — медь; 3 — свариваемые детали оболочки

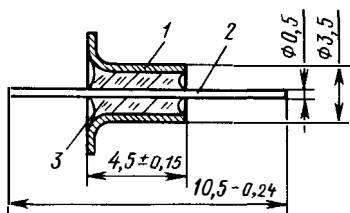


Рис. 4.22. Конструкция одного из типов металлостеклянных гермовводов:

1 — оболочка из ковара; 2 — проводник из ковара; 3 — стеклянный изолятор

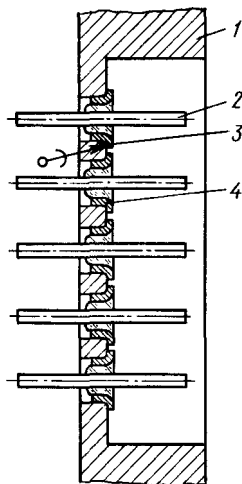


Рис. 4.23. Вариант установки гермопереходов в блоках питания:

1 — корпус; 2 — проводник из ковара; 3 — припой ПОС-61; 4 — оболочка из ковара

Большая номенклатура полимерных материалов обусловлена разнообразием предъявленных к ним требований: сцепляемости с различными материалами (адгезия), теплопроводности, виброзащитных свойств, герметизирующих возможностей, электрической прочности и т. д. Так, в качестве виброизолирующего используется компаунд КТ-102, для заливки соединителей — ПДИ-21, для крепления навесных компонентов на коммутационные платы из полиимидной пленки — клей МК-400, на ситалловые подложки — клей ВК-9, а для компонентов площадью более 3 мм — клей КВК-68 и т. д.

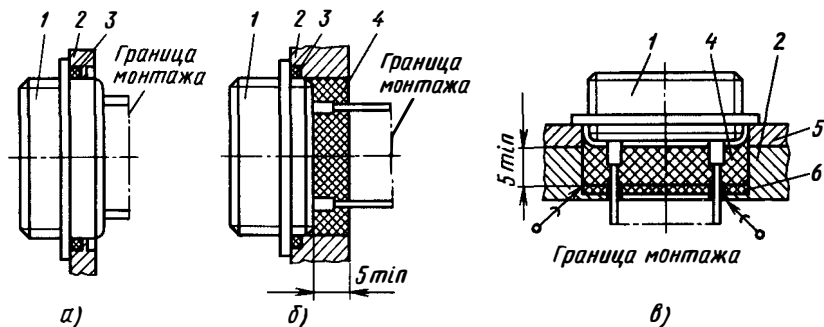


Рис. 4.24. Варианты герметизации вилки соединителя типа РСГ с помощью уплотнительной прокладки (а), уплотнительной прокладки и компаунда (б), печатной платы и заливки компаундом (в):

1 — вилка соединителя; 2 — корпус блока; 3 — уплотнительная прокладка; 4 — компаунд; 5 — дистанционная прокладка; 6 — печатная плата

Общая масса полимеров в составе конструкции гермоблока может достигать десятков-сотен граммов. Это обуславливает наличие в них значительного количества влаги (см. табл. 4.1). С течением времени, а также при повышении температуры влага может диффундировать во внутреннюю среду гермоблока, а при понижении температуры — конденсироваться на компонентах и стенках (в том числе прозрачных) гермоблока. Удалить влагу из полимеров путем нагрева или вакуумирования часто не удается ввиду длительности процесса и недопустимости нагрева некоторых материалов (например, припоя Sn — Bi, служащего для покрытия корпусов из алюминиевого сплава).

Способы снижения содержания влаги в гермокорпусе РЭС. Существует несколько способов, позволяющих снизить количество влаги в гермокорпусе или предотвратить ее конденсацию: предварительная осушка внутренней среды в процессе производства или осушка при эксплуатации с помощью влагопоглотителей; принудительная конденсация влаги с помощью термобатарей в местах, где компоненты отсутствуют; использование сильфонных устройств, изменяющих внутренний объем гермоблока (давление в нем) при изменении температуры; соединение внутренней области гермоблока с вакуумом (в космосе); использование в конструкции материалов с минимальным влагопоглощением. Наиболее эффективным способом осушки в период эксплуатации является использование влагопоглотителей, так как термобатареи имеют значительную массу и энергопотребление; сильфонное устройство имеет значительные габариты (изменение объема на 3,5% компенсирует изменение температуры на 10%); наличие даже 0,1 г лака при влагосодержании 1% создает концентрацию влаги, при объеме блока несколько кубических дециметров достаточную для ее конденсации при охлаждении до температуры — 60 °С (см. § 4.1).

В аппаратуре первых поколений для поглощения влаги применялись патроны с силикагелем (рис. 4.25), представляющим собой высушенный гель ангидрида кремниевой кислоты. Для поглощения влаги могут применяться и другие вещества: фосфорный ангидрид, активированный оксид алюминия Al_2O_3 , активированные угли, цеолиты и т. д. Наиболее перспективными влагопоглотителями являются цеолиты (от греч. *zeo* — кипеть, *lithos* — камень, «кипящий камень»), обладающие высокой скоростью поглощения влаги и равномерной поглощающей способностью (0,062...0,12 г/см³) до почти полного насыщения, работоспособностью в диапазоне температур — 100...+100 °С, спо-

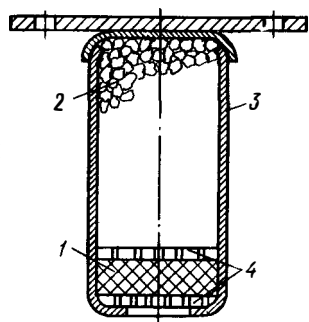


Рис. 4.25. Патрон влагопоглотителя с силикагелем:

1 — гигроскопическая вата;
2 — силикагель; 3 — патрон;
4 — сетка

способностью поглощать не только влагу, но и агрессивные компоненты, выделяющиеся из полимеров (для этого размер окон пор в цеолите должен превышать минимальный размер молекулы поглощаемого вещества). Если размер молекул агрессивных компонентов больше размера молекул заполняющего блок инертного газа, то цеолит поглотит и инертный газ, и влагу и создаст в гермоблоке вакуум.

Наиболее надежной является вакуумированная конструкция гермоблока при полном отсутствии в ней полимеров. Однако по технологическим (экономическим) соображениям такое решение не всегда приемлемо. Наиболее распространены следующие типы цеолитов: КА, имеющий диаметр входного окна пор 0,3 нм, NaA — диаметр 0,4 нм, СаА — 0,5 нм, СаХ — 0,8 нм, NaХ — 0,9 нм. Для поглощения влаги в гермоблоках, заполненных азотом, может быть использован цеолит типа NaA (он не поглощает азот). Цеолит NaХ поглощает высокомолекулярные нефтяные и ароматические углеводороды и все вещества с меньшим размером молекулы. Зная влагосодержание входящих в состав конструкции гермоблока полимеров, можно рассчитать требуемое для поглощения влаги количество цеолита.

Для блоков, объем которых превышает 3 дм³, целесообразно использовать *разъемные полые оболочки с прокладками*, что допускает большее истечение (натекание) газа ввиду большего объема блока (для прокладок из лучших эластомеров течь составляет $10^{-3} \dots 10^{-7}$ дм³·Па/с на метр прокладки) и позволяет значительно снизить массу блока по сравнению с массой блока, герметизированного паяным швом (при объеме блока, меньшем 3 дм³, этому мешает большая масса стягивающих болтов).

Использование прокладок упрощает герметизацию и разгерметизацию блока, что актуально как на этапе производства (при регулировке и настройке), так и на этапе эксплуатации (при ремонте). На этапе производства это особенно актуально для сложных блоков, в которых необходимо заменять компоненты при регулировке или при выходе их из строя на испытаниях. При эксплуатации герметизация с помощью прокладок наиболее эффективна для блоков многоразового пользования, конструкция которых должна быть ремонтпригодна. В качестве материала уплотняющих прокладок можно использовать полимеры (резина, пластмасса), металлы (медь, алюминий, свинец, индий).

Наибольшее применение для герметизации блоков РЭС нашли резиновые прокладки из силиконовых резин (ИРП-1265, ИРП-1266, ИРП-1399, ИРП-1401 и др.), которые обладают повышенной влагостойкостью, термостойкостью в диапазоне температур — 60...+250 °С, повышенной теплопроводностью (особенно при наличии наполнителей из оксида цинка, нитрида бора и т. д.).

Для изготовления пластмассовых прокладок применяют полиамиды (П-54 и др.), этиленпласты (полиэтилен и др.), пластифицированные винилпласты, полиформальдегиды, фторопласты и т. д. Преимуществами уплотняющих прокладок из пластмасс являются их низкая стоимость и стойкость в агрессивных средах. К недостаткам следует отнести низкую температурную стойкость и не всегда достаточную упругость. Так, прокладки из фторопласта-4 из-за низкой упругости и большой текучести необходимо периодически подтягивать для обеспечения усилия прижима не менее 300 Н/см^2 . Металлические прокладки из меди, алюминия, индия работают при температурах до $-250...+150 \text{ }^\circ\text{C}$. Недостатком прокладок из свинца и индия является возможность только одноразового использования из-за деформации при установке.

Резиновые прокладки (рис. 4.26) могут быть с *самоуплотнением* (прокладка из резины, помещенная в гнездо, сжимается на некоторую, строго регламентированную величину — натяг — так, чтобы гнездо не было полностью заполнено прокладкой) и с *принудительным уплотнением* (прокладка сжата давлением, превышающим давление окружающей среды). В первом случае фланцы смыкаются плотно (рис. 4.26, а), а натяг обеспечивается размерами гнезда, во втором (рис. 4.26, б) — фланцы смыкаются не плотно, а натяг определяется затяжкой фланцевых болтов.

Для гермоблоков РЭС, имеющих внутри избыточное давление заполняющего инертного газа и требующих жесткого соединения крышки с корпусом для обеспечения надежности работы в условиях вибрации, используется герметизация с самоуплотне-

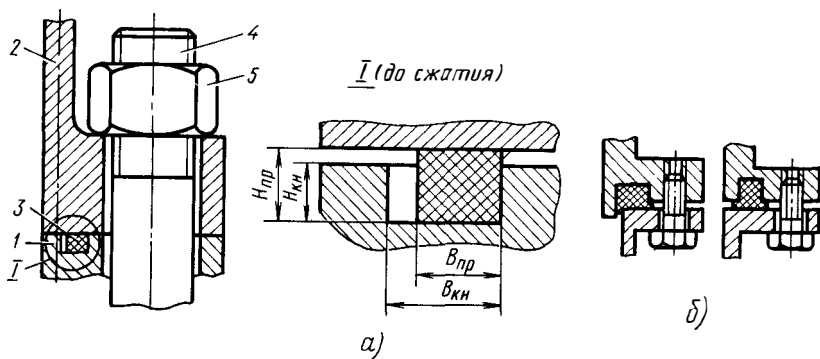


Рис. 4.26. Герметизация корпуса блока с помощью резиновой уплотнительной прокладки:

а — конструкция с самоуплотнителем: 1 — основание блока; 2 — крышка блока; 3 — прокладка; 4 — болт; 5 — гайка; б — варианты конструкции с принудительным уплотнением

нием. В этом случае размеры канавки и прокладки находятся в следующей зависимости: $B_{\text{кн}} H_{\text{кн}} \approx 1,15 B_{\text{пр}} H_{\text{пр}}$, где $B_{\text{кн}}$ и $H_{\text{кн}}$ — ширина и высота канавки; $B_{\text{пр}}$ и $H_{\text{пр}}$ — ширина и высота прокладки.

В случае принудительного уплотнения резиновыми прокладками, работающими при значительном перепаде температур, необходимо рассчитать допустимый зазор между корпусом и крышкой (из условия невытекания резины) и усилие затяжки. Зазор может быть определен по табл. 4.8, а усилие затяжки — по диаграмме рис. 4.27. Выбирая наименьшее напряжение в резине при минимальной температуре (например, 5 МПа при -10°C), определяем точку *a*. Если максимальная температура $+60^\circ\text{C}$, то, проведя линию, параллельную базовой, до значения $+60^\circ\text{C}$ (точка *b*), можно определить, что при этой температуре напряжение в резине будет 83 МПа, а усилие затяжки (при $+25^\circ\text{C}$) необходимо обеспечить (точка *в*) около 40 МПа. Эти данные позволяют определить конструкционные параметры гермосоединения.

Резина обладает свойством релаксации — постепенного падения внутренних напряжений при неизменной деформации (через 20 мин напряжение снижается на 14%, через двое суток — на 25% и стабилизируется). При повторном обжатии релаксация уменьшается (6% за 20 сут). Поэтому узел уплотнения следует подтягивать через 2 сут после сборки. Срок службы резиновых прокладок составляет 3 года (2...5 лет), после чего их заменяют.

Примеры конструкции уплотняющих узлов блоков РЭС представлены на рис. 4.28. Если корпус выполнен из алюминиевого сплава, то резьба в нем выполняется в виде запрессованных титановых втулок (рис. 4.28, б). Для быстрой разборки блока можно использовать накладные прижимные устройства (рис. 4.28, в).

Оценка степени герметичности гермоблока РЭС. Получить в производстве абсолютно герметичный блок не представляется возможным. Поэтому необходимо оценивать степень герметичности, которая характеризуется течью: большой (больше 10^{-3} $\text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$), средней ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ $\text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$), малой (менее $10^{-5} \dots 10^{-8}$ $\text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$). Предельную чувствительность различных методов контроля степени герметичности иллюстрирует рис. 4.29. Большие течи можно определить,

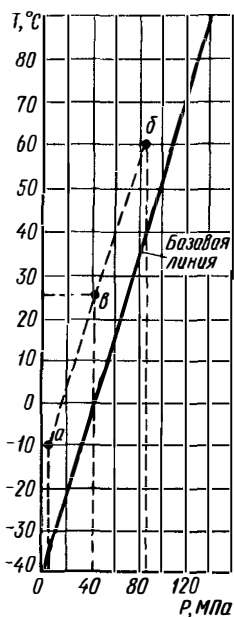


Рис. 4.27. Зависимость между температурой и напряжением резины в замкнутом объеме

Упругие свойства резины при различных зазорах

Твердость резины по Шору	Зазор, мм, при давлении среды P_c , МПа						
	10	20	30	40	50	60	80
30	0,5	0,3	0,25	0,25	0,2	0,15	0,1
45	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,13
60	—	—	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
80	—	—	—	—	0,5	0,5	0,4

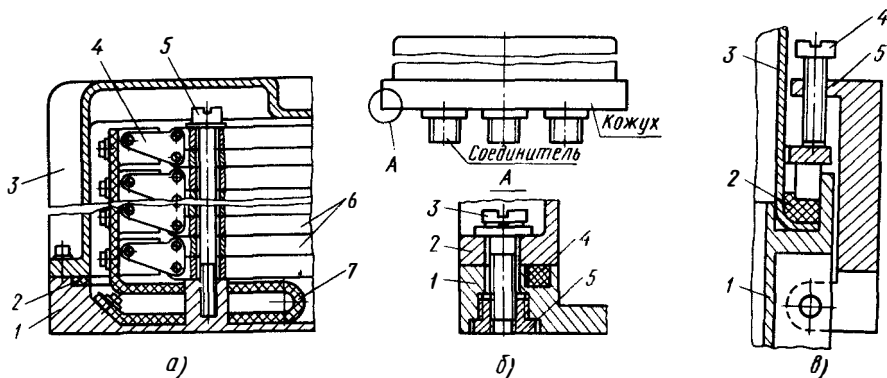


Рис. 4.28. Конструкции гермоблоков:

а—с шарнирным креплением ячеек и уплотняющей прокладкой во внутреннем объеме блока: 1—дно корпуса; 2—прокладка; 3—орезиненный кожух (крышка); 4—шарнир; 5—стягивающий винт; 6—ячейка; 7—перфорированный ремень; *б*—конструкция стяжного узла с титановой резьбовой втулкой: 1—корпус из алюминиевого сплава; 2—крышка корпуса; 3—стягивающий винт; 4—резиновая прокладка; 5—титановая резьбовая втулка; *в*—быстросъемное прижимное устройство: 1—корпус; 2—прокладка; 3—кожух; 4—винт; 5—поворотный рычаг

помещая герметизированный блок в нагретый этиленгликоль или керосин на глубину не менее 2,5 см. Воздух при нагревании расширяется и выходит в виде пузырьков; чувствительность этого метода $2 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$. Можно подавать в испытываемый гермоузел воздух под давлением $(10 \dots 12) \cdot 10^5 \text{ Па}$. По скорости образования пузырьков и их размерам можно ориентировочно определить место и течь. Средние течи можно определить с помощью индикаторной жидкости, в которую погружается предварительно опрессованный во фреоне под давлением $(2 \dots 6) \cdot 10^5 \text{ Па}$ гермоузел.

Малые течи определяются масс-спектрометрическим или радиационным методом. При масс-спектрометрическом методе течь определяется с помощью гелиевых течеискателей типа ПТИ-7, СТИ-11, имеющих чувствительность $10^{-12} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па}/(\text{с} \cdot \text{мВ})$. Полимерные оболочки этим методом не проверяются, так как они

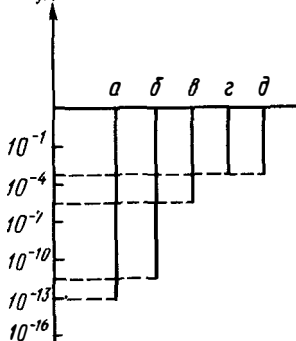
$Q, \text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ 

Рис. 4.29. Предельная чувствительность различных методов контроля герметичности:

a — радиоактивный метод; *б* — масс-спектрометрический метод; *в* — метод повышенного давления; *г* — погружение в жидкость; *д* — омыливание

могут сорбировать гелий, находящийся в атмосфере. Недостатком метода является низкая производительность, особенно в случае малых течей, что требует увеличения времени измерения. Радиационный метод (чувствительность $10^{-13} \text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$) состоит в предварительной опрессовке гермоблока в изотопе Kг_{85} и индикации степени истечения изотопа счетчиком Гейгера. Так как получить абсолютно герметичный шов практически невозможно, то после герметизации блок заполняется каким-либо осушенным инертным газом (азотом, аргоном, гелием) под избыточным давлением ($0,03 \dots 0,06 \text{МПа}$). Выравнивание давления в гермокорпусе и наружной среде происходит в течение $8 \dots 10$ лет, что препятствует натеканию влаги из внешней среды внутрь гермокорпуса (при наличии снаружи парциального давления паров влаги, большего, чем внутри гермокорпуса, и при размере микропор, большем диаметра молекул влаги, влага может натекать из внешней среды внутрь гермокорпуса даже при наличии в нем избыточного давления осушенного инертного газа). Увеличение давления заполняющего гермокорпус газа способствует увеличению времени защиты от внешней среды, но оболочка корпуса должна быть более прочной и, следовательно, более массивной.

Допустимое истечение из гермокорпуса ($\text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$) может быть определено по формуле $Q = V \Delta P / \Delta t$, где ΔP — начальное избыточное давление газа внутри гермоблока, Па; Δt — время хранения и работы блока, с; V — объем блока, дм^3 . Если, например, $V = 0,5 \text{дм}^3$, $\Delta P = 0,3 \cdot 10^5 \text{Па}$, $\Delta t = 2,5 \cdot 10^8 \text{с}$ (8 лет), то $Q = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Если мал объем, заполненный газом, или велико истечение, то гермокорпус не обеспечит надежной работы в течение заданного времени. В этом случае надо либо обрабатывать технологический процесс герметизации с целью уменьшения течи, либо увеличивать объем оболочки, либо повышать начальное давление в ней. Второй и третий пути не являются эффективными, так как ведут к увеличению габаритов или массы гермоблока. Приемлемыми считаются следующие течи для блоков с различным свободным объемом: $10^{-7} \text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ (объем $0,1 \dots 0,4 \text{дм}^3$), $10^{-4} \dots 10^{-5} \text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ (объем $0,5 \dots 5 \text{дм}^3$), $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ (объем более 5дм^3). Течь для разьема типа РПС-1 не должна превышать $10^{-10} \text{дм}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

В некоторых случаях уменьшить течь через микропоры в паяных и сварных швах можно с помощью анаэробных герметиков, обладающих уникальными свойствами: в течение нескольких лет они могут храниться в жидком состоянии в присутствии кислорода воздуха и быстро полимеризоваться при нарушении контакта с кислородом и наличии активатора; при этом образуется прочный полимерный слой. Ввиду малой вязкости (0,01 Па/с) анаэробные герметики могут затекать в любые зазоры и неровности и не требуется значительных усилий при сборке соединений и их разборке после полимеризации.

Обеспечение электрической прочности РЭС. Влагозащита тесно связана с проблемой обеспечения электрической прочности РЭС, особенно актуальной для мощной передающей аппаратуры, в которой используются высокие питающие напряжения и широкий спектр частот сигналов (от нескольких мегагерц до нескольких гигагерц), а также для элементов в интегральном исполнении и печатных плат, где зазоры между токоведущими дорожками малы и напряженность электрического поля может достигать больших значений при небольших напряжениях. Кроме того, пробивное напряжение снижается при пониженном давлении газа, при повышении температуры диэлектрика, при сорбции влаги пылью и полимерными материалами.

Явление образования под действием электрического поля проводящего канала в диэлектрике называют *электрическим пробоем*. У твердых диэлектриков кроме пробоя по объему возможен пробой по поверхности в окружающей среде (газе или жидкости). После пробоя газообразного или жидкого диэлектрика свойства нарушенного участка обычно восстанавливаются (если пробой не охватил весь объем), а в твердом диэлектрике остается след в виде пробитого, прожженного или проплавленного отверстия чаще всего неправильной формы.

Газ сам по себе — идеальная изоляция, сопоставимая по свойствам с вакуумом, пока в нем не появятся свободные заряды (электроны, ионы), создающие ток. Появление свободных зарядов является следствием ионизации: ударной (под действием электрического поля), термической, под воздействием излучения (ультрафиолетового, рентгеновского, гамма-излучения).

Зависимость пробивного напряжения воздуха от произведения длины пробивного промежутка на давление в нем характеризуется кривой Пашена (рис. 4.30). Кривая имеет минимум при малых давлениях газов. Поэтому для обеспечения электрической прочности при пониженном давлении (например, для аппаратуры, работающей на больших высотах, и для компонентов внутри вакуумированного гермокорпуса) необходимо увеличивать расстояние между токоведущими элементами в $K_{увз}$ раз (рис. 4.31) или заполнять гермоблоки инертным газом под избыточным давлением (например, азотом под давлением 0,13 МПа).

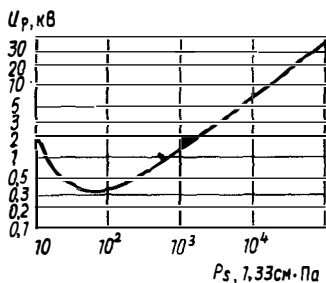


Рис. 4.30. Кривая Пашена $U_p = f(P_s)$ для разрядного напряжения воздушного промежутка s с равномерным полем при $T = 20^\circ \text{C}$

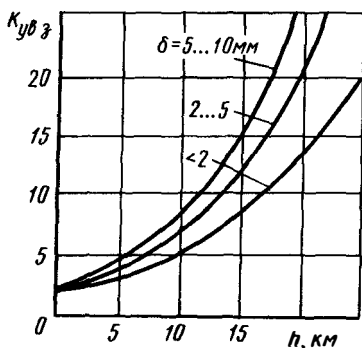


Рис. 4.31. Зависимость коэффициента увеличения зазора $K_{увз}$ между компонентами РЭС от высоты над уровнем моря h при различных зазорах δ

Для твердых диэлектриков существенное значение имеет поверхностный пробой. Напряжение пробоя зависит от природы окружающей диэлектрик среды, содержания влаги, формы электродов и наличия загрязнений на поверхности диэлектрика и веществ, способных поглощать влагу (например, пыли). Для повышения пробивного напряжения платы покрывают лаком, исключают острые углы при трассировке печатных проводников, проводят сушку плат перед нанесением лака, следят за содержанием пыли и влаги в газовой среде технологических помещений. В твердом диэлектрике может произойти электрический или тепловой пробой. Последний может возникнуть при повышении температуры диэлектрика или частоты сигнала, увеличивающих ионизацию молекул диэлектрика (рис. 4.32).

Одним из методов повышения пробивного напряжения деталей из твердых диэлектриков является увеличение длины пробивного промежутка благодаря установке дополнительных ребер (высоковольтные изоляторы). Расчет ожидаемого пробивного напряжения осуществляется с учетом давления, температуры, частоты сигнала, влажности, формы электродов. Для подводной аппаратуры и аппаратуры в герметичном исполнении предусматриваются установка влагопоглотителей, заполнение кремнийорганической пастой с наполнителем из цеолита, ограничение времени непрерывной работы под водой (например, до пяти лет).

Технологичность конструкции влагозащиты. Трудоемкость обеспечения влагозащиты составляет 20...45% общей трудоемкости изготовления РЭС. Технологичность влагозащитной конструкции определяется: выбором наиболее экономичного метода влаго-

защиты для данных условий эксплуатации и $U_{пр}$ производства; уровнем типизации и унификации выбранного конструктивного решения; правильностью выбора материалов, методов их обработки; приспособленностью конструкции к механизации и автоматизации производства (в том числе с использованием ГПС). Если РЭС эксплуатируется в отапливаемых помещениях (бытовая аппаратура, ЭВМ широкого применения), то наиболее экономичной является влагозащита компонентов и узлов с помощью полимерных монокристаллических оболочек при отсутствии общей герметизации устройства.

В случае повышенных требований к герметичности компонентов, интенсификации теплоотвода, обеспечения электромагнитного экранирования целесообразно использовать более дорогие металлокерамические, керамические (покрытые слоем металла) или металлоглазурные оболочки. При этом должны приниматься меры по защите от влаги элементов электрических соединений. Корпус РЭС в этом случае может быть негерметичным. Если в составе РЭС имеются бескорпусные компоненты (обычно это бортовые РЭС), то изделие выполняется в виде гермоблока. Это дает эффект при эксплуатации благодаря уменьшению затрат на транспортировку и ремонт РЭС.

На выбор влагозащитной конструкции большое влияние оказывает объем производства. Для единичного или мелкосерийного производства могут быть выбраны методы, не требующие дорогого оборудования и специального оснащения: обволакивание окунанием или пульверизацией, заливка, пропитка, обработка корпусных деталей на универсальном оборудовании или станках с ЧПУ. При массовом производстве необходимо использовать высокопроизводительные методы: обволакивание вихревым методом, опрессовку полимерами, обработку корпусных деталей штамповкой, прессованием, литьем под давлением. Технологичность влагозащитной конструкции повышается при использовании типовых конструкций, технологические процессы изготовления которых хорошо оснащены и отработаны. Особое внимание уделяется типизации конструкции всех деталей, в том числе откатных и резьбовых втулок, теплоотводящих рамок, деталей уплотнений. Существенное влияние на технологичность конструкции оказывают материалы конструкции с точки зрения пригодности их для того или иного вида обработки (например, для фрезерования наиболее целесообразно использовать сплав Д16, а для литья под давлением — какой-либо литейный сплав), токсичности (ис-

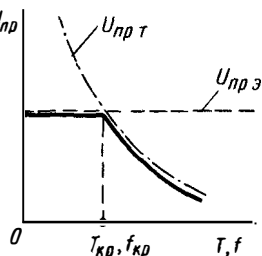


Рис. 4.32. Зависимость пробивного напряжения твердого диэлектрика от температуры и частоты (тепловой пробой):

$U_{пр \epsilon}$ — напряжение электрического пробоя; $U_{пр \tau}$ — напряжение теплового пробоя

пользование токсичных материалов, например оксида бериллия или компаунда КТ-102, удорожает производство), физико-химических свойств. Так, использование в конструкции РЭС материалов с высоким влагопоглощением (хлопчатобумажных и шелковых нитей) требует уменьшения влажности воздуха на участке сборки.

При выборе материалов для влагозащиты необходимо учитывать воздействие на них технологических факторов. Так, последующие пайки должны либо выполняться более легкоплавкими припоями, чем предыдущие, либо должен быть осуществлен технологический теплоотвод при очередной пайке. Для заливки целесообразно использовать марки пенопласта, не требующие нагрева для вспенивания.

Особое внимание следует обратить на то, чтобы исключить из конструкции гермоблоков полимеры с агрессивными или летучими компонентами. Для этого желательно применять полимерные материалы без растворителей (например, эпоксидные смолы), но при этом надо учитывать и другие их свойства (внутренние напряжения после полимеризации, химическую активность и т. д.). Агрессивность некоторых полимерных материалов характеризуется данными, приведенными в табл. 4.9. Нецелесообразно применение таких материалов, как эмаль МЛ-125, полиамид П-68, гетинакс в герметизированном объеме блоков, а также мастики типа ЛН при приклеивании проводов, которая при температуре выше $+85^{\circ}\text{C}$ и повышенной влажности интенсивно выделяет молекулы соляной кислоты. Ее менее агрессивным заменителем является мастика типа ГИПК-23-12. Летучие компоненты могут привести к повышению давления внутри

Таблица 4.9

Состав водных вытяжек некоторых полимерных материалов

Наименование материала	Количество коррозионно-активных веществ, выделяемых материалом, 10^3 мг/дм ²					Качественные реакции			pH
	муравьиная кислота	уксусная кислота	аммиак	фенол	формальдегид	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	O ₃ ⁻	
Эмаль МЛ-125	1410,9	81,55	237,1	—	59,7	—	—	—	4,5
Лак УР-231	430,6	—	38,1	—	0,29	—	—	—	6,0
Эмаль ЭП-51	161,2	—	126,2	7,5	0,89	—	—	—	8,35
Лак Э-4100	155,1	—	124,8	7,4	0,86	—	—	—	8,45
Эмаль ПФ-115	896,1	—	129,9	—	3,1	—	—	—	6,1
Полиамид П-68	2724,6	—	157,9	—	1,75	—	—	—	6,75
Гетинакс	602	—	1018	4190	0,11	+	+	+	5,76
Текстолит	403	—	507	487	0,05	+	+	+	8,06
Стеклотекстолит	160	—	393	144	Следы	—	+	+	8,56

полой оболочки и возникновению пор. При разработке конструкции влагозащиты учитываются требования общесоюзных и отраслевых стандартов.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите источники влаги, действующие на РЭС.
2. Назовите пути проникновения влаги в гермокорпус.
3. Каковы механизмы взаимодействия влаги с органическим веществом?
4. Какие свойства влаги наиболее влияют на параметры РЭС?
5. Каковы механизмы взаимодействия влаги с неорганическим веществом?
6. Какие внезапные и параметрические отказы РЭС вызывает воздействие влаги?
7. Перечислите известные способы защиты РЭС от влаги.
8. Перечислите виды монолитных влагозащитных оболочек. Какова их применимость?
9. Перечислите виды полых влагозащитных оболочек и области их применения.
10. Как влияет конструкция влагозащитных оболочек на объем, стоимость и массу РЭС?
11. Какие дополнительные функции выполняют влагозащитные оболочки?
12. Перечислите пленочные методы защиты от влаги полупроводниковых фрагментов.
13. Назовите области применения методов влагозащиты с помощью пропитки, заливки, обволакивания, опрессовки.
14. Каким образом осуществляется антикоррозионная защита от влаги несущих конструкций РЭС из металлов и сплавов?
15. Как рассчитать время влагозащиты монолитной полимерной оболочки?
16. Как рассчитать время влагозащиты полый полимерной оболочки?
17. Что такое согласованные гермоспаи?
18. Какова конструкция регенерируемых паяного и сварного шва?
19. Перечислите материалы, используемые в качестве влагопоглотителей.
20. Перечислите материалы, используемые для герметизирующих прокладок.
21. Какова специфика конструкции герметизации резиновыми прокладками с самоуплотнением и с принудительным уплотнением?
22. Как рассчитать допустимую негерметичность гермоблока?
23. Как измерить течь гермоблока?
24. Поясните специфику обеспечения электрической прочности газообразных и твердых диэлектриков.
25. Как обеспечить технологичность влагозащитной оболочки РЭС?

ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

§ 5.1. Влияние динамических механических воздействий на надежность и качество РЭС

Виды и источники механических воздействий. В процессе производства, эксплуатации и хранения РЭС могут испытывать те или иные механические динамические воздействия, количественно характеризуемые диапазоном частот колебаний, а также их амплитудой, ускорением, временем действия. Качественно все виды механических динамических воздействий делятся на вибрационные (вибрации), ударные (удары), инерционные (линейные ускорения). Под *вибрацией* РЭС обычно понимают длительные знакопеременные процессы в ее конструкции, которые влияют на работу РЭС. *Ударом* называют кратковременное воздействие, длительность которого примерно равна двойному времени распространения ударной волны через объект, подвергшийся удару. Удар сопровождается конечным изменением скорости движения тела за время удара. В момент удара происходит колебание системы на вынужденной частоте, определяемой длительностью удара, а после него — на собственной частоте конструкции.

Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне и торможении), а также при движении по криволинейной траектории (центробежное ускорение). В процессе работы может изменяться значение и направление линейного ускорения (например, при выключении стартового двигателя ракеты). Результат воздействия линейных ускорений на РЭС может носить характер динамический (при изменении ускорения до установившегося значения) или статический (после достижения установившегося значения).

Механические воздействия характеризуются перегрузкой n , которая кратна ускорению силы тяжести g . Вибрации характеризуются также амплитудой колебаний и их частотой, а удар — длительностью, амплитудой и формой ударного импульса. Перегрузка объекта при вибрации выражается коэффициентом виброперегрузки $n_{\text{вбр}} = x f^2 / 250$, где x — амплитуда вибраций объекта, мм; f — частота колебаний, Гц. Амплитуда перегрузки ударного импульса, характеризующая максимальное значение ударного ускорения, может быть определена по формуле $n_{\text{уд}} \approx 0,05 V_{\text{уд}} / S$,

где S — перемещение соударяющихся тел с учетом амортизации, мм; $V_{уд}$ — мгновенная скорость в момент удара, мм/с.

При перемещении по криволинейной траектории (например, при маневрировании летательного аппарата) линейное центробежное ускорение может быть определено по формуле $n_{ли\ цб} = 4 \cdot 10^{-3} R f_{об}^2$, где $n_{ли\ цб}$ — линейная центробежная перегрузка при вращении; R — радиус вращения, мм; $f_{об}$ — частота равномерного вращательного движения, Гц.

Параметры механических динамических воздействий на РЭС для различных условий эксплуатации согласно отечественным и зарубежным данным приведены в табл. 5.1. *Источниками механических воздействий* могут быть: вибрации движущихся частей двигателя и движителя из-за несбалансированности их частей и наличия зазоров; акустические колебания, вызванные взаимодействием турбулентных газовых потоков с корпусом реактивного двигателя; перегрузки при маневрировании; неровности дорог и стыки рельсов; аэродинамические и гидродинамические воздействия окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы и т. д.); взрывные воздействия; небрежность или неосторожность обслуживающего персонала (падение РЭС, удары при погрузочно-разгрузочных работах и пр.).

Механические динамические нагрузки, воздействующие на РЭС, могут вызвать большие механические напряжения в их элементах (компонентах), нарушить нормальные режимы работы или даже привести к выходу из строя тех или иных частей РЭС. Согласно проведенным в США исследованиям, от 22 до 41% отказов самолетного оборудования были вызваны действием механических нагрузок, а число отказов бортовых ЭВМ вследствие механических воздействий достигает 50%.

Влияние механических воздействий на РЭС. В результате воздействия вибраций, ударов и линейных ускорений могут иметь место следующие *повреждения* РЭС: нарушение герметичности вследствие разрушения паяных, сварных и клеевых швов и появления трещин в металlostеклянных спаях; полное разрушение корпуса РЭС или отдельных его частей вследствие механического резонанса или усталости; обрыв монтажных связей, в том числе внешних выводов ИС; отслоение печатных проводников; отрыв навесных ЭРЭ; расслоение многослойных печатных плат; поломка (растрескивание) керамических и ситалловых подложек; временный или окончательный выход из строя разъемных и неразъемных электрических контактов (в реле, соединителях, цепях заземления, экранирования и т. д.); модуляция размеров волноводных трактов, коаксиальных кабелей, конденсаторов переменной емкости, колебательных контуров, электровакуумных приборов; изменение паразитных связей; смещение положения органов настройки и управления; выход из строя механических узлов (подшипников, зубчатых пар, крепежа и т. д.).

Под влиянием механических воздействий может произойти

Параметры механических воздействий на РЭС

Условия работы	Вибрация		
	частота, Гц (возможный диапазон)	амплитуда, мм (возможный диапазон)	перегрузка
Стационарные помещения: влияние соседнего оборудования сейсмические колебания при атомном взрыве взрыв снаряда	10...55 1,4...4,6	150...250	До 2
Переносные РЭС	10...2000		До 10
Транспортные средства: гусеничный транспорт	20...2000 (400...7000)	0,05	До 10
автомобильный транспорт	0...15 (200)	10...40 (0,5)	До 40 (до 2)
железнодорожный транспорт	2...3 (100)	до 40 (до 2)	
водный транспорт:			
корпус	1...15	1,5...3	
мачты	0...15	До 40	
винты	18...25 (400)	До 2	
двигатель	До 150 (2000)	0,1	
авиационный транспорт:			
с поршневым двигателем	5...150	0,15	
с реактивным двигателем	5...500 (2000)	25...0,15	
ракеты:			
большие	10...3000		До 40
малые	50...5000		До 30
Падение РЭС с высоты 30...50 см на бетонный пол			
Выстрел снаряда:			
из танковой пушки			
из 155-мм гаубицы			
Взрыв торпеды в подводной части корабля			

изменение параметров полупроводниковых приборов: вольт-амперных характеристик диодов с барьером Шотки, транзисторов и других приборов; емкости и напряжения пробоя *p-n*-переходов, некоторых характеристик диодов Ганна, коэффициента усиления транзисторов, длины волны излучения полупроводникового лазера и т. д. В основе этих изменений лежат явления смещения энергетических уровней, изменения ширины запрещенной зоны при деформации; эффективной массы, времени жизни и подвижности носителей тока.

Механические воздействия на РЭС могут привести к изменению

Удар		Перегрузка при линейном ускорении	Акустическое воздействие	
перегрузка (возможный диапазон)	длительность, с		частота, Гц	мощность, дБ
До 5				
200...400 До 50				
200...400 До 50		До 6		
200...400 (1200...2000)		До 6 (при волнении)		
15...30	0,01...0,1		150...9600	До 165
		До 5	150...9600	До 165
До 50 До 100 550	0,06	5...15 30...50	150...9600 150...9600	До 165 До 165
2000...6000 + 9000...-1500 1200...2000	0,067...0,025			

диаграммы направленности антенн, сбоям цифровых устройств, снижению чувствительности и смещению частотного диапазона приемников, повышению энергопотребления (при коротком замыкании), снижению точности работы. Это наиболее вероятно в тех случаях, когда компоненты РЭС одновременно подвергаются различным воздействиям: вибрациям, ударам, линейным ускорениям, монтажным усилиям (затяжка винтов), возникшим в результате полимеризации внутренним напряжениям в полимерах и напряжения в структурах из-за различия ТКЛР материалов и изменения температуры.

Наибольшую опасность представляют резонансы отдельных компонентов и узлов, возникающие в случаях, когда их собственная частота (f_0) совпадает с частотой действующих на аппаратуру вибраций (f). Собственная частота компонентов и узлов конструкции может быть определена по формуле $f_0 = (1/2\pi) \sqrt{K/m}$, где K — коэффициент жесткости конструкции, Н/м, определяемый как отношение силы к деформации, вызванной этой силой; m — масса конструкции, кг. Поведение конструкции при воздействии механических колебаний зависит от соотношения действующей и собственной частот конструкции, называемого коэффициентом расстройки: $\gamma = f/f_0$. Для виброизолирующих систем коэффициент расстройки стараются выбрать более 1,41, а для жесткозакрепленных компонентов — равным 0,8...0,3. При $\gamma = 1$ режим соответствует резонансному. Одной из основных причин вибраций и резонансов является наличие зазоров между деталями и люфтов в соединениях. Чем выше частота колебаний, тем при меньшем зазоре может возникнуть резонанс. Зоны контакта деталей при их соударении являются центрами возбуждения механических колебаний.

Защита РЭС от механических воздействий осуществляется следующими группами методов: 1) уменьшается интенсивность источников механических воздействий (путем их балансировки, уменьшения зазоров, виброизоляции самого источника механических воздействий); 2) уменьшается величина передаваемых РЭС воздействий (путем его виброизоляции, демпфирования, устранения резонансов, активной виброзащиты с помощью эксцентриков, маятников, гироскопов); 3) используются наиболее прочные и жесткие компоненты и узлы.

Методы первой группы применяют специалисты по двигателям и транспортным средствам. Методы второй и третьей групп используют конструкторы РЭС, однако методы активной виброзащиты имеют ограниченное применение по причине высокой сложности и низкой надежности технических решений.

Устойчивость РЭС к механическим воздействиям принято характеризовать ее вибропрочностью и виброустойчивостью. Первая характеристика связана с транспортной вибрацией (аппаратура выключена), вторая — с эксплуатационной (аппаратура включена). Вибропрочностью называют способность конструкции противостоять разрушающему воздействию вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений (не должно происходить силовых и усталостных разрушений). Виброустойчивостью называют способность конструкции РЭС выполнять свои функции при вибрации в заданных диапазонах частот и ускорений (не должно происходить изменения параметров РЭС: чувствительности, мощности излучения, паразитной модуляции, перемежающихся отказов и т. д.). Под прочностью понимают способность конструкции выдерживать нагрузки без остаточной деформации и разрушения.

Повышение прочности в ряде случаев связано с увеличением массы конструкции или использованием дорогих и дефицитных материалов (титана, легированных сталей, бериллиевых сплавов и т. д.), сложной технологии их обработки (магниевого, бериллиевых сплавов).

§ 5.2. Защита РЭС от механических воздействий с помощью виброизоляции

Система виброизоляции РЭС. Виброизоляция осуществляется путем установки между РЭС и основанием упругих опор, образующих вместе с конструкцией РЭС сложную колебательную систему, которая обладает свойствами демпфирования и частотной селекции механических колебаний. Демпфирование заключается в поглощении механических колебаний за счет трения в материале конструкций упругой опоры (резине, поролоне, вибропоглощающем покрытии), сочленениях амортизатора (сухом демпфере), перетекающем через дроссель материале (воздухе, вязкой жидкости). Частотная селекция механических колебаний заключается в том, что система виброизоляции в зарезонансной области является фильтром нижних частот, а при совпадении собственной частоты системы и частоты внешних воздействий переходит в резонансный режим.

В общем случае виброизолированный объект может иметь шесть степеней свободы относительно трех осей координат (три—для линейных перемещений и три—для угловых). В тех случаях, когда линейные или угловые перемещения не являются взаимосвязанными, можно ограничиться рассмотрением поведения системы с одной степенью свободы, для чего требуется только одна координата, чтобы определить положение системы в любой момент времени (рис. 5.1). Такая колебательная система состоит из инерционного элемента массой m , установленного на пружине, характеризуемой коэффициентом жесткости K , и демпфере с коэффициентом демпфирования h , которые закреплены непосредственно на основании. Таким образом, тело массой m может перемещаться в направлении оси X так, что его положение полностью определяется координатой x .

Силы, действующие при колебаниях виброизолированного объекта, можно разделить на возмущающие, восстанавливающие, демпфирующие, инерционные. Возмущающие силы $F(t)$ —это внешние силы, являющиеся некоторыми функциями времени и вызывающие вынужденные колебания системы, на которую они действуют.

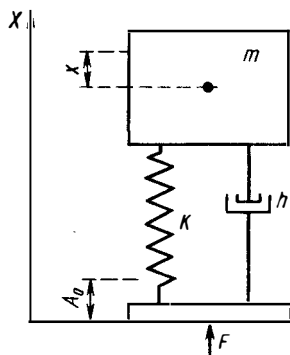


Рис. 5.1. Колебательная система из инерционного элемента массой m , спиральной пружины и демпфера, подверженная силовому возмущению F

Восстанавливающие силы Kx возникают при отклонениях системы виброизоляции от положения равновесия и стремятся вернуть ее в это положение. Колебательные свойства систем виброизоляции обусловлены в основном наличием восстанавливающих упругих сил. Количественным показателем, характеризующим восстанавливающие свойства амортизатора, является статический коэффициент жесткости K , устанавливающий связь между восстанавливающей силой и деформацией амортизатора x . Демпфирующие силы h зависят от знака, знака и скорости или знака и амплитуды колебаний. Эти силы всегда направлены противоположно направлению скорости или перемещения, что способствует гашению колебаний за счет поглощения энергии. Инерционные силы ($m\ddot{x}$) обусловлены массой колеблющейся системы и ее ускорением.

Если такую виброизолированную механическую систему вывести каким-либо образом из равновесия или сообщить ей некоторую скорость, то после прекращения действия внешней силы под действием инерционных и упругих сил в ней возникает затухающее колебательное движение. Такие колебания называют свободными собственными колебаниями системы. Количественной мерой этих колебаний является частота свободных колебаний (Гц) или собственная частота системы $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/m}$. Если колебания системы совершаются в результате постоянного действия силы $F(t)$, приложенной непосредственно к виброизолированному телу массой m либо к основанию или в результате постоянно совершаемого движения основания, то такие колебания называют вынужденными; частота их соответствует частоте внешнего воздействия f . Дифференциальное уравнение движения тела массой m под воздействием силы $F(t)$ для демпфированной системы

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + Kx = F(t), \quad (5.1)$$

где h — коэффициент демпфирования; K — коэффициент жесткости амортизатора с линейной характеристикой. В случае сухого трения $h = \mu N \operatorname{sgn} \dot{x}$, где μ — коэффициент трения; N — нормальная к поверхности сила; sgn — знак, означающий, что сила направлена противоположно скорости движения (для сухого трения) или противоположно направлению перемещения (для вязкого трения). В случае вязкого трения $h = \chi \dot{x} \operatorname{sgn} \dot{x}$; в случае нелинейного демпфирования с использованием вязкой жидкости $h = \chi^2 \dot{x} \operatorname{sgn} \dot{x}$, т. е. пропорционален квадрату скорости и противоположен перемещению. Иногда применяют амортизаторы с нелинейной характеристикой, особенностью которых является зависимость частоты их свободных колебаний от амплитуды.

Качество виброизоляции характеризуется коэффициентом виброизоляции (динамичности) η , который показывает, во сколько

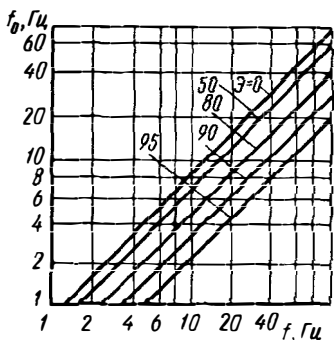


Рис. 5.2. Номограмма для определения эффективности виброизоляции системы \mathcal{E} в зависимости от соотношения частот f и f_0

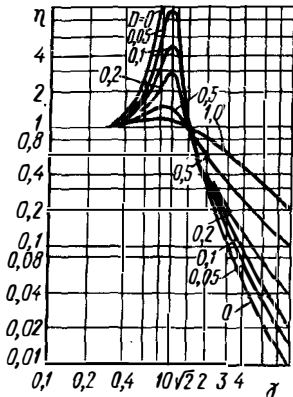


Рис. 5.3. Зависимость коэффициента виброизоляции η от коэффициента расстройки γ при вязком трении и кинематическом возбуждении (через основание)

раз амплитуда перемещения объекта x или его перегрузка $n_{об}$ больше (меньше) амплитуды A_0 перемещения основания, на котором расположен виброизолированный объект или его перегрузки $n_{осн}$: $\eta = x/A_0 = n_{об}/n_{осн}$. Другим показателем, характеризующим качество виброизоляции, является коэффициент эффективности виброизоляции $\mathcal{E} = (1 - \eta) \cdot 100$ (рис. 5.2).

Решение уравнения (5.1) зависит от коэффициента относительного затухания $D = h/h_{кр}$, где $h_{кр} = 2\sqrt{Km}$ — коэффициент критического демпфирования. Стационарной частью решения уравнения (5.1) является зависимость $x = x(t)$, на основании которой в результате преобразования могут быть построены зависимости коэффициента виброизоляции η от коэффициента расстройки $\gamma = f/f_0$ для различных значений коэффициента относительного затухания D (рис. 5.3). При рассмотрении графиков рис. 5.3 можно отметить следующие особенности работы амортизаторов с демпфером.

1. При γ , близком единице, наступает резонанс. Однако из-за наличия демпфирования амплитуда колебаний виброизолированного объекта не превышает 5...10-кратного усиления колебаний основания. Чем больше демпфирование, тем при резонансе меньше максимальная амплитуда колебаний. Часто резонансные явления возникают в переходном режиме при пуске или остановке двигателя. В этом случае чем быстрее происходит изменение частоты, тем меньше амплитуда резонансных колебаний. В случае слабого демпфирования (острая резонансная кривая) отличие частоты возбуждающих колебаний

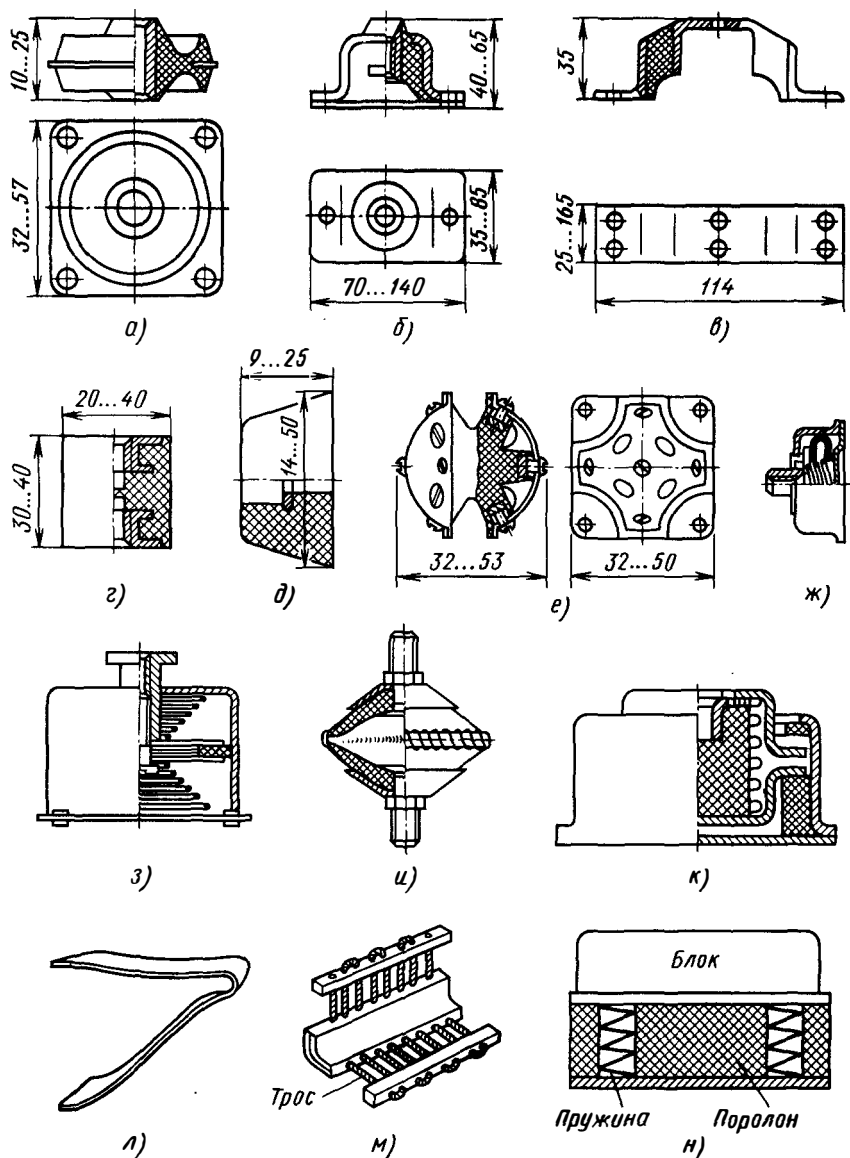


Рис. 5.4. Схематическое изображение наиболее распространенных типов амортизаторов:

a — АП, АЧ; *б* — АКСС; *в* — АМ; *г* — АН; *д* — АО; *е* — АР; *ж* — АД; *з* — АФД, АПН; *и* — ДК; *к* — АЦМ, АЦП; *л* — лепестковый; *м* — тросовый; *н* — пружинно-поролоновый

Параметры некоторых приборных амортизаторов

Тип	Резонансная частота при нормальной нагрузке, Гц	Амплитуда вибраций, мм, не более	Диапазон нагрузок на один амортизатор, Н	Относительный коэффициент демпфирования	Диапазон рабочих температур, °С
АП, АЧ	15...20; 30...35	0,5	4,5...157	0,05	-45...+80
АД	8...10	0,5...1,5	3...150	0,06...0,5	-60...+70
АФД	15...20; 25...30	—	2...150	Сила демпфирования 0,15...0,25 осевой нагрузки	-60...+150
АПН	10...20	—	5...150		-60...+150
ПК	11...12	1	4...400	Высокий	-50...+150
АПМ	8...12	1	0,5...5	Более 0,5	-50...+150
АЦП	8...10	1	5...300	» 0,5	-50...+150
Лепестковый	10...12	—	—	—	-60...+150
Тросовый	10...12	Более 1,5	20...680	Более 0,5	-70...+260

от частоты собственных колебаний на 5...10% приводит к исчезновению резонанса.

2. Независимо от степени демпфирования осуществляется защита от вибрации в области, удаленной от резонансной, когда $\gamma > \sqrt{2}$. С увеличением γ все кривые стремятся к нулю и эффективность виброизоляции повышается. В области частот, где $\gamma > \sqrt{2}$, значение η уменьшается при снижении демпфирования, т. е. увеличение демпфирования оказывает отрицательное влияние на эффективность виброизоляции в зарезонансной области.

3. В области $\gamma < 1$, т. е. при $f < f_0$, виброизоляция отсутствует ($\eta \geq 1$). В этом случае защита от механических воздействий достигается обеспечением жесткости и прочности элементов конструкции, а также их демпфированием за счет свойств материалов.

Амортизаторы для виброизоляции РЭС. Частоты интенсивных вибрационных воздействий на РЭС обычно составляют 5...2000 Гц. Поэтому нижняя граница частоты собственных колебаний амортизаторов должна лежать в полосе 1...3 Гц. Для виброударозащиты РЭС первых поколений были разработаны так называемые *приборные амортизаторы*, которые можно разделить на три группы: *резинометаллические* (АП, АЧ, АКСС, АМ, АО, АР и др.); *пружинные с демпфированием* (АД, АФД, АПН и др.); *металлические* (АЦМ, АЦП, АКПО, тросовые и т. д.). Схематическое изображение некоторых приборных амортизаторов приведено на рис. 5.4, а основные характеристики — в табл. 5.2. Недостатками приборных амортизаторов являются высокая собственная частота (10...30 Гц) и линейность статических и динамических характеристик. Это накладывает ограничение на диапазон

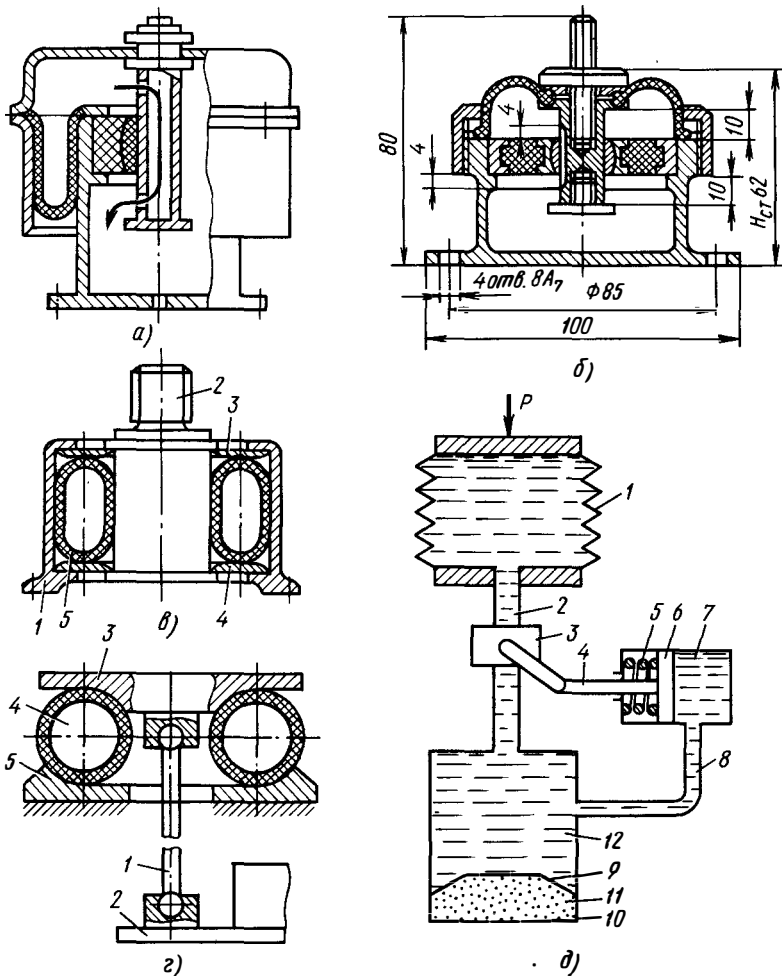


Рис. 5.5. Пневмогидравлические амортизаторы:

а— с упругим шарниром; *б*— малогабаритный со сферическим шарниром; *в*— тороидальный; 1— корпус; 2— шток; 3, 4— кольца; 5— упругий элемент; *г*— маятниковый противосейсмический: 1— маятник; 2— несущая платформа; 3— опора; 4— упругий элемент; 5— основание; *д*— гидропневматический: 1— упругий элемент; 2, 8— трубопроводы; 3— вентиль; 4— шток; 5— пружина; 6— поршень; 7— корпус с жидкостью; 9— диафрагма; 10— баллон; 11— сжатый газ; 12— жидкость

изменения статических нагрузок и свободный ход амортизатора одного типоразмера, что обусловлено сложностью регулирования сил внутреннего трения таких материалов, как резина, поролон, металл пружины.

От этих недостатков свободны пневмогидравлические амортизаторы (рис. 5.5.). Нижний предел собственной частоты аморти-

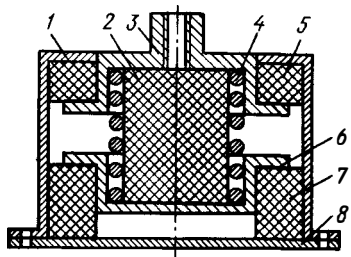


Рис. 5.6. Полимерно-пружинный амортизатор:

1—корпус; 2—полимерный демпфер; 3—шток; 4—цилиндрическая пружина; 5, 7—верхняя и нижняя полимерные прокладки; 6—обойма; 8—дно

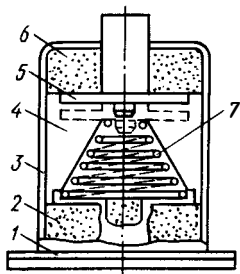
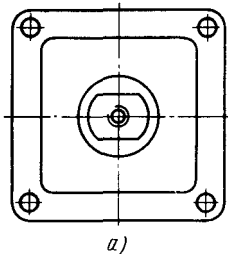
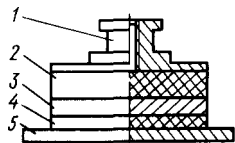
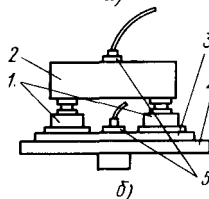


Рис. 5.7. Полимерно-пружинный амортизатор с экспоненциальной пружиной:

1—корпус амортизатора; 2, 6—нижняя и верхняя полимерные прокладки; 3—обойма; 4—полимерный демпфер; 5—шток; 7—пружина



а)



б)

Рис. 5.8. Трехслойный полимерный амортизатор (а) (1—верхняя обойма; 2—полимер КМ-9; 3—полимер, композиция № 1 на основе низковязкого тиокола; 4—полимер ЭЗК-7; 5—основание) и схема испытаний амортизаторов (б) (1—амортизаторы; 2—макет РЭС; 3—крепёжное приспособление; 4—вибростенд; 5—виброакселерометры)

заторов различных типов составляет 0,5...5 Гц. Это позволяет осуществлять виброизоляцию от воздействий частотой 1...7 Гц. Дросселирование упругой среды позволяет обеспечить большой диапазон изменения статических нагрузок ($P_{max}/P_{min} = 15...25$) и нелинейность характеристик при значительном отклонении амортизаторов от статического положения, что позволяет получить высококачественную виброудароизоляцию при ограниченном ходе амортизатора. В последнее время стали также использовать амортизаторы на основе вибропоглощающих полимерных материалов (рис. 5.6—5.8), что позволяет осуществить виброзащиту в диапазоне 20...2000 Гц. Это особенно важно при защите аппаратуры от акустического воздействия двигателей самолетов и ракет.

Проектирование системы виброизоляции. При разработке системы виброизоляции габариты, масса, стоимость, надежность и условия эксплуатации защищаемого объекта выступают в качестве ограничений. Определению подлежат типоразмер и число амортизаторов, их расположение, параметры прокладок для устранения перекосов и меры коррекции положения оси жесткости амортизаторов. Критериями правильности проектирования системы виброизоляции являются допустимые перегрузки и амплитуды вынужденных колебаний виброизолированного блока.

При проектировании системы виброудароизоляции исходят из общих положений теории колебаний и теории удара. Как правило, производят статический и динамический расчет. Целью статического расчета системы виброизоляции является определение статических нагрузок на каждый амортизатор и последующий выбор типоразмера амортизаторов в соответствии с найденными нагрузками. При этом уточняются координаты расположения амортизаторов и параметры выравнивающих прокладок. Если блок массой m опирается на четыре несимметрично расположенных амортизатора (рис. 5.9), то нагрузка на каждый амортизатор:

$$m_{a1} = m(l-l_2)(b_1-b_2)/(l_1b_1),$$

$$m_{a2} = m(b_1-b_2)/(l_1b_1),$$

$$m_{a3} = m(l_1-l_2)b_2/(l_1b_1), \quad m_{a4} = ml_2b_2/(l_1b_1).$$

Если нагрузка оказывается неравномерной, то следует либо изменить координаты размещения амортизаторов, либо применить амортизаторы различных типоразмеров. В случае различного начального прогиба амортизаторов необходимо предусмотреть выравнивающие прокладки. Для изменения суммарной жесткости системы виброизоляции применяют параллельные, последовательные и смешанные схемы соединения амортизаторов (рис. 5.10). Формулы для расчета суммарной жесткости приведены на рис. 5.10. Параллельное соединение амортизаторов делает систему более жесткой, а последовательное соединение — более мягкой. Однако стремление повысить эффективность виброизоляции путем последовательного соединения двух амортизаторов приводит к системе с 12 степенями свободы, что чаще всего дает обратный эффект. Прибегать к таким конструкциям, как правило, нежелательно.

В качестве примера определим типоразмер четырех симметрично расположенных амортизаторов для системы виброизоляции, на которую установлен блок массой $m=5,6$ кг. Допустимая перегрузка на блок $0,8g$; основание системы подвергается вибрации амплитудой $0,5$ мм с частотой $30...70$ Гц.

1. Наибольшее действующее ускорение (перегрузка) $n_{\max} = f_{\max} A_0 / 250 = 70^2 \times 0,5 / 250 = 9,8 g$.

2. Необходимый коэффициент виброизоляции $\eta = n_{\text{об}} / n_{\text{осн}} = 0,8 / 9,8 = 0,082$; по графику рис. 5.3 для $\eta = 0,08$ и $D = 0,05$ находим коэффициент расстройки: $\gamma = f / f_0 = 3,8$.

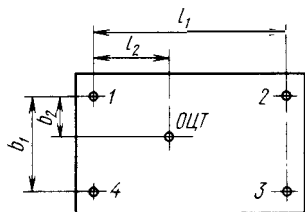
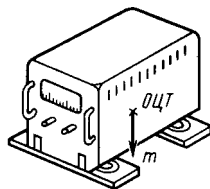


Рис. 5.9. Схема для определения нагрузки на амортизатор блока:
ОЦТ — ось центра тяжести

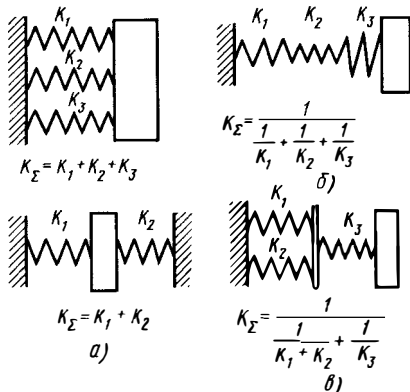


Рис. 5.10. Схемы соединения амортизаторов:
а — параллельное; б — последовательное;
в — смешанное

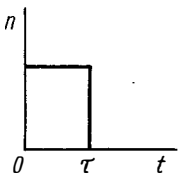
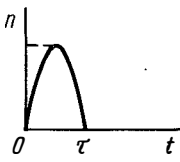

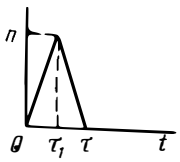
3. Максимальная собственная частота амортизатора для худшего случая (30 Гц) $f_0 = f/\gamma = 30/3,8 \approx 8$ Гц.

Для вертикальных колебаний с небольшой амплитудой (1...1,5 мм) такую собственную частоту могут обеспечить амортизаторы типа АД, имеющие $D=0,03...0,25$; $f_0=8...10$ Гц. При установке на четыре амортизатора нагрузка на каждый из них составит $m/4=5,6/4=1,4$ кг. Выбираем амортизатор типа АД-1,5, рассчитанный на нагрузку 10...15 Н.

4. Определяем ожидаемую амплитуду колебаний блока: $x = A_{0л.об}/n_{осн} = =0,5 \cdot 0,8/9,8 = 0,041$ мм. Так как нагрузка на амортизаторы одинакова, то прокладки в данном случае не нужны.

При расчете системы виброизоляции на воздействие ударного импульса необходимо определить максимальное ускорение и перемещение амортизированного объекта в результате действия ударного импульса. Исходным для расчета является закон изменения ускорения во время удара $n(t)$, который может быть задан функциональной зависимостью или графически, что полностью определяет форму ударного импульса.

Форма эквивалентного ударного импульса принимается прямоугольной, что в энергетическом отношении является наиболее тяжелым случаем для системы амортизации. Формулы для вычисления параметров эквивалентного прямоугольного импульса для некоторых частных случаев приведены в табл. 5.3, где $n(t)$ — закон изменения ускорения основания амортизированного объекта, τ — длительность ударного импульса. Если соотношение между длительностью $\tau_{эк}$ эквивалентного ударного импульса и собственной частотой системы ω_0 соответствует условию $\tau_{эк} \geq \pi/\omega_0$, то удар называется длинным, при $\tau_{эк} \ll \pi/\omega_0$ удар

Ударный импульс		$n_{эк}$	$\tau_{эк}$
 $n(t) = \begin{cases} n, & 0 < t \leq \tau, \\ 0, & t < 0, t > \tau \end{cases}$	n	τ	
 $n(t) = n \sin\left(\frac{\pi}{\tau} t\right)$	$\frac{2}{\pi} n$	τ	
 $n(t) = n \cos\left(\frac{\pi}{2\tau} t\right)$	$\frac{n}{2}$	$\frac{4}{\pi} \tau$	
 $n(t) = \begin{cases} \frac{n}{\tau_1} t & \text{при } 0 < t < \tau_1, \\ \frac{n(\tau - t)}{\tau - \tau_1} & \text{при } \tau_1 < t < \tau \end{cases}$	$\frac{3}{4} \frac{n\tau}{2\tau - \tau_1}$	$\frac{2}{3} (2\tau - \tau_1)$	

называется коротким. Максимальное перемещение амортизированного объекта для длительного удара $x_{уд} = 2n_{эк}/\omega_0^2$, а для короткого $x_{уд} = \sqrt{2}n_3 \sqrt{1 - \cos \omega_0 \tau_3}/\omega_0^2$. Максимальное ускорение амортизированного объекта $n_{об}$ в результате действия прямоугольного ударного импульса определяется по формуле $n_{об} = \omega_0^2 x_{уд}$. Защита от удара имеет место в том случае, если обеспечено соотношение $\tau < \pi/3\omega_0$. При этом ускорение объекта меньше ускорения внешнего удара. Поэтому для обеспечения условий защиты от ударов надо стараться

уменьшить значение ω_0 . Однако следует учесть нелинейность характеристик амортизаторов, иначе могут быть получены неверные результаты.

Реальные виброизолирующие системы способны ослаблять только очень короткие и резкие удары (ускорением 50...100 g и длительностью 0,001 с) или продолжительные, но слабые (5...10 g и 0,005...0,01 с). Если система не защищена от удара и перемещение объекта превышает допустимую осадку амортизаторов, то выбирают амортизатор другого типа или вводят ограничение перемещения объекта.

Сложность выбора амортизаторов, защищающих одновременно от вибрации и ударов, обусловлена тем, что при ограниченном ходе амортизатора с малой жесткостью (низкой собственной частотой) сильный удар может довести его до упора. В результате удар от упора, передаваемый аппаратуре, может иметь ускорение большее, чем при первоначальном ударе, так как перемещение при торможении может быть меньше. Затрудняет работу амортизаторов одновременное воздействие вибраций, ударов и линейных ускорений. Так, линейное ускорение после достижения установившегося значения приводит к дополнительной деформации амортизаторов и может довести их до упора. В этом случае виброизолирующие свойства исчезают, а виброзащита РЭС осуществляется за счет прочности и жесткости конструкции РЭС (как и в случае отсутствия амортизаторов). При одновременном воздействии значительных ударных нагрузок и вибраций целесообразно использовать пневмогидравлические амортизаторы.

Определяя расположение амортизаторов, надо стремиться к тому, чтобы координаты центра тяжести объекта по возможности совпадали с координатами центра жесткости системы виброизоляции. Схемы расположения амортизаторов относительно центра тяжести РЭС могут быть самыми разнообразными (рис. 5.11). Каждая схема имеет свои преимущества и недостатки. Схема нижнего монтажа (рис. 5.11, а) чаще всего используется для амортизации при воздействии вибраций. Это наиболее простая схема, и ее часто выбирают по привычке без учета недостатков. Наиболее существенный из них состоит в том, что при боковых нагрузках следует предусматривать достаточный зазор между виброизолируемым объектом и смежными конструкциями, чтобы избежать соударения. Такие же последствия вызывает несовпадение центра тяжести РЭС с центром жесткости системы виброизоляции. Поэтому эта схема применяется в РЭС винтовых самолетов.

При пространственном нагружении в данной системе могут применяться лишь некоторые типы амортизаторов, например резинометаллические или типов АПН, ДК, тросовые, некоторые виды пневматических амортизаторов. Схему, представленную на рис. 5.11, б, целесообразно использовать в условиях пространственного нагружения на реактивных самолетах и ракетах. Здесь амортизаторы расположены в плоскости, проходящей через центр тяжести защищаемого объекта. Такая схема позволяет уменьшить колебания по горизонтальным осям. Наиболее выгодно располагать амортизаторы так, чтобы расстояние от центра тяжести объекта было равно радиусу инерции. Однако это не всегда удается, так как связано с увеличением габаритов системы монтажа амортизаторов.

Амортизаторы не обязательно располагать в горизонтальной плоскости, проходящей через центр тяжести РЭС. Эффективность их не уменьшается при установке на наклонной плоскости, проходящей через центр тяжести объекта,

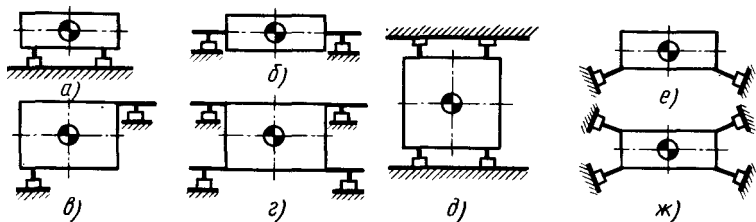


Рис. 5.11. Схема монтажа амортизаторов

на расстояниях, равных радиусу инерции (рис. 5.11, *в*). Габариты такой системы больше, но больше и ее устойчивость. Монтаж амортизаторов в двух горизонтальных плоскостях (рис. 5.11, *з*) обычно используют при защите РЭС, у которых отношение высоты к ширине больше двух. Установка амортизаторов в верхней плоскости обеспечивает дополнительные точки опоры. Если амортизаторы расположены несимметрично относительно центра тяжести, то все режимы собственных колебаний взаимосвязаны и система становится неустойчивой.

Двусторонний монтаж (рис. 5.11, *д*) обеспечивает всестороннюю защиту от действующих сил. Амортизаторы предварительно нагружены, что делает систему жесткой, т. е. сдвигает ее собственную частоту в область более высоких частот. Схема монтажа амортизаторов под углом к осям симметрии объекта (рис. 5.11, *е*) используется для изоляции пространственных вибраций, но она и наиболее сложная, так как при небольшом отклонении направления линий, проходящих через ось жесткости амортизаторов, от направления на центр тяжести объекта в системе возникают все шесть связанных режимов собственных колебаний.

Если ось жесткости амортизатора совпадает с центром тяжести объекта, то все действующие силы уравновешиваются и вращательные колебания невелики. Этому условию удовлетворяет схема монтажа амортизаторов, расположенных снизу и сверху объекта под углом (рис. 5.11, *ж*). Так как характеристики системы амортизации во всех положениях виброизолируемого объекта одинаковы, то характер движения объекта установки (транспортного средства) может быть любым. При проектировании системы амортизации необходимо учитывать наличие кабелей, шин заземления, трубопроводов и пр., которые могут изменить собственную частоту системы амортизации и привести к смещению центра тяжести виброизолируемого объекта.

Разработка системы виброизоляции является сложной, трудоемкой и длительной работой, сократить которую можно при использовании моделирования на аналоговой ЭВМ МН-10 и др. Это позволяет избежать натурного моделирования, сократить сроки и увеличить точность моделирования. Удобство этого метода заключается в возможности быстрого изменения исходных данных и наглядности наблюдения характера колебаний виброизолированного объекта.

В качестве примера рассмотрим методику моделирования системы виброизоляции объекта массой 5 кг, установленного по схеме рис. 5.11, *а* на четырех пружинных амортизаторах типа АФД-5, имеющих демпфер с сухим трением. На основание воздействует ударный импульс амплитудой $F=200$ Н и длительностью $\tau=0,01$ с. Жесткость одного амортизатора типа АФД-5 равна 14,3 Н/мм, коэффициент демпфирования $h=32$ Н. Требуется определить характер изменения во времени перемещения, скорости и ускорения виброизолированного объекта.

Представляем систему виброизоляции в виде системы с одной степенью свободы (рис. 5.1). В этом случае коэффициент жесткости всей системы виброизоляции, включающей четыре амортизатора, $K = 57200 \text{ Н/м}$. Считаем, что до приложения ударного импульса система находилась в равновесии: $x_0 = \dot{x}_0 = \ddot{x}_0 = 0$. Для проведения масштабирования на основе предварительных расчетов принимаем: $x_{\max} = 0,005 \text{ м}$; $\dot{x}_{\max} = 0,4 \text{ м/с}$; $\ddot{x}_{\max} = 100 \text{ м/с}^2$. Выбираем длительность ударного импульса в машине $\tau_{\text{маш}} = 1 \text{ с}$. Поведение системы описывается уравнением (5.1).

Рассчитаем масштабные коэффициенты в последовательности:

1. Приведем уравнение (5.1) к виду, удобному для моделирования:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} F - \frac{K}{m} x - \frac{1}{m} h \operatorname{sgn} \dot{x}.$$

Обозначим $K_F = 1/m$, $K_x = K/m$, $K_h = 1/m$.

2. Произведем выбор масштабов, если для ЭВМ МН-10 максимальная амплитуда сигнала $U_{\max} = 25 \text{ В}$:

$$M_x = U_{\max}/x_{\max} = 25/0,005 = 5000 \text{ В/м};$$

$$M_{\dot{x}} = U_{\max}/\dot{x}_{\max} = 25/0,4 = 62,5 \text{ В} \cdot \text{с/м};$$

$$M_{\ddot{x}} = U_{\max}/\ddot{x}_{\max} = 25/100 = 0,25 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{м};$$

$$M_h = U_{\max}/h_{\max} = 25/32 = 0,78 \text{ В/Н};$$

$$M_F = U_{\max}/F_{\max} = 25/200 = 0,125 \text{ В/Н};$$

$$M_{\tau_{\text{маш}}} = \tau_{\text{маш}}/\tau = 1/0,01 = 100.$$

Эти масштабы учитывают при анализе осциллограмм, полученных на экране осциллографа или ленте самописца.

3. Произведем переход от физического уравнения к уравнению, пригодному для решения на аналоговой ЭВМ:

$$\frac{d^2 U}{dt^2} = \frac{M_{\ddot{x}} F}{M_F m} + \frac{M_x K}{M_x m} - \frac{M_{\dot{x}} h}{M_h m}.$$

Схема модели для решения этого уравнения представлена на рис. 5.12.

4. Рассчитаем коэффициенты K , учитывая, что для интегрирующих блоков $K = M_{\text{вых}}/M_{\text{вх}} M_{\tau_{\text{маш}}}$, а для суммирующего блока $K = M_{\text{вых}} K_{\text{уп}}/M_{\text{вх}}$, где $K_{\text{уп}} = K_F$, K_x , K_h , $M_{\text{вых}}$ и $M_{\text{вх}}$ — масштабные величин на выходе и входе блоков:

$$K_1 = \frac{M_{\ddot{x}}}{M_{\ddot{x}} M_{\tau_{\text{маш}}}} = \frac{62,5}{0,25 \cdot 100} = 2,5; \quad K_2 = \frac{M_x}{M_{\ddot{x}} M_{\tau_{\text{маш}}}} = \frac{5000}{62,5 \cdot 100} = 0,8;$$

$$K_{11} = \frac{M_{\ddot{x}} K_F}{M_F} = \frac{0,25 \cdot 0,2}{0,125} = 0,4; \quad K_F = \frac{1}{m} = \frac{1}{5} = 0,2;$$

$$K_{12} = \frac{M_x K_x}{M_x} = \frac{0,25 \cdot 11440}{5000} = 0,57; \quad K_x = \frac{K}{m} = \frac{57200}{5} = 11440;$$

$$K_{13} = \frac{M_{\dot{x}} K_h}{M_h} = \frac{0,25 \cdot 0,2}{0,75} = 0,06; \quad K_h = \frac{1}{m} = 0,2.$$

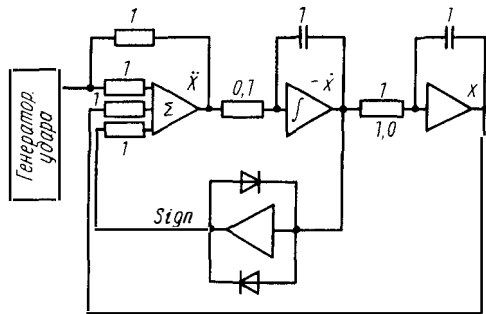


Рис. 5.12. Схема модели удара на амортизированный объект с использованием блоков аналоговой ЭВМ

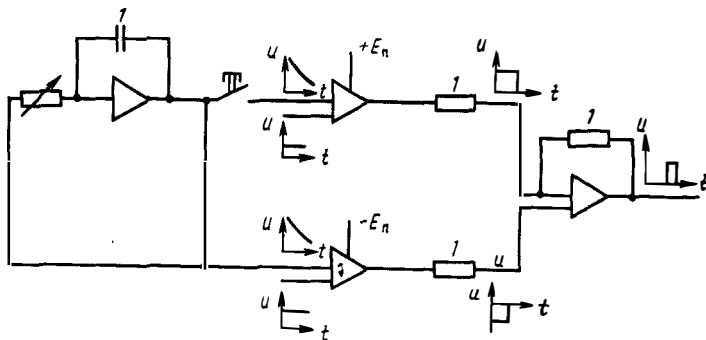


Рис. 5.13. Схема генератора, имитирующего ударное воздействие в ЭВМ:
 E_n — напряжение питания

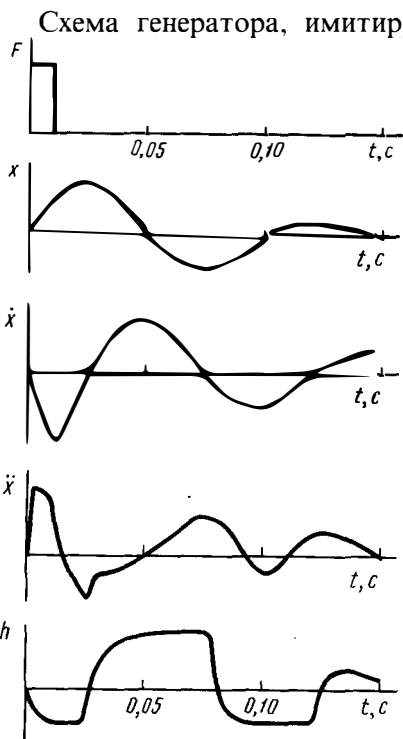


Рис. 5.14. Осциллограммы результата моделирования ударного воздействия на ЭВМ:

F — ударный импульс; x — перемещение;
 \dot{x} — скорость; \ddot{x} — ускорение; h — демпфирование

Схема генератора, имитирующего ударное воздействие, приведена на рис. 5.13, а результаты моделирования — на рис. 5.14. Из осциллограмм следует, что длительность переходного процесса при воздействии ударного импульса длительностью 0,01 с составляет 0,15 с; максимальное перемещение объекта виброизоляции имеет место через 0,025 с после начала удара; максимальное ускорение — через 0,005 с после начала удара; коэффициент демпфирования изменяет знак в момент, когда объект находится в крайних положениях, а скорость равна нулю.

Использование вибропоглощающих материалов. Уменьшение массы и габаритов блоков РЭС, а также необходимость обеспечения работы объектов виброизоляции в широком диапазоне частот (вплоть до 2000 Гц) затрудняют защиту от механических воздействий с помощью традиционных методов амортизации и демпфирования, так как не обеспечивают минимума массогабаритных параметров РЭС и защиты их от акустических воз-

действий высокой интенсивности (130...165 дБ). Эффективным средством является введение демпфирования в конструкцию РЭС. В ряде случаев оно используется совместно с амортизацией. Наиболее перспективным и распространенным способом демпфирования конструкций РЭС является одно- или двусторонняя заливка (рис. 5.15, 5.16) или введение высокоэффективных *вибропоглощающих материалов* в структуру несущих оснований. Эти способы основаны на способности полимеров рассеивать большое количество энергии при растяжении, изгибе или сдвиге за счет упругих свойств. К недостаткам данных способов относятся: худшая ремонтпригодность при заливке, худший теплоотвод от залитых элементов, сильная зависимость демпфирующих свойств от температуры, возможность возникновения больших внутренних напряжений в компаунде при изменении температуры, изменение свойств полимеров при воздействии радиации. Тем не менее использование вибропоглощающих материалов позволило снизить коэффициент виброизоляции ячеек, представленных на рис. 5.17, с 40 до 3 за счет приклейки ИС к рамке ячейки

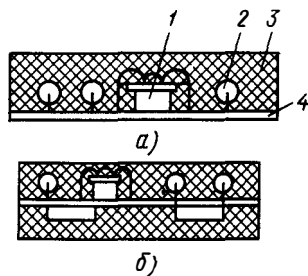


Рис. 5.15. Односторонняя (а) и двусторонняя (б) заливка вибропоглощающим пенополиуретаном:

1, 2 — электрорадиоэлементы; 3 — пенополиуретан; 4 — плата

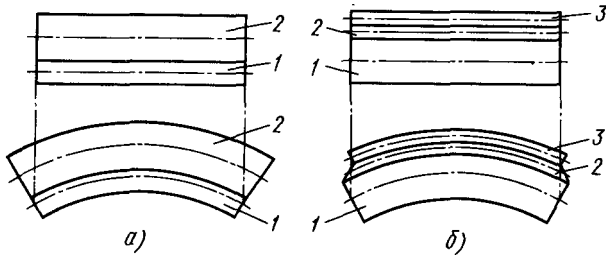


Рис. 5.16. Деформации вибропоглощающих конструкций с наружным (а) и внутренним (б) вибропоглощающим слоем:

1, 3 — конструкционный; 2 — вибропоглощающий материал

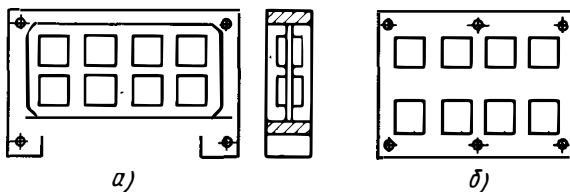


Рис. 5.17. Ячейки с низким коэффициентом динамичности ($\beta=3$) на основе металлической рамки (а) и склеенной компаундом КТ-102 печатной платы (б) ($\beta=\eta_{\text{pes}}$)

Параметры вибропоглощающих материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Температура, °С	Динамический модуль упругости, Па	Коэффициент механических потерь η_n
Листовой:				
Агат	1400	20	$1,4 \cdot 10^9$	0,38
ВМЛ-25	1570	20	$5,0 \cdot 10^9$	0,40
Мастика:				
Адем-НШ	1150	20	$5,4 \cdot 10^9$	0,25
Антивибрит-5М	1600	20	$5,4 \cdot 10^9$	0,25
Антивибрит-7М	1600	70	$2,0 \cdot 10^9$	0,30
Композитный материал полиакрил-ВС, полимерная прослойка	1200	20	$6,0 \cdot 10^7$	0,65
Металлополимерный листовой материал випонит, полимерная прослойка	1200	20	$1,2 \cdot 10^8$	1,25

Примечание. $\eta_n = E_2/E_1$, $E_1 + jE_2 = E^*$ — комплексный динамический модуль упругости (модуль Юнга).

(рис. 5.17, а) компаундом КТ-102, а к склеенной компаундом КТ-102 (рис. 5.17, б) плате — клеем КВК. При одном и том же эффекте демпфирования толщина внешней заливки должна быть в 5...10 раз больше, чем при введении вибропоглощающих материалов в структуру несущей конструкции.

Параметры некоторых вибропоглощающих материалов приведены в табл. 5.4. Примеры применения вибропоглощающих материалов для подавления резонансных колебаний в конструкциях представлены на рис. 5.18—5.20. На рис. 5.20 представлено несущее основание для монтажа ракетного РЭС (США) массой 11,3 кг, состоящее из семи слоев стеклотекстолита, склеенных

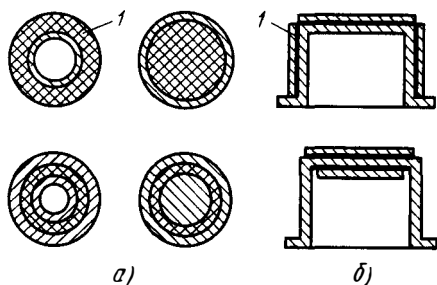


Рис. 5.18. Применение вибропоглощающих материалов в трубчатых и стержневых конструкциях (а) и в конструкциях экранов (б):
1 — вибропоглощающий материал

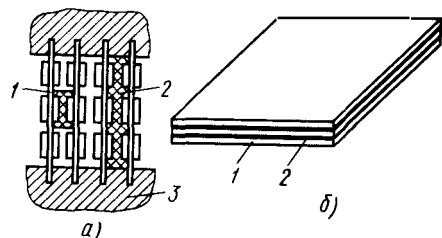


Рис. 5.19. Демпфирование электромагнитных плат РЭС:
а — кассетная конструкция; б — слоистая плата;
1 — конструкционный материал; 2 — вибропоглощающий материал; 3 — кассета

вязкоупругим компаундом, и имеющее массу 2,25 кг. Это позволило по сравнению с монолитным основанием такой же формы уменьшить резонансную частоту с 320 до 95 Гц, а коэффициент виброизоляции — с 36 до 3,6, т. е. на порядок. Для обеспечения работоспособности вибропоглощающих покрытий при изменении температуры внешней среды их иногда выполняют из электропроводного полимера, что позволяет поддерживать температуру путем подогрева полимеров электрическим током.

Технологичность конструкций виброизоляции РЭС. Для обеспечения технологичности виброзащиты РЭС могут быть приняты следующие меры: 1) использованы типовые виброизолирующие основания, разработанные и изготавливаемые специализированными организациями (рис. 5.21); 2) обеспечена в производстве стабильность центра тяжести виброизолированного объекта благодаря стабильности расположения в однотипных объектах (блоках, стойках) элементов электрических связей (плоских и радиочастотных кабелей, жгутов объемных проводников и т. д.) и различных коммуникаций (трубопроводов, шин заземления и т. д.). 3) предусмотрены прокладки, с помощью которых могут быть компенсированы неодинаковые прогибы амортизаторов из-за разброса положения центра тяжести объекта амортизации и жесткости отдельных амортизаторов; 4) конструкция системы виброизоляции должна обеспечивать легкость сборки, демонтажа, регулировки.

Для обеспечения технологичности конструкции виброизоляции, выполненной с применением внешней заливки или внутренних вибропоглощающих слоев, предусматриваются следующие меры: 1) предпочтительно выбирается заливочный материал (пенопласт и др.), полимеризующийся без дополнительного повышения температуры; 2) должна быть обеспечена хорошая адгезия внутренних вибропоглощающих слоев конструкции по всей поверхности контакта; 3) полимерные материалы выбираются с учетом их токсичности и химической агрессивности (особенно для гермоблоков); 4) разрабатываются технологические приемы демонтажа и повторного монтажа залитого или установленного на виброизолирующий слой объекта вибро-

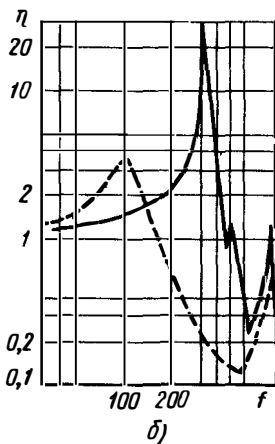
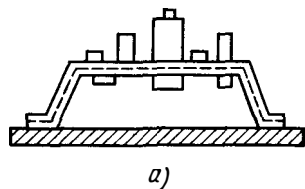


Рис. 5.20. Виброизоляция конусной несущей плиты (а) и ее частотная характеристика (б)

прочностью и жесткостью элементов конструкции, а также исключением резонансов.

Прочностные параметры материалов конструкций РЭС. Прочность и жесткость элементов конструкции в значительной степени зависят от используемых материалов, их обработки, а также от геометрических размеров самих элементов, их формы и способов крепления.

Эксплуатационные возможности материалов, используемых в конструкциях РЭС, характеризуются рядом параметров, наиболее важными из которых являются предел прочности при растяжении σ_b , сжатии $\sigma_{сж}$ и изгибе $\sigma_{и}$; предел текучести σ_T ; предел выносливости при симметричном цикле σ_{-1} ; модуль упругости E (модуль Юнга); удельные значения этих параметров γ , равные их отношению к плотности материала. *Пределом прочности* при растяжении называют напряжение, равное отношению наибольшего растягивающего усилия к первоначальной площади поперечного сечения образца. Аналогично определяются $\sigma_{и}$ и $\sigma_{сж}$. *Пределом текучести* называют напряжение, при котором образец заметно удлиняется (например, на 0,2%) без увеличения напряжения. При удлинении на 0,2% предел текучести обозначают $\sigma_{0,2}$. Величина σ_{-1} зависит от числа циклов нагружения знакопеременной нагрузкой. Установлено, что деталь из стали, выдержавшая $2 \cdot 10^8$ циклов, может выдержать любое число циклов; для деталей из цветных металлов это число увеличивается до $5 \cdot 10^8$ циклов (рис. 5.22). *Модуль упругости* определяется формулой $E = \sigma_y / \epsilon$, где σ_y — предел упругости, ГПа; $\epsilon = \Delta l / l$ — относительное удлинение (Δl — относительное удлинение образца, l — его длина).

Значения этих параметров для некоторых материалов представлены в табл. 5.5 и 5.6. Из рассмотрения этих таблиц можно сделать следующие выводы: 1) от состояния металлов и сплавов (отожженный, закаленный и т. д.) зависит не только предел прочности, но и удельная прочность $\sigma_{уд}$ при растяжении и изгибе; 2) среди материалов, предназначенных для работающих на растяжение деталей, максимальную удельную прочность имеют бериллий, титановый сплав ВТЗ-1, алюминиевый сплав В-95,

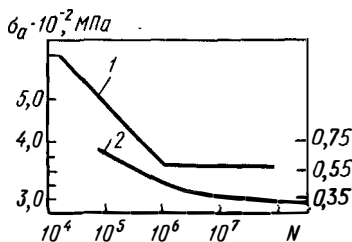


Рис. 5.22. Кривые усталости для стали (кривая 1, левая шкала) и для демпфирующего алюминиевого сплава (кривая 2, правая шкала):

N — число циклов нагружения; $\sigma_a = 0,5(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ — амплитуда цикла

Удельные прочность и жесткость металлов и сплавов

Металл или сплав	Состояние материала	Предел прочности σ_p , МПа	Модуль упругости E , ГПа	Плотность γ , г/см ³	Удельная прочность		Удельная жесткость $E_{уд}$
					при растяжении $\sigma_{удp}$	при изгибе $\sigma_{удв}$	
Сталь углеродистая: Ст. 10	Нормализованный Холоднотянутый	334	203	7,85	42,5	12,3	25,9
		412			52,5	14	
Ст. 45	Нормализованный После закалки и отпуска	600	200	7,85	76,5	18	25,5
		1176			150	28,2	
Сталь легирующая: 4X13	Отожженный После закалки и отпуска	540	193	7,75	69,7	16,9	24,9
		930			120	24,3	
30XГСА	Нормализованный После закалки и отпуска	490	198	7,85	62,4	15,7	25,3
		1080			137,5	26,6	
Алюминиевый сплав: АД-1	Отожженный Нагартованный	58	69,6	2,71	21,4	7,7	25,7
		147			54,3	14,3	
В-95	Отожженный Закаленный и состаренный	275	69,6	2,85	96,5	21	24,2
		490			172	30,9	
Магниевый сплав: МА2-1	Без термообработки	255	40,7	1,79	142	27,2	22,7
		275			154	28,7	
МА-8	Закаленный	275	40,2	1,79	154	28,7	22,4
Медный сплав: латунь Л-63	Мягкий Твердый	294	103	8,43	35	10,7	12,2
		490			58,2	15	
бронза Бр.Б2	Мягкий Твердый	392	115	8,23	47,7	13,1	14,0
		735			89,2	20	
Титановый сплав: BT1-0	Отожженный »	687	113	4,52	152	28,5	25,0
		981			218	36,2	
BT3-1	Закаленный и состаренный	1176	113	4,5	262	40,9	25,1
Бериллий	Горячевыдавленный через матрицу Горячепрессованный, выдавленный и отожженный	480	290	1,84	260	—	158
		390... 620			280... 300	210... 335	
Алюминиево-бериллиевые сплавы (40...80% Be)	—	490	132	2,35	210	—	56

Металл или сплав	Состояние материала	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Модуль упругости E , ГПа	Плотность γ , г/см ³	Удельная прочность		Удельная жесткость $E_{\text{уд}}$
					при растяжении $\sigma_{\text{удр}}$	при изгибе $\sigma_{\text{удн}}$	
Сплав Al—Mg—Li (72%Al; 6,5%Mg; 1,4%Li)	При специальной термообработке	120...	—	1,6	75...	—	—
		205	—	1,75	117	—	—
		340... 450	—	—	210... 260	—	—

Таблица 5.6

Удельные прочность и жесткость неметаллических материалов

Материал	Предел прочности, МПа, при			Модуль упругости E , ГПа	Плотность γ , г/см ³	Удельная прочность при			Удельная жесткость $E_{\text{уд}}$
	растяжении $\sigma_{\text{в}}$	сжатии $\sigma_{\text{сж}}$	изгибе $\sigma_{\text{н}}$			растяжении $\sigma_{\text{удр}}$	сжатии $\sigma_{\text{удсж}}$	изгибе $\sigma_{\text{удн}}$	
Фенопласт К-21-22	53,3	147,0	63,7	8,6	1,4	38,0	105,0	45,6	6,17
Пресс-материал АГ-4С	491,0	196,2	245,0	34,3	1,8	273,0	109,0	136,0	19,1
Гетинакс II	68,7	—	98,1	20,6	1,4	49,0	—	70,0	14,7
Текстолит	981	147,0	157,0	9,8	1,4	70,0	105,0	112,0	7,0
ПТК	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Стеклотекстолит ВФТ-С	334,0	77,0	245,0	—	1,85	180,0	41,7	132,5	—
Стеклопластик СВАМ-ЭР	442,0	442,0	687,0	20,6	2,0	221,0	221,0	343,5	10,3
Фторопласт-4А	22,1	19,6	13,7	0,44	2,19	10,1	8,96	6,2	0,2
Смола полиамидная 68Н	49,1	68,7	68,7	1,67	1,1	44,6	6,25	6,25	1,52
Стекло органическое СТ-1	76,5	137,0	137,0	2,86	1,18	64,8	116,2	116,2	2,42
Пенопласт ПС-1-350	4,9	—	—	0,15	0,35	14,0	—	—	0,45

сталь 45, минимальную удельную прочность — алюминиевый сплав АД-1, латунь Л-63 и др. Модуль упругости металлов и сплавов не зависит от состояния материала, поэтому удельная жесткость $E_{\text{уд}}$ также не зависит от состояния материала.

Среди неметаллических материалов, предназначенных для работающих на растяжение/сжатие деталей, максимальной удельной прочностью обладают стеклопластик СВАМ и пресс-материал АГ-4С; минимальной удельной прочностью — фторопласт-4, пенопласт ПС-1-350 (последний имеет малую плотность $\gamma = 0,35$ г/см³);

из материалов, выбираемых для работающих на изгиб деталей, максимальную удельную прочность $\sigma_{уд}$ имеют стеклопластик СВАМ и пресс-материал АГ-4С; удельная прочность минимальна у фторопласта и фенопласта К-21-22.

Среди материалов для деталей, рассчитываемых на жесткость, максимальную удельную жесткость имеют пресс-материал АГ-4С и гетинакс II; удельная жесткость минимальна у фторопласта-4, пенопласта ПС-1-350. К наиболее перспективным материалам относятся бериллий, алюминиево-бериллиевые и магниеволитиевые сплавы. Ввиду высокой стоимости бериллий и его сплавы находят ограниченное применение (в основном в авиационной и космической технике). Достоинствами бериллия являются высокие прочность (рессоры из бериллия выдерживают 20 млрд. толчков, из обычного материала — 850 тыс.), термостойкость (до 700...800 °С), теплопроводность. К недостаткам относятся хрупкость (это затрудняет его прокатку, ковку, резание; детали обычно получают методом порошковой металлургии), токсичность, высокая стоимость. Алюминиево-бериллиевые и магниеволитиевые сплавы несколько дешевле и лучше поддаются обработке, но тоже довольно дороги и дефицитны. В конструкциях РЭС бериллий и его сплавы используют в исключительных случаях.

Обеспечение прочности и жесткости элементов конструкций РЭС затруднено рядом причин, прежде всего сложностью конструкции РЭС, которая является многокомпонентной системой. Каждый компонент может иметь несколько основных резонансных частот (для каждого элемента конструкции, для каждой степени свободы, для каждой гармоник спектра колебаний). В ряде случаев необходимо увеличивать прочность и жесткость при сохранении или даже уменьшении массы и габаритов разрабатываемой конструкции по сравнению с прототипами. Это особенно актуально с точки зрения снижения массы бортовых РЭС, сохранения природных ресурсов, возрастания удельной доли несущих конструкций в общей массе конструкций РЭС (30...40% для РЭС первых поколений, до 70% для РЭС четвертого поколения), уменьшения времени на обработку деталей.

В других случаях сложность обеспечения прочности и жесткости элементов конструкции определяется сложностью расчетного обоснования прочности и жесткости из-за того, что расчетные модели конструкций в виде рам чаще всего являются статически неопределимыми системами. Расчетная модель конструкции РЭС в большинстве случаев содержит значительное число степеней свободы и оказывается сложной для аналитического расчета. Это затрудняет получение модели простой и в то же время достаточно точной. Используемые машинные методы — конечных разностей, конечных элементов и различные вариационные методы — также имеют недостатки. Недостатком метода конечных разностей является большая трудоемкость составления

Исходные данные для составления расчетных схем прочности конструкции РЭС

Наименование узла, позиция сборочного чертежа	Вид и направление сил	Место (способ) крепления	Расчетная модель	Источник нагрузки
Кронштейн крепления корпуса, поз. 9	Статическая сила, действующая в направлении, перпендикулярном плоскости основания	К корпусу (прилив), к объекту (болтом)	Балка, защемленная на одном конце и нагруженная на другом	Масса прибора с учетом кронштейнов и перегрузки
Печатная плата в сборе, поз. 5	Вибрации, действующие в направлении, перпендикулярном плоскости платы	Сзади (соединителем), спереди (планкой с винтами), сверху и снизу (направляющими)	Пластина, жестко закрепленная по коротким сторонам, с опорой по длинным сторонам	Масса печатной платы и ЭРЭ с учетом вибрации частотой 20...70 Гц, амплитудой 0,5 мм

конечно-разностных уравнений при подготовке задачи к решению на ЭВМ. В связи с этим применение этого метода ограничивается только простыми конструкциями (например, не имеющими ступенчатого изменения жесткости). С помощью метода конечных элементов можно решать задачи для конструкции любой сложности, но трудоемкость подготовки исходных данных также велика. Метод возник как результат аппроксимации сплошной среды элементами конечных размеров. Используется он в тех случаях, когда нельзя произвести расчеты другими методами. Имеются трудности и при использовании аналоговых моделей.

Целесообразен следующий порядок работ по обеспечению прочности и жесткости РЭС: 1) составление расчетной схемы блока (узла), выявление действующих сил и элементов конструкции, в которых напряжения и деформации могут достигать недопустимо больших значений; 2) выбор расчетных моделей для критичных узлов; 3) расчет собственной частоты узлов и напряжений и сравнение их с допустимыми; 4) разработка мероприятий по обеспечению жесткости и прочности узлов. При определении расчетной схемы и расчетных моделей исходная информация представляется в виде таблицы, например табл. 5.7.

Жесткость конструкции (или ее элементов) обеспечивается при собственной ее частоте (или элементов) выше действующей,

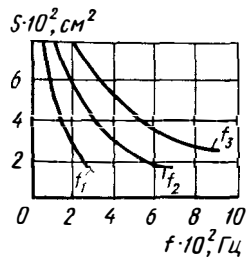




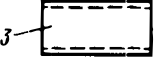
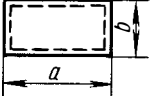


Рис. 5.23. Зависимость площади стеклотекстолитовой платы толщиной 1,5 мм, закрепленной по углам, от собственных частот (тона f_1 , f_2 , f_3)

Значение коэффициента C для стальной пластины

Схема закрепления пластины	a/b					
	1	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
	86	145	234	352	497	868
	56	84	124	176	240	864
	76	139	230	349	494	866
	69	93	131	181	244	406
	38	70	112	165	230	394
	47	76	117	170	234	375

Примечание: 1—сторона пластины свободно опирается; 2—сторона пластины закреплена; 3—сторона пластины свободна.

что исключает работу в резонансном режиме. Для плат таким способом можно получить собственную частоту не выше 400...500 Гц (рис. 5.23). В общем случае собственная частота (Гц) недемпфированной платы может быть определена по формуле $f = K_m K_{\text{масс}} C h \cdot 10^4 / a^2$, где $K_m = \sqrt{E \gamma_c / E_c \gamma}$; E и γ — модуль упругости и плотность материала платы; E_c и γ_c — модуль упругости и плотность стали соответственно; m_z и m_n — масса элементов и самой платы; C — коэффициент, зависящий от способа закрепления платы и соотношения размеров сторон платы a/b (рис. 5.24, табл. 5.8); h — толщина платы; a — длина платы (наибольший размер); b — ширина платы (наименьший размер); $K_{\text{масс}} = \frac{1}{1 + m_z/m_n}$.

Для увеличения жесткости платы могут быть приняты следующие меры: уменьшена длина и ширина, увеличена толщина; увеличено число точек крепления (в том числе за счет приклеивания), исключено ухудшение крепления за счет контровки резьбовых соединений; использованы дополнительные упоры, наклейки, выполняющие функции ребер жесткости (иногда эти

функции выполняют теплоотводящие шины или шины питания, поставленные на ребро, заливка жесткими пенокомпанундами); замена материала платы (например, стеклотекстолита металлом или керамикой).

В тех случаях, когда плата с закрепленными на ней компонентами работает в режиме резонанса при условии, что амплитуда колебаний A_0 не должна превышать 0,3 мм, а виброскорость V_0 — 0,8 м/с, толщина платы при известном коэффициенте виброизоляции при резонансе $\beta = \eta_{\text{рез}}$ (находится экспериментально) определяется по формуле

$$h = \frac{\omega_c a^2}{\pi^2 (1 + a^2/b^2)} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)\gamma}{Eg}}, \quad (5.2)$$

где ω_c — допустимая собственная частота; a , b — размер большей и меньшей стороны платы соответственно, м; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости материала платы, Н/м²; g — ускорение силы тяжести, м/с²; γ — плотность материала, Н/м³.

Величина ω_c в формуле (5.2) выбирается наибольшей из двух значений: $\omega_{c1} = \sqrt{\beta n g / A_0}$ для $A_0 < 0,3$ мм и $\omega_{c2} = \beta n g / V_0$ для $V_0 < 0,8$ м/с, где n — перегрузка; g — ускорение силы тяжести. Уменьшения β можно добиться, вводя в плату слои из вибропоглощающего материала. Требуемое значение β для ячейки того или иного типа при заданных параметрах внешних вибраций удобно определить по номограмме рис. 5.24. Ломаные линии, образующие семейство графиков для различных коэффициентов виброизоляции платы (ячейки), получены расчетным путем по приведенным формулам для $A_0 < 0,3$ мм и $V_0 < 800$ мм/с, причем левые части ломаных линий соответствуют первому условию, а правые (более пологие) — второму. В точке излома выполняются оба условия одновременно. Таким образом, область, ограниченная кривой графика сверху и осью абсцисс, является областью нормального обеспечения вибропрочности. Ступенчатая штриховая линия отображает заданные параметры внешних вибраций (перегрузки в определенных диапазонах частот). После определения собственной частоты платы необходимо из расчетной точки восстановить перпендикуляр к оси частот и сравнить перегрузки на этой частоте для внешних вибраций (ступенчатая кривая) и допустимую перегрузку плат (ломаная кривая с выбранным значением β). Если первый уровень перегрузок выше второго, то на семействе ломаных кривых надо выбрать такую

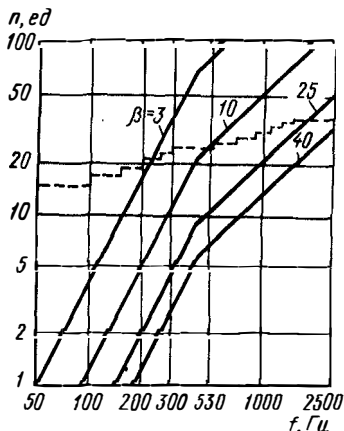


Рис. 5.24. Номограмма для определения коэффициента виброизоляции ячеек $\beta = \eta_{\text{рез}}$ (штриховая линия — график перегрузок ячейки)

кривую, где это условие будет нарушено, т. е. выбрать плату с меньшим значением β , что обеспечит требуемую вибропрочность.

Особое значение прочностные расчеты имеют для бортовых РЭС, где нежелательны излишние запасы прочности (вывод на орбиту 1 кг груза ракетой «Сатурн-5» составляет около 10 000 долл., снижение массы полезного груза на 1 кг позволяет уменьшить количество топлива на 42 кг). Прочностные расчеты выполняются методами, основанными на теории сопротивления материалов. Обеспечить заданную прочность при минимальной массе можно с помощью следующих конструкторских мер: 1) выбором наиболее прочных материалов (см. табл. 5.5 и 5.6); 2) обеспечением равнопрочности элементов конструкции путем удаления малонагруженного материала (рис. 5.25); 3) обеспечением равнопрочности сечений элемента конструкции благодаря одинаковому сечению детали при работе на растяжение/сжатие (рис. 5.26, а) или равнопрочности сечения при изгибе (рис. 5.26, б, в); 4) выбором конструкций с максимальным моментом сопротивления (рис. 5.25—5.28); 5) заменой работы элементов конструкции на изгиб работой на растяжение/сжатие (рис. 5.29); 6) дополнительным креплением узлов и компонентов с помощью держателей, ниток, клея, мастики; заливкой пенопластом и т. д.

Значительные перегрузки могут испытывать объемные проводники микросборок, что требует расчета их параметров. Для монолитных проводников без изоляции допустимая длина (мм) между двумя точками жесткого закрепления при условии отсутствия резонанса может быть определена по формуле

$$l = \sqrt[4]{E J_z / m_{\text{пр}} 1,88 / \sqrt{f}}$$
, где E — модуль упругости проводника, Н/мм²; f — частота колебаний, Гц; $m_{\text{пр}} = \gamma_{\text{пр}} \pi d^2 / (4g)$ — погонная масса проводника, Н·с²/мм²; $\gamma_{\text{пр}}$ — его плотность, Н/мм³; g — ускорение силы тяжести, мм/с²; $J_z = \pi d^4 / 64$ — момент инерции сечения круглого проводника, м⁴. С учетом запаса на контактирование длина проводника между контактами $l_k = 0,8l$. Расчет на усталостную прочность сводится к определению максимальных напряжений (Н/м) в проводниках $\sigma_{\text{max}} = 0,667 m g n l^2 d^{-3}$. Проводник сохраняет прочность в условиях усталостной нагрузки, если $\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{доп}}$. Для медных проводников при симметричном цикле (равенстве амплитуд относительно начального состояния) $\sigma_{\text{доп}} = 55$ МПа. Обычно допустимыми считаются размеры перемычек и выводов при длине $l \leq 60 \dots 100 d$ и консольности $L \leq 10 d$, где d — диаметр проводника. Если консольность превышает допустимую, то необходимо дополнительное крепление в промежуточных точках с помощью клея или покрытие лаком. Для микросборок максимальная длина перемычек из объемного провода без дополнительного крепления составляет 3 мм. Приведенные соотношения справедливы для проводников без изоляции. Наличие изолирующей оболочки снижает собственную

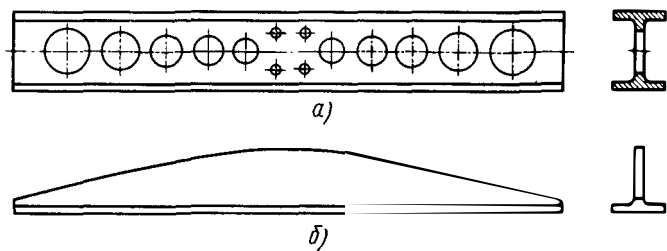


Рис. 5.25. Облегчение деталей в результате высверливания отверстий (а) и удаления малонагруженного материала (б)

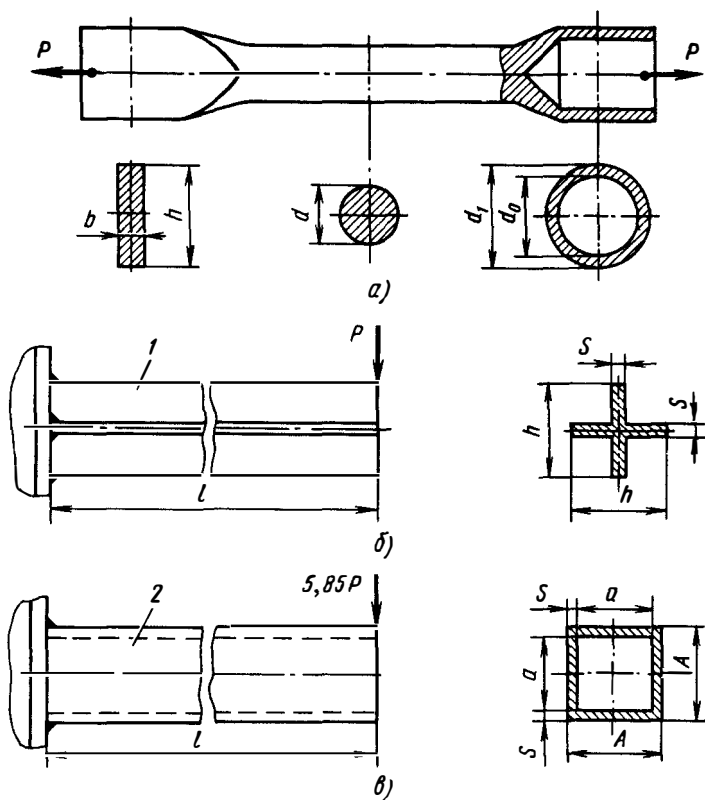


Рис. 5.26. Обеспечение равнопрочности деталей, работающих на растяжение (а) и на изгиб (б, в):
1 — крестообразное сечение; 2 — трубчатое сечение

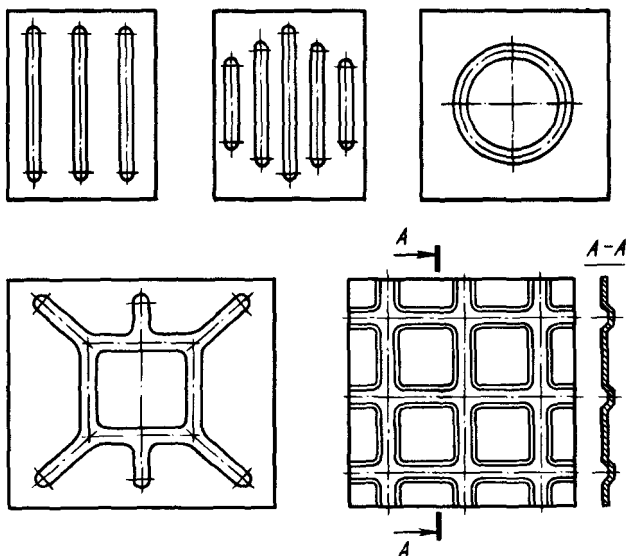


Рис. 5.27. Конфигурации выдавок

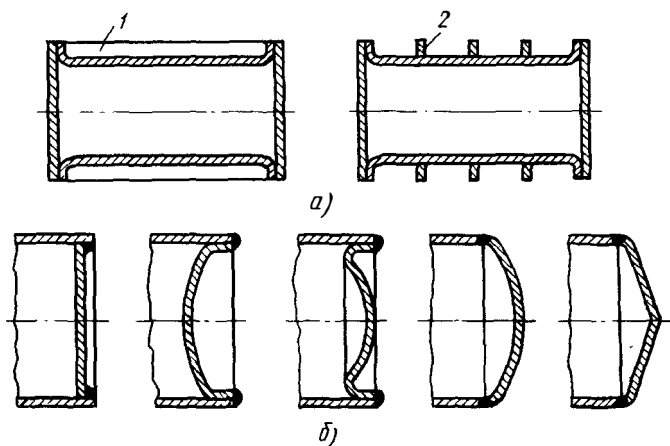


Рис. 5.28. Усиление стенок герметичных кожухов РЭС с помощью ребер (а) и виды дна (б):
1, 2 — ребра

частоту проводника. Так, собственная частота отрезка проводника типа МГТФ-0,07 длиной 85 мм составляет 118 Гц, а при снятии оболочки — 190 Гц.

Технологичность конструкции при обеспечении прочности и жесткости. При обосновании прочности и жесткости конструкции необходимо принимать меры для обеспечения ее технологичности

путем выбора вида типовой конструкции, марок материалов, способов формообразования, снижения материалоемкости и трудоемкости изготовления, способов упрочнения поверхности для увеличения предела выносливости. Наиболее технологичными являются типовые (базовые) конструкции, в которых материалы выбраны с учетом их прочности, способов формообразования, снижения материалоемкости и трудоемкости. Типовые конструкции выполняются с использованием типовых технологических процессов, хорошо оснащенных и отработанных. Для нетиповой конструкции выбор материалов осуществляется с учетом типа производства (способов формообразования), легкости их обработки с заданной точностью и шероховатостью, минимальной толщиной стенок.

Для индивидуального и мелкосерийного производства используются материалы, пригодные для обработки на универсальном металлорежущем оборудовании (станках с ЧПУ), — алюминиевый сплав Д16, титановый сплав ВТ4 и др. Для массового производства используются материалы, пригодные для обработки высокопроизводительным способом штамповки (сталь 08кп, титан ВТ4 и ВТ5, алюминиевые сплавы АМг, АМц); шероховатость обрабатываемых поверхностей $R_a = 3,2 \dots 1,6$ мкм, точность по квалитетам 6—9. Для литья под давлением используются магниевые сплавы (МЛ3, МЛ5, МЛ6, МА1, МА3, МА5), латуни (ЛС59-1Л, ЛН80-3Л), алюминиевые сплавы (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ11, АЛ28, АЛ32), толщина стенок которых может быть доведена до 0,5 мм.

Для повышения усталостной прочности деталей из металлов и сплавов иногда осуществляют поверхностное упрочнение путем поверхностной закалки токами высокой частоты, термохимической обработки (азотирования, цементации), обкатки поверхности шариком или дробеструйной обработкой для получения уплотняющего слоя. Повышению усталостной прочности способствуют увеличение плавности переходов между ступенчатыми поверхностями, наличие галтелей и фасок, повышение чистоты обработки поверхности. Перспективно для массового производства использование металлических порошков и их смесей с неорганическими материалами для формования элементов конструкции путем прессования с последующим спеканием

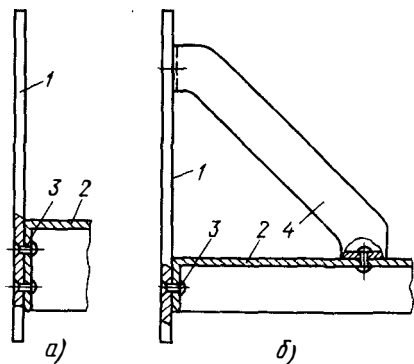


Рис. 5.29. Обеспечение прочности несущей конструкции заменой работы заклепки на изгиб (а) работой тяги на растяжение/сжатие (б):

1 — панель; 2 — шасси; 3 — заклепка; 4 — тяга

в защитной атмосфере. Механические свойства изделий из порошков близки по свойствам к литым деталям, по отдельным параметрам они выше. Например, для алюминия $\sigma_{\text{в}} = 300 \dots 400$ МПа по сравнению с $180 \dots 200$ МПа. Насыпная плотность алюминиевых порошков составляет $0,7 \dots 0,8$ г/см³ (ее постоянство определяет стабильность усадки при спекании). Однако детали, изготовленные из порошков, не могут иметь наружной и внутренней резьбы, должны иметь плавные переходы от тонких сечений к толстым и радиусы скругления не менее 1 мм.

Методом литья под давлением и прессованием изготавливают детали из пластмассовых пресс-порошков, часто имеющих наполнители (порошки, волокниты, стекловолокниты), с шероховатостью поверхности $R_a = 1,25 \dots 0,8$ мкм, точностью размеров по 11...13-му квалитетам. Усадка может быть менее $0,1 \dots 0,16\%$. Для полиимидов и стеклопластиков допускается толщина до 0,3 мм при диаметре отверстий до 0,5 мм. К пластмассовым деталям предъявляется ряд ограничений: радиусы скруглений должны быть не менее $0,5 \dots 1,0$ мм для внутренних и $1 \dots 2$ мм для наружных поверхностей, не рекомендуются прямоугольная и мелкая резьба (с шагом менее 0,4 мм). Поверхность пластмассовых деталей можно металлизировать. Чаще всего наносится слой меди толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков микрометров с последующим электрохимическим нанесением защитного слоя из сплавов олова, никеля, реже — золота. Способы металлизации — химическое осаждение, вакуумное или горячее распыление металлов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды механических динамических воздействий могут испытывать РЭС?
2. Что называют ударом? вибрацией? линейным ускорением?
3. Какова интенсивность виброперегрузок для РЭС, транспортируемой автомобилем?
4. Какие повреждения могут быть в РЭС под воздействием механических перегрузок?
5. Какие методы используют для защиты РЭС от механических перегрузок?
6. Какие силы воздействуют на виброизолированный объект?
7. Как зависит коэффициент виброизоляции η от коэффициента относительно демпфирования D и коэффициента расстройки γ ?
8. Какие виды амортизаторов Вам известны? Каковы их характеристики и области применения?
9. Какова последовательность проектирования системы виброизоляции РЭС?
10. Какие свойства конструкционных материалов наиболее важны при расчете и обеспечении прочности РЭС.?
11. Какие конструкционные материалы наиболее применимы для деталей, работающих на растяжение/сжатие?
12. Назовите порядок расчета прочности и жесткости узлов РЭС.
13. Назовите методы обеспечения технологичности виброзащитных и уда-розашитных конструкций РЭС.

КОНСТРУИРОВАНИЕ РЭС С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ЭРГОНОМИКИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭСТЕТИКИ

§ 6.1. Влияние требований эргономики и технической эстетики на эффективность и качество РЭС

Уже в глубокой древности люди поняли, что орудиям труда необходимо придавать удобную для работы форму и расширять тем самым возможности человеческих органов. В доисторические времена удобство и соответствие орудий труда потребностям человека были вопросом жизни и смерти, так как, если человек конструировал и изготовлял плохое оружие и не мог достаточно эффективно применить его на охоте, на свете очень скоро становилось одним плохим конструктором меньше. Позднее человек стал обращать внимание и на внешнее оформление изделий. У мастеров Древней Греции и средневековых ремесленников были неразрывны красота и польза, форма и содержание изделия.

С появлением в середине XVIII в. машин от согласования характеристик машин и возможностей человека стала зависеть производительность промышленного труда. Особенно остро этот вопрос встал во время первой мировой войны, когда продолжительность рабочего дня на военных заводах воюющих стран выросла до 13...14 ч и резко увеличился травматизм.

В конце 30-х годов появилась военная техника, которая не могла обслуживаться одним оператором, в связи с чем психофизиологические

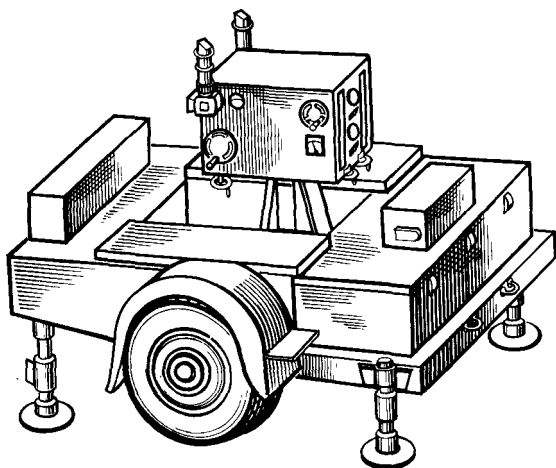


Рис. 6.1. Прибор выработки установок для стрельбы по воздушным целям ПУАЗО-3 (Ленинград, Кронверк, музей Великой Отечественной войны)

нагрузки возросли настолько, что стали превышать возможность одного человека-оператора, даже при отборе и тренировке. Число операторов увеличивалось. Например, для обслуживания разработанного перед Великой Отечественной войной прибора выработки установок для стрельбы по воздушным целям и передачи их на зенитные орудия (ПУАЗО-3) требовался штат в десять человек, которые располагались на скамейках вокруг прибора (рис. 6.1). В период становления кибернетики считалось, что все человеческие функции можно передать электронной вычислительной машине (ЭВМ). Однако оказалось, что это далеко не так ввиду различия возможностей человека и ЭВМ: скорость восприятия единицы информации мозгом человека составляет около 10^{-2} с, машиной — 10^{-8} с; однако мозг человека обладает большими возможностями параллельной обработки информации, что дает ему преимущество в восприятии сложных комплексов сигналов и образов; память человека хранит большое число связей, память машины хранит однотипные данные; машина не может мыслить, а лишь моделирует явления, причем обрабатывает модель быстрее человека; по запасу энергии машина превосходит человека, человек нуждается в периодическом отдыхе, обладает высокой самоорганизацией. Движимый имеющейся у него целью, он постоянно контролирует и прогнозирует ход процесса достижения цели, используя свои функциональные возможности и резервы.

Анализ возможностей человека и машины показывают, что *машине следует отдавать предпочтение*: при выработке частных решений на основе общих правил; при математических расчетах по определенным формулам или правилам; при выполнении стандартных и повторяющихся движений или действий (особенно при дефиците времени и в некомфортных условиях); при необходимости сохранения в памяти (особенно оперативной) большого количества информации; когда необходимо опознать объект при отсутствии больших помех; когда требуются быстрая реакция и значительные силовые воздействия в процессе управления реальным объектом. *Человеку следует отдавать предпочтение*, если необходимо: делать сообщение или принимать решение на основе ограниченного числа факторов (неполной информации); опознавать объект в условиях значительных помех; реагировать на случайные и непредвиденные обстоятельства; решать задачи, которые не могут быть алгоритмизированы, или задачи большой ответственности (из-за высокой стоимости ошибки). Таким образом, человек и машина дополняют друг друга по своим возможностям. Если при совместной работе параметры машины не соответствуют параметрам человека, то повышается его утомляемость, растет число ошибок и травм.

Установлением взаимосвязи параметров человека и машины занимается эргономика (от греч. *ergon* — работа, *nomos* — закон) и ее раздел — инженерная психология. *Эргономика* — научная дисциплина, комплексно изучающая человека (группу людей) в конкретных условиях его (их) деятельности, связанной с использованием машин (технических средств). Человек, машина и среда рассматриваются в эргономике как сложное, функциональное целое, в котором ведущая роль принадлежит человеку. *Инженерная психология* — отрасль науки, изучающая деятельность человека в системе управления и контроля, его информационное

взаимодействие с техническими устройствами этих систем. Объектом изучения инженерной психологии, в частности, являются сенсорный вход (органы чувств), моторный выход (двигательный аппарат) человека-оператора, процессы переработки информации в нормальных и критических условиях его жизнедеятельности.

Вопросами реализации требований эргономики художественными средствами занимается другая отрасль науки — дизайн, иногда называемый технической эстетикой (от греч. *aestheticos* — чувствующий). Под *дизайном* (от англ. *design* — замысел, рисунок, проект) понимаются различные виды проектировочной деятельности, имеющие целью формирование эстетических и функциональных качеств предметной среды. За рубежом распространено мнение, что главная задача дизайна — создание вещей, которые легко было бы продавать. *Техническая эстетика* рассматривает основополагающие методы и принципы художественного конструирования, проблемы стиля и мастерства. Требования инженерной психологии и технической эстетики учитывались и при конструировании РЭС первых поколений. Особенностью конструирования современных РЭС является усиление этих требований ввиду широкого использования в конструкции РЭС пластмасс, дающих конструктору большую свободу выбора цвета и формы изделия; все большей зависимости внешнего вида и габаритов РЭС от элементов управления и индикации (ввиду уменьшения размеров панели управления); возрастания требований к внешнему виду; выпуска РЭС с учетом требований всех пользователей.

В настоящее время известны эргономические показатели качества конструкции, а также эстетические средства их реализации. Эргономические показатели конструкции делятся на гигиенические (освещенность, вентилируемость, температура, напряженность электрического и магнитного полей, токсичность, шум, вибрация), антропометрические (соответствие конструкции изделия размерам и форме тела человека и его частей, входящих в контакт с изделием), физиологические и психофизиологические (соответствие конструкции изделия силовым, скоростным, зрительным возможностям человека), психологические (соответствие конструкции изделия возможностям восприятия и переработки информации, закрепленным и вновь формируемым навыкам человека).

Основные характеристики человека-оператора. Эргономические показатели человека служат для оценки согласованности его возможностей с требованиями, обусловленными особенностями техники и средой обитания. Обычно человек выполняет свои функции на *рабочем месте*, под которым понимается зона, оснащенная необходимыми техническими средствами. Рабочее место должно быть приспособлено для конкретного вида труда и для работников определенной квалификации с учетом их

Гигиенические параметры среды для различных условий работы человека-оператора

Параметры	Условия		
	комфортные	некомфортные	невыносимые
Температура, °С:			
тепло	+22...+24	+(35...44)	Выше +44
холод	+18...+22	-1	Ниже -1
Вентиляция, м ³ /(ч·чел)	34...22	8,5	Менее 8,5
Шум, дБ	40...50		
	(лаборатория)		
	80...90	120	130...135
	(производство)		
Амплитуда вибраций, мм	0...0,2	1,3	Более 1,3
Частота вибраций, Гц		6,8 (25...30)	Менее 6,8
Линейное ускорение, g	0...0,1	1	Более 1
Влажность, %	20...60	10	Менее 10
Концентрация СО ₂ , %	0...0,01	--	Более 0,01
Наклон тела, град	0...±5°	±20°	> +20°С, < -20°С
Плотность потока мощности СВЧ, Вт/см ²	0...0,001	0,001...0,01	» 0,01
Высота над уровнем моря, м	0...3000	3000...6000	» 6000
Количество выделяемой кожей влаги, г/ч	30...450	Более 450	—

антропометрических, физиологических, психофизиологических и психологических возможностей и особенностей. Надежность работы операторов в значительной степени зависит от оптимальных значений *гигиенических показателей* (параметров) окружающей среды (табл. 6.1). Между комфортными и некомфортными условиями существует психологическая граница, а между некомфортными и невыносимыми — физиологическая граница. Допустимые значения гигиенических параметров изложены в стандартах двенадцатой группы ГОСТа (система стандартов по безопасности труда).

К *антропометрическим показателям* человека-оператора относятся геометрические пропорции его тела, которые необходимо учитывать при конструировании пультов управления РЭС. Антропометрические показатели определяют положение элементов индикации и управления, размеры пульта, размеры и форму рабочего кресла. Учет формы и размеров человеческого тела особенно актуальны при проектировании сидений, когда выбираются форма и профиль сиденья, спинки, подлокотников. Антропометрические показатели изменяются во времени и различаются в зависимости от пола, возраста, профессии, национальности человека-оператора.

Средние статистические данные некоторых антропометрических показателей человека-оператора (рост, ширина плеч и др.),

Некоторые антропометрические данные человека-оператора

Антропометрические данные	Мужчины		Женщины	
	М, см	σ, см	М, см	σ, см
Рост	167,8	5,8	156,7	5,7
Ширина плеч	44,6	2,2	41,8	2,4
Ширина внешнего контура расставленных ног (ступней)	82,6	7,2	72,6	7,2
Длина руки, протянутой вперед	74,3	3,3	68,6	3,1
Ширина внешнего контура колен (для ниши стола)	23,0	1,8	22,6	1,8
Высота в положении «сидя»	130,9	4,3	121,1	4,5
Уровень глаз от пола в положении «сидя»	118	4,3	109,5	5,5
Локтевая ширина (для подлокотников)	44,8	3,2	45,2	4,4
Наибольшая ширина бедер	34,4	2,1	38,8	3,1
Высота до уровня сидения	42,2	2,2	37,0	2,2

Примечание. М — математическое ожидание; σ — среднеквадратическое отклонение.

полученные при обследовании мужчин и женщин в возрасте от 20 до 59 лет, работавших на московских предприятиях разного профиля в 50-е годы, представлены в табл. 6.2. Как видно из таблицы, разброс антропометрических показателей обследованных работников оказался велик. Это усложняет задачу конструктора, так как средняя величина не всегда позволяет определить оптимальные для конкретного человека размеры конструкции. Для сравнения можно сопоставить средний рост людей в различных странах в середине 70-х годов: СССР — 170 см; США — 175,7 см; Франция — 170 см; Англия и Германия — 172 см; Япония — 163,5 см.

К *физиологическим показателям* относятся силовые параметры различных органов движения человека (табл. 6.3). Характеристики напряженности физической работы приведены в табл. 6.4.

К *психофизиологическим показателям* относятся скорость и темп движений частей тела, *характеристики зрения*. Эти показатели необходимо учитывать при выборе конструкции элементов управления (ручек, кнопок, тумблеров и т. д.), элементов индикации (цифровых табло и пр.). Так, среднее время вращательного движения руки с преодолением сопротивления составляет 0,72 с, а без преодоления сопротивления — 0,22 с. Скоростные возможности руки и ее звеньев человека-оператора приведены в табл. 6.5 и 6.6.

Пожалуй, самыми важными психофизиологическими показателями человека являются характеристики зрения. Это обусловлено тем, что с помощью зрения человек получает 80...90% всей информации.

Сила мышц рук оператора, Н

Группа мышц	Мужчины	Женщины	Группа мышц	Мужчины	Женщины
Мышцы кисти руки: правой левой	380 360	220 200	Мышцы большого пальца руки: правой левой	120 100	90 80

Таблица 6.4

Основные параметры физической работы человека

Напряженность работы (нагрузка)	Мощность, Вт	Вес груза, Н	Характер работы	Ходьба за смену, км	Поза	Наклоны до 30 за смену, раз
Легкая	6...12	До 30	Стац.	Нет	Стоя	Нет
Средняя	10...44	50...150	Стац.	Нет	Сидя, стоя	50...100
Тяжелая	22...90	150...400	Нестаци.	2...4	Сидя, стоя	Нет
			Стац.	Нет	Сидя, стоя	100...300
			Нестаци.	7 и более	Сидя, стоя	Нет

Таблица 6.5

Скоростные возможности рук

Вид движения	Максимальная частота, с ⁻¹	
	правая рука	левая рука
Вращательное	4,8	4,0
Нажимное	6,7	5,3

Таблица 6.6

Скоростные возможности подвижных звеньев руки

Движущееся звено	Частота движения, мин ⁻¹	Движущееся звено	Частота движения, мин ⁻¹
Палец руки	204...406	Плечо	99...344
Кисть	360...431	Стопа	300...378

Глаз способен воспринимать электромагнитные излучения длиной волны $\lambda = 300 \dots 700$ нм (рис. 6.2). Цвет (рис. 6.3) ассоциируется у человека с понятием тепла и холода, приближения и отдаления, легкости и тяжести. Цвета, находящиеся на противоположных сторонах цветового круга, называются взаимодополняющими (например, красный и зеленый). Разные цвета оказывают разное физиологическое воздействие. Кроме цвета глаз реагирует на яркость и контраст.

Яркость — это такая характеристика зрительного раздражителя, которая непосредственно оценивается глазом. Диапазон яркостей, при котором возможна работа глаза, очень широк: от 10^{-4} до 10^8 кд/м². Оптимальная яркость фона, при которой отмечается наибольшая разрешающая способность зрения, составляет 10^4 кд/м². Для восприятия необходима не только оптимальная яркость, но и оптимальное *соотношение яркостей* предметов — контраст. Рекомендуются следующие соотношения яркостей: 2:1 — между рабочим полем и ближним фоном; 10:1 — между рабочим полем и дальним фоном; 50:1 — между самым светлым и самым темным пятнами, попадающими в поле зрения.

Точное восприятие цвета зависит от контрастности к цветовому фону. *Наибольшей разрешающей способностью* по цвету отличаются следующие комбинации при восприятии знаков: синий на белом, черный на желтом, зеленый на белом, черный на белом, зеленый на красном, красный на желтом. Восприятие изображения глазом — процесс не просто физический (оптический), а более сложный — психофизиологический.

Реакция глаз характеризуется полем зрения, скоростью ориентаций в поле зрения, остротой зрения, аккомодацией, адаптацией, стробоскопичностью, стереоскопичностью.

Поле зрения обоих глаз, при которых обеспечивается правильное восприятие предметов, иллюстрирует рис. 6.4.

Острота зрения определяется способностью глаза различать детали предметов, характеризуется угловыми единицами и зависит от работающей области глаза, освещенности и подвижности пред-

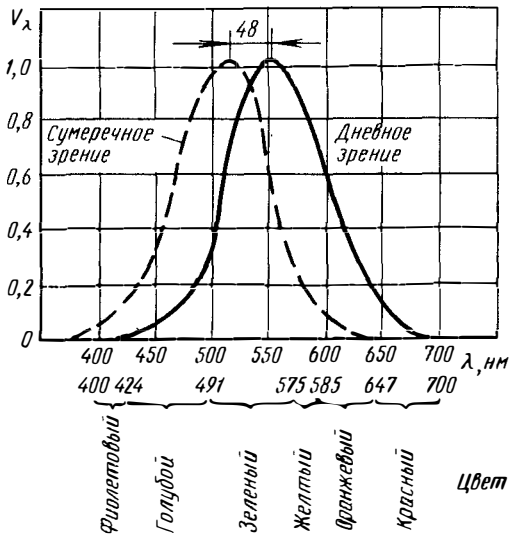


Рис. 6.2. Относительная чувствительность глаза V_λ для дневного (колбочки) и сумеречного (палочки) зрения

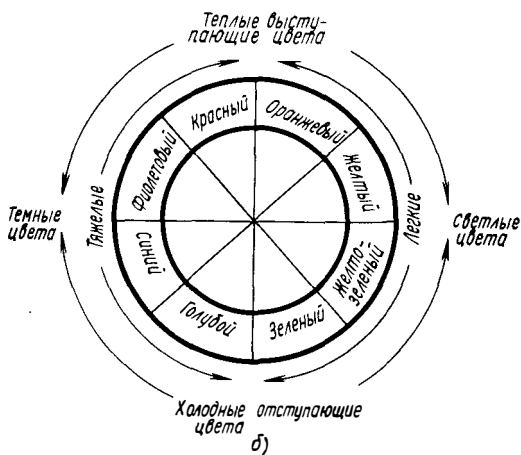
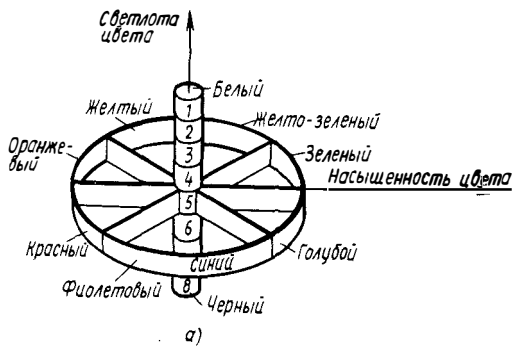


Рис. 6.3. Цвет и его восприятие:

а — цветное тело; б — цветовой круг; 1—8 — светлота цвета (8 — минимальная светлота)

Таблица 6.7

Замечаемая разница размера соседних элементов

Расстояние от глаз до предмета, м	10	5	2	1	0,5
Замечаемая разница размера, мм	40	13	1,5	0,4	0,1

мета. Разрешающая способность зрения иллюстрируется табл. 6.7, а рекомендуемый размер знаков устройств индикации — табл. 6.8.

Аккомодация — это способность глаза приспособливаться к ясному видению предметов, находящихся от него на различном расстоянии. С возрастом аккомодация глаз понижается. Например, если в возрасте 20 лет среднее минимальное

Зависимость минимальной высоты знаков от их расстояния до наблюдателя

Расстояние, м	Высота знаков, мм			Расстояние, м	Высота знаков, мм		
	больших	средних	малых		больших	средних	малых
До 0,5	5,5	4	2,5	2 ... 4	40	30	17,5
0,5 ... 1	10	7	4,5	4 ... 6	65	50	30
1 ... 2	20	15	9				

фокусное расстояние равно 10 см, то у 60-летнего человека оно равно 1 м.

Скорость ориентации в поле зрения проявляется при наблюдении предметов, расположенных на различных расстояниях от наблюдателя. Например, требуется от 0,6 до 1,2 с для четкого различения предметов, если расстояние до них меняется от 0,1 до 0,5 м.

Адаптация — это изменение чувствительности глаза под воздействием раздражителей. Процесс приспособления глаза к темноте называется темновой адаптацией. При переходе из светлого помещения в темное и через час пребывания в темноте чувствительность глаз увеличивается в 200 тыс. раз. Для адаптации к темноте требуется примерно 20 мин. Однако, взглянув на яркий источник света, человек уже через 5...6 с может в темноте различить предметы.

Стробоскопичность глаз обусловлена задержкой в восприятии информации. Если информация поступает чаще, чем она может восприниматься, то отдельные ее порции становятся неразличимыми. Глаз различает до 15...20 мерцаний в секунду. Меньшая скорость мерцаний фиксируется глазом как отдельные вспышки, большая — как непрерывный свет. Мерцание изображения утомляет глаза.

Стереоскопичность глаз проявляется в том, что человек воспринимает две отдельные картины, хотя при этом может действовать только одно световое раздражение. Стереоскопическое изображение

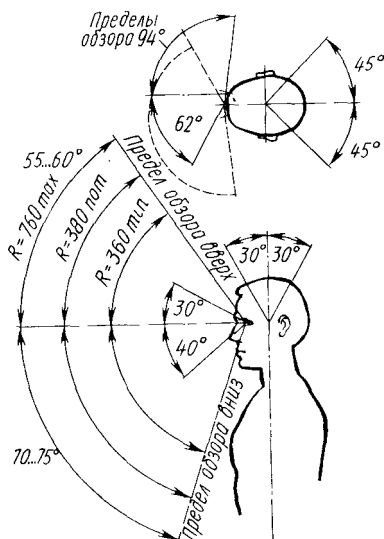


Рис. 6.4. Поле зрения человека и зона доступности элементов управления и индикации:
 R — радиус, определяющий границы зоны доступности руками человека-оператора

имеет «порог глубины», соответствующий бинокулярному параллаксу 5 угл. с. Радиус стереоскопического зрения 1350... 2600 м.

Тактильная чувствительность человека — это способность воспринимать механические раздражения кожи. При легком касании предмета появляется чувство прикосновения, а при более сильном — чувство давления. Тактильная чувствительность обеспечивает распознавание оператором элементов управления по форме и размерам на ощупь.

Большое значение при проектировании рабочего места имеет учет времени реакции (латентный период) того или иного органа восприятия сигналов (табл. 6.9). При увеличении уровня сигнала (x) время реакции может уменьшиться в несколько раз. При этом

Таблица 6.9

Время реакции на отдельные сигналы

Анализатор	Латентный период, с	Анализатор	Латентный период, с
Тактильный	0,09 ... 0,22	Температурный Вестибулярный Болевой	0,28 ... 1,6 0,4 0,13 ... 0,89
Слуховой	0,12 ... 0,18		
Зрительный	0,15 ... 0,22		
Обонятельный	0,31 ... 0,39		

необходимо учитывать, что ощущение человека усиливается пропорционально не абсолютному, а относительному приросту уровня сигнала ($\Delta x/x$). Для света отношение $\Delta x/x=0,01$; для звука — 0,1. При одновременном воздействии по нескольким каналам (звук, свет, давление, запах и т. д.) скорость реакции увеличивается.

К психологическим относится показатель соответствия изделия возможностям восприятия и переработки информации человеком, а также вновь формируемым навыкам. Восприятие и переработка информации зависят от психологических возможностей человека

Таблица 6.10

Основные характеристики нервно-психической нагрузки человека по вниманию

Интенсивность нагрузки	Число одновременно наблюдаемых объектов, шт.	Время сосредоточенного наблюдения относительно продолжительности смены	Частота сигналов, $ч^{-1}$
Легкая	До 4	До 0,12	До 15
	4—5	0,12 ... 0,25	35 ... 75
Средняя	5—7	0,25 ... 0,37	75 ... 125
	7—10	0,37 ... 0,5	125 ... 175
Тяжелая	10 ... 25	0,5 ... 0,75	175 ... 300
	Очень тяжелая	> 0,75	> 300

Основные характеристики нервно-психической нагрузки человека по аналizаторным функциям

Нагрузка	Размеры объекта наблюдения, мм	Время пассивного наблюдения относительно продолжительности смены	Длительность повторяющихся операций за смену, с	Отношение уровней звукового сигнала и шума, дБ
Легкая	До 5 5 ... 1	До 0,75 0,75 ... 0,8	150 150 ... 100	18 18 ... 15
Средняя	1 ... 0,5 0,5 ... 0,3	0,8 ... 0,85 0,85 ... 0,9	100 ... 65 65 ... 45	15 ... 12 12 ... 6
Тяжелая	0,3 ... 0,15	0,9 ... 0,95	45 ... 20	6 ... 0
Очень тяжелая	0,15	0,98	20 ... 2	0 ... 5

и нервно-психической напряженности работы (табл. 6.10—6.11). При большой нервно-психической напряженности работы особое внимание должно быть обращено на концентрацию внимания, должны быть сведены к минимуму отвлечения оператора и обеспечены наилучшие условия восприятия и переработки информации, реализации исполнительных функций (выдачи управляющих команд).

При проектировании системы человек—машина необходимо учитывать взаимное влияние человека и машины при оценке точности системы. Неправильно выбранная конструкция уменьшает точность работы оператора; от неквалифицированного оператора нельзя получить высокую точность работы системы человек—машина даже при совершенной конструкции машины. Однако влияние ошибок оператора на точность системы сильнее, чем влияние несовершенства конструкции РЭС. При эргономическом обосновании рабочего места человека-оператора используются государственные и отраслевые стандарты.

§ 6.2. Художественное оформление конструкции РЭС. Основы композиции

Алгоритм художественного конструирования РЭС представлен на рис. 6.5. При разработке внешнего оформления конструкции РЭС наиболее важно учесть различные ограничения (социально-экономические, эргономические, конструктивные, технологические), а также факторы технической эстетики, влияющие на конструкцию через субъективные особенности художника-конструктора (знания в области технической эстетики, эргономики, конструирования электронной аппаратуры, технологических художественных возможностей производства, социальных проблем и т. д.). Художник-конструктор, используя объективные факторы

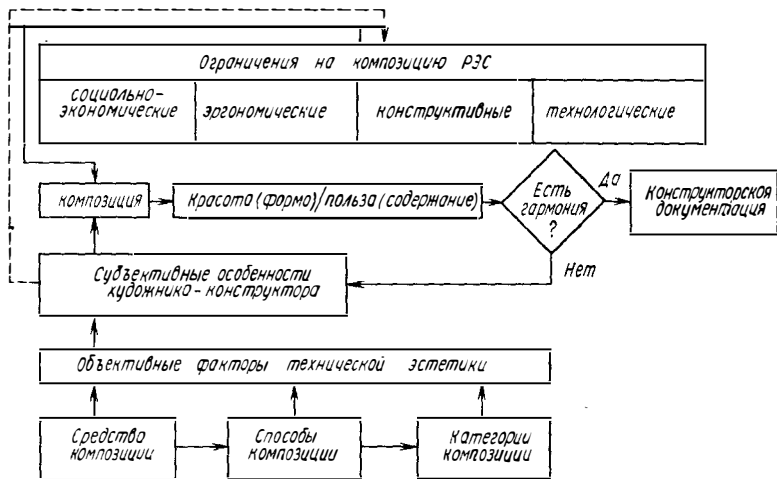


Рис. 6.5. Алгоритм художественного конструирования РЭС

технической эстетики и учитывая различные ограничения, синтезирует художественное оформление конструкции. Оценивая результаты очередного шага конструирования, он может перейти к другому варианту или остановиться на последнем и выпустить конструкторскую документацию на художественное оформление. В ряде случаев художник-конструктор может влиять на изменение ограничений, например настоять на изменении способов отделки, схемы компоновки конструкции.

К социально-экономическим факторам относятся: обеспечение общественно-необходимых потребностей, ориентация на конкретную группу потребителей, устранение дублирования функций в различных устройствах (радиоприемник, магнитола), унификация, экономия материальных и трудовых ресурсов, конкурентоспособность, обеспечение сбыта, патентоспособность. Во все времена социальная принадлежность вещи, ее классовый характер были одной из существенных сторон жизни вещи, что отражалось во внешнем оформлении. Так, часы часто выполняли дополнительно к основным своим функциям ряд других: служили украшением для женщин и в богатых жилищах, были предметом обихода священнослужителей, входили в состав научных приборов. И в настоящее время художественное оформление, например радиоприемника, зависит от его назначения — связная аппаратура, бытовая аппаратура индивидуального или коллективного пользования. При художественном конструировании обязательно должна учитываться социальная группа потребителей: женщины, космонавты, военнослужащие, врачи, дети и т. д.

Расширение участия СССР в мировой торговле остро ставит вопросы патентоспособности и обеспечения сбыта. Форма может патентоваться. Патентованию подлежит *промышленный образец*, который признается новым художественно-конструкторским решением изделия, определяющим его внешний вид, соответствующим требованиям технической эстетики, пригодным к изготовлению промышленным способом и дающим положительный эффект.

Художественно-конструкторское решение признается новым, если по совокупности своих существенных признаков оно отличается от аналогичных решений, известных в СССР или за рубежом, и не раскрыто на дату приоритета заявки для неопределенного круга лиц настолько, что стало возможным его осуществление.

Художественно-конструкторское решение признается соответствующим требованиям технической эстетики, если оно обладает художественной и информационной выразительностью, целостностью композиции, рациональностью формы (удовлетворяет эксплуатационным, конструктивным и технологическим требованиям, соответствует требованиям эргономики).

Положительный эффект может быть экономическим (экономия материала и др.), техническим (упрощение конструкции или технологии и т. д.) либо каким-то иным (повышение комфортности, улучшение техники безопасности и т. д.).

Качество художественного оформления РЭС (его композиции) характеризуется соотношением красоты и пользы (формы и содержания), т. е. гармоничностью (от греч. harmonia—связь); это стройность, соразмерность частей; слияние различных компонентов объекта в гармоничное целое (изделие). Это является одним из основных положений марксистско-ленинской эстетики. В то же время необходимо отметить, что вследствие отставания в технологии часто отечественные образцы РЭС имеют внешнее оформление на более низком эстетическом уровне, чем зарубежные.

Категории композиции являются (табл. 6.12) наиболее общими факторами технической эстетики.

Композиция (от лат. compositia — составление, расположение, сочинение) определяет взаимосвязь важнейших элементов конструкции художественного произведения и выражает замысел автора. Итальянский мыслитель эпохи Раннего Возрождения Леон Баттиста Альберти писал: «*Красота* (синоним прекрасного) есть строгая соразмерная гармония всех частей, объединенных тем, чему они принадлежат,—такая, что ни прибавить, ни убавить, ни изменить ничего нельзя, не сделав хуже...». Красота характеризуется рядом частных показателей, к которым относятся гармоничность, выразительность, оригинальность, стилевое единство, современность стиля. Все эти критерии взаимосвязаны и носят качественный характер, что затрудняет объективность оценки.

Взаимосвязь средств, способов, категорий и критериев композиции

Средство	Способ	Категория	Критерии
Форма частей и целого Цвет Взаимное расположение Масштаб Пропорции Ритм Симметрия/асимметрия Взаимодействие объема и пространства	Выделение ведущего признака (повторение большого в малом, выделение композиционного центра, соподчиненность, соразмерность, расчлененность)	Тектоника. Объемно-пространственная структура. Цветовая гармония	Красота/польза (форма/содержание). Гармоничность. Выразительность (целостность формы). Оригинальность. Стилевое единство. Современность стиля. Утилитарность
Распределение масс частей относительно центра композиции Пропорции Масштаб	Зрительное композиционное равновесие		
Форма Цвет Взаимное расположение Пропорции Масштаб	Контраст		
Тон Фактура Пластика Светотень	Нюанс		
Ритм Симметрия/асимметрия Взаимодействие объема и пространства	Статистика/динамика		

Гармоничность — свойство формы конструкции быть органично согласованной с элементами формы, что достигается определенным соотношением размеров, форм, яркости, цвета, расположения отдельных элементов. Требование гармоничности включает требование согласованности с помещением, где располагается конструкция.

Выразительность — способность конструкции своим внешним видом наглядно отображать качество, обеспечивая соответствующее эстетическое восприятие. Выразительности добиваются с помощью таких способов и средств композиции, как целостность формы, композиционное равновесие, взаимодействие конструкций и пространства.

Оригинальность — совокупность своеобразных элементов формы и их отношений, позволяющая отличить данную конструкцию от однотипных. Это понятие предполагает наличие национальных, отраслевых, фирменных признаков.

Стиль — это устойчивая общность формально-художественных средств, отражающая исторически сложившиеся социально-экономические и идейно-эстетические принципы и художественно-конструкторские методы и средства их воплощения. Известно много стилей: античный (классический), готический, возрождения, рококо, барокко, русский классический и т. д. Ведущими принципами современного стиля являются предельная общественная целесообразность, гуманность (Всё для человека!), демократизм (Всё для народа!), общий мажорный тон, чистота, ясность, изящество.

Современность стиля означает согласованность между общим стилем конструкции и лучшими образцами мировой культуры.

Мода (в отличие от стиля) представляет собой менее устойчивую общность названных методов и средств.

Польза изделия заключается в удовлетворении социально-экономических потребностей определенной группы пользователей, а также — в удобстве пользования изделием (утилитарности).

Форма в художественном конструировании рассматривается как сложное комплексное явление. Это система материальной организации предметов (объемно-пространственной, фактурно-цветовой, конструктивно-технологической и т. д.). Форма отражает все качества конструкции: технологичность, рациональность компоновки, удобство эксплуатации и обслуживания, эстетическую выразительность и т. д. Она обладает рядом свойств: объемно-пространственной структурой, геометричностью строения (поверхности, грани, ребра, точки), весомостью, прочностью, массивностью, плотностью, динамичностью, цветовым и световым колоритом. Зная эти свойства, можно с помощью контраста создать максимально выразительное изделие. Одной из важнейших характеристик формы является ее целостность, определяющая возможность мгновенной оценки структуры и качества изделия. Из потока неупорядоченной информации человек может воспринять за секунду не более 3...5 бит. Это значит, что число членений формы должно быть не более 8...32 ($2^3...2^5$). При приеме организованной (осмысленной) информации человек может воспринять за секунду 15...20 (до 50) бит. Важнейшей характеристикой формы является ее *утилитарность*.

Подобно любой научной дисциплине, теория композиции базируется на категориях (тектоника, объемно-пространственная структура, цветовая гармония), отражающих наиболее существенные связи и отношения формы. Эти категории образуются с помощью способов и средств композиции (табл. 6.12).

Рассмотрим категории композиции.

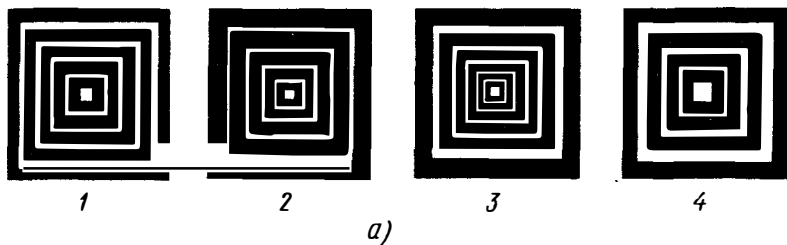
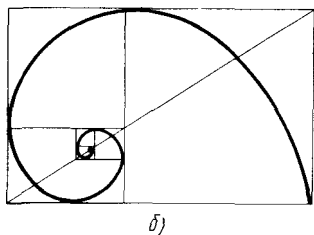


Рис. 6.6. Организация ритма вариацией шага и толщины линий (а), изменением крутизны кривой (б):



1 — ритм проявляется только в закономерном сокращении стороны квадратов; 2 — активность ритма возрастает с убыванием толщины решетки к центру; 3 — предельно активен ритм при одновременном изменении промежутков и толщины; 4 — ритм нарушен вследствие изменения интервала при неизменной толщине решетки

Тектоника есть зримое отображение работы конструкции и материала в форме, т. е. связь формы и содержания. Например, говорят о тектонике штампованной, прессованной, литой, деревянной конструкции.

Объемно-пространственная структура характеризует взаимодействие формы и ее элементов между собой и с окружающим пространством. Инженер часто взаимодействие изделия и пространства просто не учитывает. Различают следующие конструкции: плоскую (фронтальную), объемную, глубинно-пространственную. Типичный пример плоской конструкции — лицевые панели, характерным признаком которых является взаимное расположение элементов плоской и пространственной формы по двум координатам. Объемную конструкцию представляет форма изделия в целом, которая характеризуется распределением объемов и масс по трем координатам. Все три измерения в композиционном отношении одинаково важны. Глубинно-пространственная структура учитывает размещение одних объектов среди других объектов комплекса и достигается с помощью выбора пропорций и масштаба.

Важная категория композиции — *цветовая гармония*; она реализуется с учетом требований эргономических характеристик зрения. Умело сочетая те или иные цвета, можно создать впечатление (см. рис. 6.3, б) легкости и тяжести, холода и тепла, простора и тесноты, выступления и отступления элементов и узлов изделия. Цвет необходим для выделения нужных деталей (наиболее важных клавиш, элементов, находящихся под высоким напряжением и т. д.). Цвет является средством эстетического воздействия, влияет на настроение, поднимая и понижая эмоциональный

тонус, вызывая творческий подъем. С помощью цвета можно акцентировать нужные элементы формы или композиционно ослабить их, соподчинить и в известной мере объединить, когда необходимо «собрать» элементы структуры, которые не поддаются иным приемам соподчинения. Правильное применение цвета повышает конкурентоспособность изделия. Хотя существуют объективные закономерности композиции, но цвет — одно из самых «субъективных» средств композиции.

Особенно тщательно должны быть продуманы цветовые контрасты, ибо излишний контраст может нарушить целостность формы. Для РЭС наиболее целесообразно применять гармонирующие оттенки одного и того же цвета (например, черный, темно-серый, светло-серый или песочный, бежевый, оливковый и т. д.). Это не исключает применения при необходимости контрастирующих цветов: красного — для сигнализации об аварийном режиме, зеленого — для маломощных элементов индикации, обозначения трубопроводов с водой и т. д.

К средствам композиции (см. табл. 6.12) относят форму частей и целого, их цвет, тон, взаимное расположение частей, ритм чередования, симметрию/асимметрию, пропорциональность, масштабность, фактуру, пластику, светотень, взаимодействие объема и пространства и т. д. Различные способы композиции получают, комбинируя различные средства композиции. К способам композиции можно отнести выделение ведущего признака, композиционное равновесие, контраст, нюанс, статику/динамику.

Рассмотрим средства композиции. Ритм — средство, обеспечивающее выделение и связь элементов формы путем их повторения, чередования, нарастания, убывания. Сущность всякого ритма заключается в ассоциации с движением (равномерным или ускоренным). Ритм простейшего вида называется метром и достигается равномерным размещением элементов

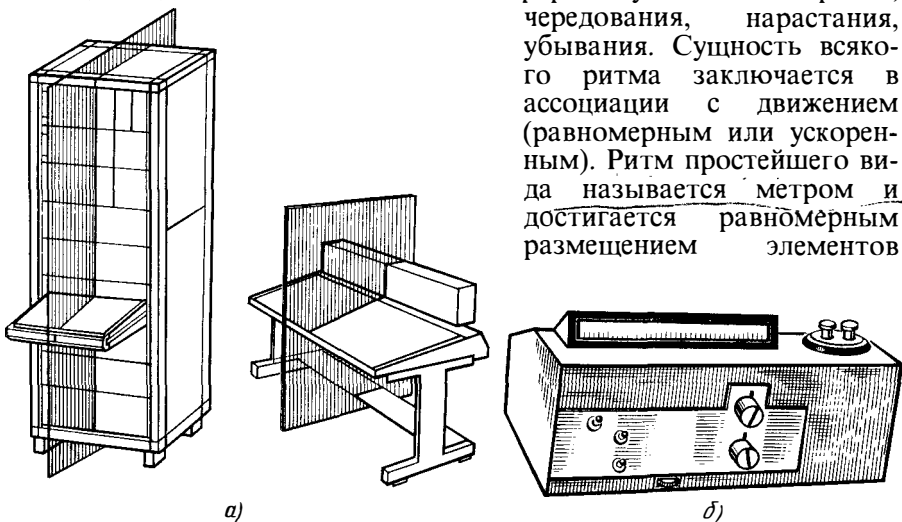


Рис. 6.7. Виды симметрии:
 а — относительная (зеркальная); б — контрастная

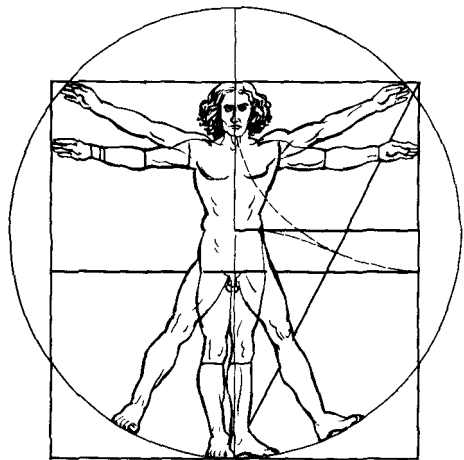
(линий, клавиш, знаков и т. д.). Ритм сообщает конструкции статическое или динамическое выражение, он способствует ее более четкому зрительному восприятию. Метр ассоциируется с равномерным движением. Динамичности достигают, например, изменяя шаг, толщину или одновременно шаг и толщину линий (см. рис. 6.6, *a*), а также вводя кривые линии с изменяющейся кривизной (рис. 6.6, *б*). Линии, имеющие меньший радиус кривизны, отражают более напряженный (динамичный) ритм.

Симметрия — организация элементов конструкции, основанная на правильном их размещении относительно центра или оси. Конструкции, не обладающие симметрией, называются асимметричными. В сознании человека симметрия ассоциируется со статичностью (равновесием), что способствует уменьшению утомляемости. В растительном мире все, что имеет единственную точку опоры (листок, цветок, стебель), обладает симметрией. Различают относительную симметрию (рис. 6.7, *a*), когда относительно оси или плоскости уравниваются элементы примерно одинакового качества (по форме, размеру, цвету), и контрастную симметрию (рис. 6.7, *б*), когда уравнивание выполняется установлением соотношения величины и взаимного положения различных форм: осевую (ромашка), винтовую (улитка); орнаментальную и т. д. Симметрия способствует выявлению главного в композиции, предопределяя его направленность к центру, оси симметрии, плоскости симметрии.

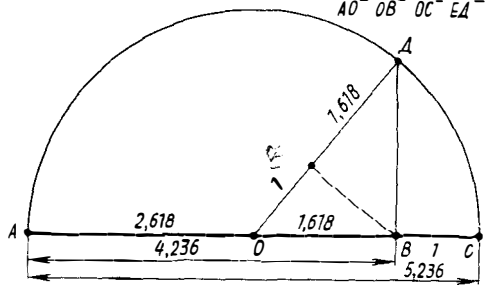
Среди «классических» средств композиции на первое место можно поставить пропорции как по степени важности того качества, которое достигается с их помощью (пропорциональность), так и с точки зрения их возможностей при организации формы.

Пропорциональность — соразмерность частей и форм между собой, а также между собой и целым. От удачно найденного соотношения частей изделия в значительной степени зависят композиционная целостность и гармоничность всего изделия. В основе пропорциональности лежат закономерности роста: органического (растения, животные) и неорганического (кристаллы). Так, закономерность органического роста находит отражение в динамике так называемого «золотого» сечения (рис. 6.8). С использованием этого соотношения были созданы многие замечательные памятники культуры. Размеры гармонично развитого человека отвечают соотношению «золотого» сечения (рис. 6.8, *a*). Законы неорганического роста выражают покой. Исследователи объясняют сущность пропорций исходя из законов механики, рационального строения и зрительного восприятия форм природы и человеческого тела, равно как и других особенностей и условий формообразования. При определении пропорциональных соотношений в промышленности на-

ходят широкое применение ряды предпочтительных чисел (P5, P10, P20, P40) и ряды нормальных размеров (Pa5, Pa10, Pa20, Pa40), построенные на основе геометрической прогрессии. Большое распространение в технике получили пропорции, связанные с соотношением сторон или площадей 1:2; 2:3 и т. д. С помощью пропорций реализуется такой важный способ композиции, как соподчиненность форм. Пропорции тесно связаны с другими средствами — контрастом, нюансом, масштабом и т. д. «Человек есть мера всех вещей» — эти слова, высеченные на мраморе одного из Дельфийских храмов, афористически точно выражают сущность масштабности предметного мира — всего, что человек создает для себя.



а) $\frac{AB}{AO} = \frac{AO}{OB} = \frac{OB}{OC} = \frac{BA}{EA} = 1,618$

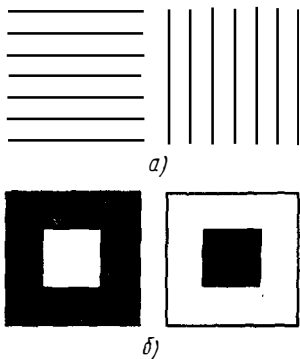


б)

Рис. 6.8. «Золотое» сечение:

- а — в соответствии с размерами человеческого тела;
- б — геометрическое соотношение

Масштабность — зрительно-пространственная характеристика размеров конструкции изделия. Истоки масштабности — в закономерном строении форм природы, где всякому изменению количественных признаков организмов соответствуют изменения качественных особенностей формы. В основе масштабности лежит отношение части к целому, изделия в целом и его частей — к окружающим предметам, к размерам человека. Масштабность — относительная характеристика. Характер масштабности обусловлен степенью расчлененности, детализировкой формы. Части человеческого тела ранее являлись основой всех измерений (фут, дюйм, пядь, ладонь, аршин, сажень, локоть и т. д.). Метрическая система не связана с размерами человеческого тела. Поэтому для получения гармоничного изделия необходимо использовать масштаб, позволяющий сопоставить размеры изделий с размерами человеческого тела. В РЭС масштабные характеристики связаны



с деталями, размеры которых обусловлены техническими и эргономическими требованиями. Например, клавиши, кнопки имеют относительно постоянные размеры независимо от размеров изделия. Такие элементы носят название указателей масштаба. На масштабное восприятие формы изделия оказывают влияние зрительные иллюзии. Так, вертикальные формы кажутся больше равных им горизонтальных форм (рис. 6.9, а), кажущаяся разница может достигать 35%. Светлые предметы кажутся крупнее темных (рис. 6.9). Большую роль единство масштаба играет в условиях, когда от человека зависит надежность всей системы, например при управлении полетом самолета. В этом случае использование индикаторов со шкалами разного раз-

Рис. 6.9. Кажущаяся длина вертикальных и горизонтальных линий (а) и кажущаяся площадь темного квадрата на светлом фоне и светлого квадрата на темном фоне (б)

мера абсолютно недопустимо. То же относится и к оформлению пульты управления РЭС.

Фактура и пластика служат для создания нюансных способов отделки, фактура — для создания тонких контрастов, например противопоставление матовой и полированной поверхности одного и того же материала.

Соотношение (взаимодействие) объема и пространства часто позволяет выделить наиболее важные в композиционном отношении части. При необходимости сосредоточить на чем-либо внимание взаимодействие объема и пространства в этом месте следует сделать более напряженным. Однако чрезмерное увеличение проникновения пространства в объем может свести на нет роль формы, а чрезмерное проникновение объема в пространство может создать впечатление незавершенности (рис. 6.10, а, г, д, е), которое отсутствует при ограничении пространства (рис. 6.10, б, в).

Специфику таких средств как форма частей и целого, их взаимное расположение целесообразно рассмотреть применительно к *способам композиции*, которые занимают промежуточное место между средствами композиции и ее категориями. Одной из важнейших составляющих красоты является *выразительность композиции*, которая, в частности, достигается путем обеспечения единства композиции (целостности формы). Единство композиции считается важнейшим принципом художественного конструирования, при помощи которого достигается гармония. При этом важным способом является выделение главного, ведущего признака, например конфигурации, геометрических размеров (повторение

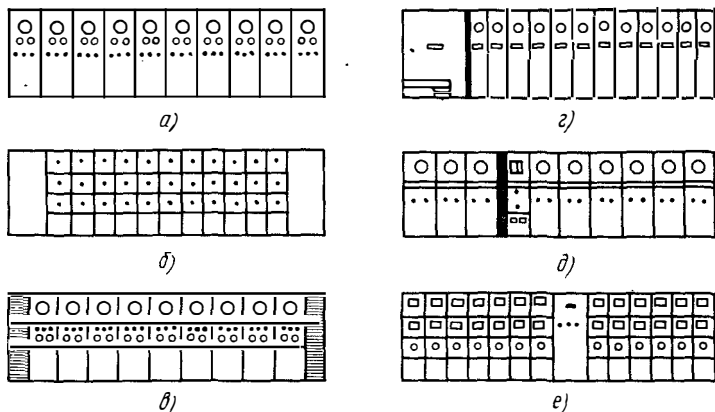


Рис. 6.10. Взаимосвязь объема и пространства при организации системы из ряда стоек

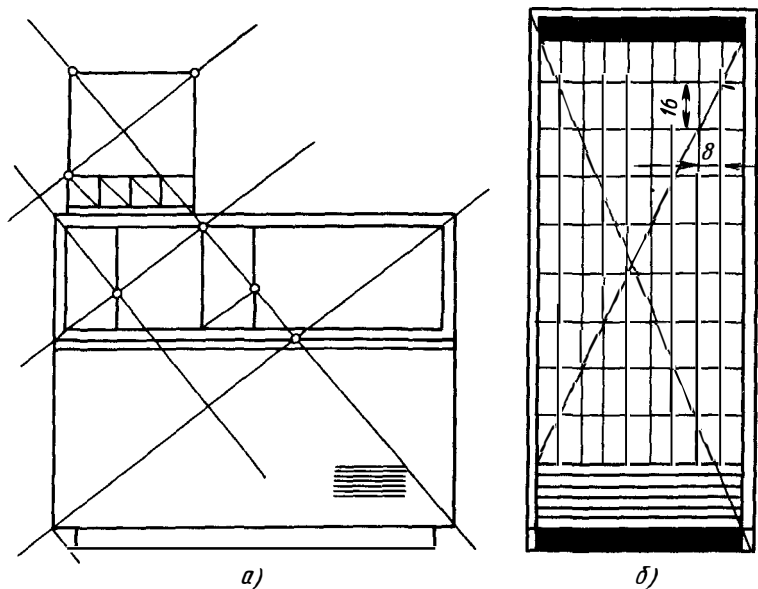


Рис. 6.11. Гармонизация формы технологической установки методом геометрического подобия (а) и с использованием модульности (б)

большого в малом), соподчиненности, композиционного равновесия, соразмерности, расчлененности. Таким образом, согласно этому принципу, ведущий признак — признак целого — должен быть присущ в той или иной мере всем элементам композиции. Так, принцип «большое в малом» заключается в близости элементов композиции по ведущему признаку целого. Например,

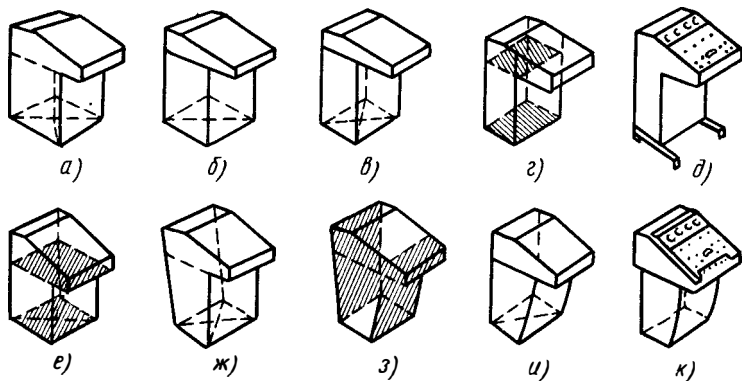


Рис. 6.12. Варианты построения зрительно устойчивого пульта управления

если ведущим признаком является конфигурация (размерное построение), то близость по этому признаку (соразмерность) является подобием (рис. 6.11). Наличие ведущего признака облегчает смену зон внимания при переходе от одних элементов к другим, делает поток информации более упорядоченным (осмысленным).

Вместе с тем разнообразие элементов делает композицию информативно насыщенной, интересной, что способствует активности восприятия ее оператором. Однако активность восприятия имеет предел, при котором еще не наступает быстрая утомляемость.

Соподчиненность играет большую роль при обеспечении выразительности композиции и целостности формы. Быстрота восприятия композиции во многом зависит от логичности и ясности связей пространственных элементов системы.

Зрительное равновесие композиции — это зрительная уравнированность частей и целого относительно пространственных осей. Рассмотрим несколько вариантов объемного решения пульта управления (рис. 6.12). Показателем зрительной устойчивости модели является отношение площади основания к консольной части (рис. 6.12, а). Незначительное увеличение консоли (рис. 6.12, б) не вызывает ее неустойчивости. На рис. 6.12, в зрительно равновесие пульта находится на пределе. На рис. 6.12, г предел равновесия уже нарушен, а на рис. 6.12, д только опоры препятствуют опрокидыванию. Вариант на рис. 6.12, е более устойчив, так как задняя стенка имеет обратный наклон. Однако дальнейшее увеличение этого наклона (рис. 6.12, ж) может привести к зрительному эффекту обратного опрокидывания. Увеличение отрицательного наклона передней стенки также приводит к зрительному эффекту обратного опрокидывания (рис. 6.12, з). Модели рис. 6.12, и, к являются зрительно устойчивыми, в модели рис. 6.12, к устойчивость достигнута благодаря вынесению части

консоли назад, а в модели (рис. 6.12, и) — благодаря небольшому отрицательному наклону задней стенки.

Использование соподчинения и композиционной уравновешенности тесно связано с использованием пропорций, ритма, масштаба, симметрии, цветового колорита, контраста, нюанса. *Контраст* — резко выраженное противопоставление друг другу однородных элементов целого (по форме, объему, цвету, размерам, конфигурации и т. д.), которое подчеркивает гармоничность восприятия целого. Те элементы, которые необходимо выделить из общей совокупности, обычно имеют неповторяющуюся форму и окрашиваются в контрастирующие цвета. Сила и слабость контраста в его выразительности. При чрезмерном контрасте может нарушиться целостность формы и усилиться утомляемость оператора.

Нюанс — незначительное различие между однородными противопоставляемыми элементами целого, позволяющее смягчить контраст. Нюанс может проявляться в пропорциях, ритме (чередовании черных и белых полос), цветовых и тональных отношениях, пластике, построении поверхностей со сложными локальными образующими. Использование нюанса — это основное, что делает изделие элегантным.

Любая форма так или иначе взаимодействует с пространством. Упорядоченность взаимодействия объема и пространства создает композиционную целостность формы. Чем глубже пространство проникает в объем, тем активнее роль пространства в композиции. Также и чрезмерное проникновение объема в пространство может создать чувство незавершенности (см. рис. 6.10, а, г — е), которое отсутствует при ограничении пространства (см. рис. 6.10, б, в).

Статичность или динамичность композиции достигается благодаря использованию ритма, симметрии/асимметрии, взаимодействия объема и пространства.

Таким образом, в распоряжении художника-конструктора имеется обширный набор средств и способов технической эстетики, с помощью которых можно обеспечить эргономичность конструкции РЭС и ее художественные качества. При отработке композиции используются государственные и отраслевые стандарты, а также руководящие материалы ВНИИТЭ и ВНИИПИ, рекомендации ISO.

§ 6.3 Особенности внешнего оформления профессиональных и бытовых РЭС

С точки зрения специфики внешнего оформления все РЭС удобно разделить на профессиональные и бытовые. При конструировании профессиональных РЭС в большей степени учитываются эргономические параметры, а при конструировании бытовых РЭС — эстетические качества.

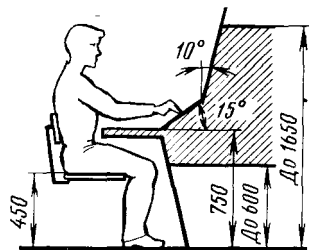
Конструирование профессиональных РЭС. Человек-оператор при работе на профессиональных РЭС выполняет свои функции на *рабочем месте*, под которым понимается зона, оснащенная необходимыми техническими средствами. При эргономическом конструировании рабочего места необходимо учитывать: рабочую позу человека-оператора (сидя, стоя, стоя/сидя); потребность оператора в обзоре рабочего места, а также соседних рабочих мест; наличие рабочей поверхности для письма, установки телефонных аппаратов, хранения документов, наличие пространства для ног при работе сидя; конфигурацию и размеры индикаторов и органов управления; приоритет, последовательность и темп поступающей информации (например, пилот истребителя МИГ-15 6—8 раз в минуту смотрел на приборы, каждые две секунды он оценивал показания трех приборов, в сложной ситуации это время уменьшалось до 1 с); частоту использования органов управления, их связь с элементами индикации.

Размеры рабочего места, его организация и утомляемость оператора зависят от позы. Если затраты энергии при работе сидя в прямой позе принять равными единице, то выполнение той же работы стоя требует затрат энергии в 1,6 раза больше, сидя в наклонной позе—в 4 раза, стоя в наклонной позе—в 10 раз больше. На рис. 6.13,а показано положение человека относительно пульта в сидячем положении, на рис. 6.13,б—в положении сидя/стоя, на рис. 6.13,в—в положении стоя.

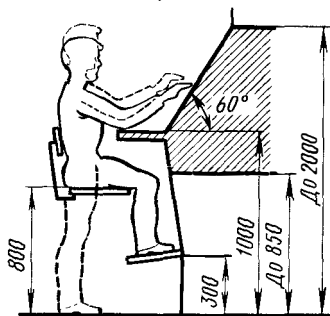
Работая на профессиональных РЭС, в общем случае оператор выполняет диспетчерские функции: наблюдение за поступлением информации, переработка информации и принятие решений, исполнение принятых решений. Пространство для размещения бумаги и пишущих принадлежностей должно быть от 100 до 200 мм в глубину, если предполагается, что оператор будет делать заметки. Для выполнения записей и установки телефона и документов этот размер следует увеличить до 400 мм.

Основным требованием является размещение элементов индикации на линии, проходящей через ось глаз в соответствии с наклоном головы оператора (рис. 6.14).

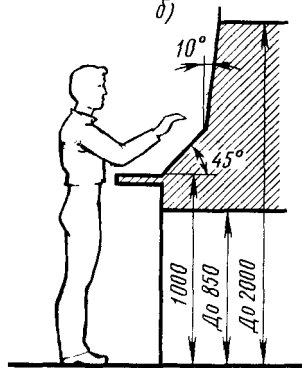
Элементы индикации и управления следует размещать в соответствии с ГОСТ 23000—78 «Пульты управления. Общие эргономические требования». При расположении индикаторов следует учитывать их приоритет (роль при достижении цели; цена ошибки оператора; частота использования; срочность использования информации; надежность работы индикаторов). Наиболее приоритетные индикаторы располагают прямо перед оператором, менее важные—сбоку слева, еще менее важные—сбору справа. Следует также учитывать: идентичность информации; логическую связь между сообщениями; совместное ис-



а)

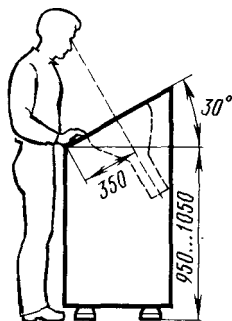


б)

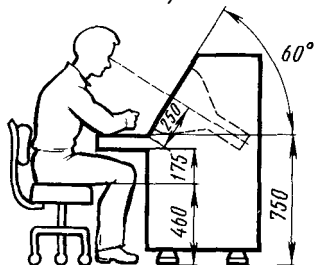


в)

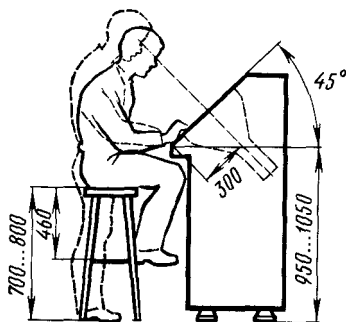
Рис. 6.13. Основные размеры пульта для рабочих поз человека-оператора: сидя (а), сидя и стоя (б), стоя (в). Заштрихована зона размещения органов управления и устройств индикации



а)



б)



в)

Рис. 6.14. Положения оператора за выносным индикаторным пультом радиолокационной станции: а—стоя; б—сидя; в—стоя и сидя

пользование индикаторов; соответствие размещения индикаторов и технических устройств, работа которых отображается; соответствие навыкам оператора.

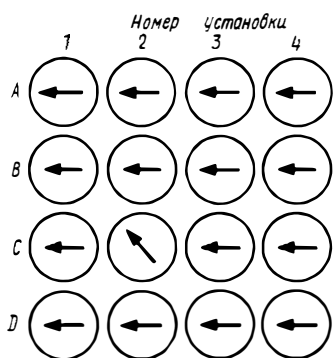
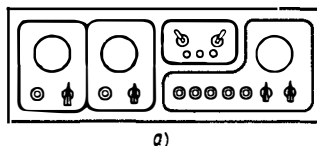
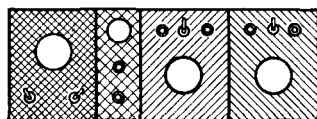


Рис. 6.15. Расположение указателей индикаторов для фиксации отклонения режима от нормального:
 ←—нормальный режим; ↗—отклонение от нормального режима;
 А, В, С, D—измеряемые параметры



а)



б)

Рис. 6.16. Выделение групп индикаторов и органов управления определенного функционального назначения рамкой (а) и цветовым полем (б)

Чтобы облегчить обнаружение отклонения одного из параметров группы индикаторов, их указатели в нормальном режиме следует устанавливать в одинаковом положении (рис. 6.15). Для концентрации внимания операторов элементы индикации могут быть объединены в логические блоки рамкой (рис. 6.16) или их расположению может придаваться динамический характер, например путем сужения поля в месте максимальной информативности (внизу экрана) (рис. 6.17). Уменьшить габариты панелей индикации можно используя комбинированные (интегральные) индикаторы, совмещенные с органами управления (светящаяся кнопка).

Эффективность выполнения операций управления в значительной степени зависит от конструкции органов управления и характера их размещения друг относительно друга и относительно органов индикации. Панель органов управления имеет наклон к горизонтальной плоскости от 15 до 3°. Органы управления должны находиться в пределах досягаемости рук человека. На рис. 6.18 в горизонтальной плоскости имеются зоны: A_1 — легкой доступности, обзор без поворота головы; A_2 — максимальной досягаемости; B — сравнительно легкой доступности, обзор с поворотом головы; $B, Г$ — вспомогательных движений, в зоне B обзор возможен при повороте головы, в зоне $Г$ — при повороте туловища. Ломаная линия — возможное положение в плане трех вертикальных панелей одного щита или пульта. При большем числе вертикальных панелей взаимное расположение их (в плане) может соответствовать ломаной линии, ограничивающей с внешней стороны зоны $A—Г$.

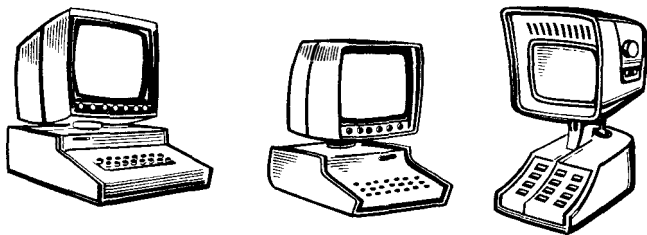


Рис. 6.17. Варианты внешнего оформления настольных видеоконтрольных устройств

Органы управления РЭС делятся по своему назначению на исполнительные (кнопки, тумблеры, клавиши) и регулировочные (ручки, переключатели, клавиши). К элементам управления предъявляются требования быстроты передачи информации от оператора, надежности работы, эстетичности, технологичности конструкции. По конструктивной реализации разделить элементы управления целесообразно (рис. 6.19) на управляемые одним пальцем (нажимные, передвижные) и двумя и большим числом пальцев (поворотные, многооборотные, рычажные). Широкое применение нашла разновидность клавишных — коромысловые переключатели (рис. 6.20). Они могут быть как одиночными, так

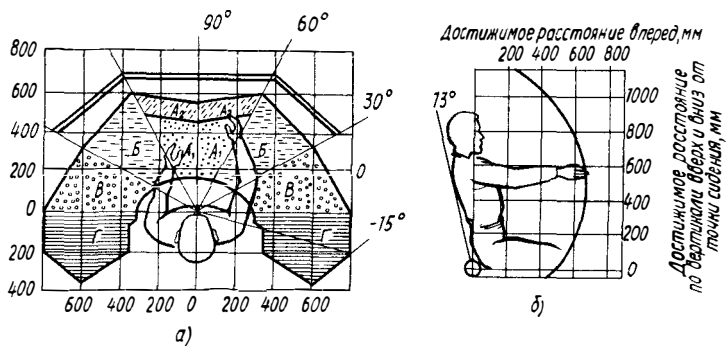


Рис. 6.18. Зоны досягаемости панели управления в горизонтальной (а) и в вертикальной (б) плоскостях

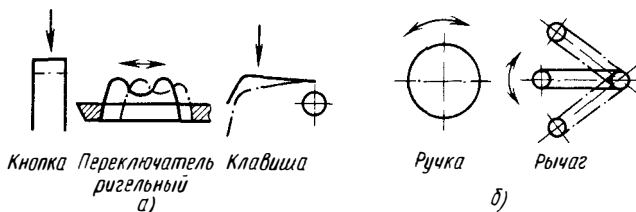


Рис. 6.19. Органы, управляемые одним пальцем (а), двумя (и более) пальцами (б)

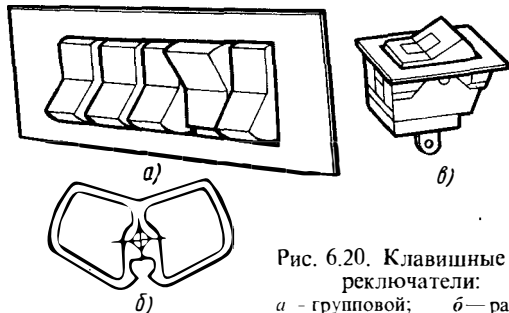


Рис. 6.20. Клавишные переключатели:

а - групповой; б - разрез клавиши; в - одиночный

и объединены в коммутационные группы с общим обрамлением. Из переключателей второй группы наибольшее применение нашли ручки для плавной и ступенчатой регулировки (рис. 6.21).

Ориентировочные параметры ручек: диаметр 4...8 (до 70) мм,

высота 12...20 мм, требуемое оптимальное усилие 3...4 Н, максимальное — до 25 Н. Конструкция тумблеров (рис. 6.22) зависит от выполняемых ими функций. Допустимое усилие переключения не должно превышать 3...5 Н, а длина рычага — 3...15 мм. В РЭС наиболее применимы кнопки четырехугольной формы с закругленными углами или закругленной кромкой. Диаметр (диагонали) кнопка выбирают исходя из длины и ширины пальцев в пределах 8...30 мм. Усилие нажатия часто используемых и наиболее ответственных кнопок — 6...12 Н, глубина утапливания кнопок 2...5 и 6...12 мм соответственно. Чем быстрее и чаще оператору приходится работать с кнопками, тем большие размеры они должны иметь. Иногда, например на корпусе ручных электронных часов, кнопки имеют значительно меньшие размеры. При установке тумблеров и кнопок следует руководствоваться следующими соображениями: установка в горизонтальные ряды целесообразнее установки в вертикальные ряды, так как в первом случае уменьшается вероятность ошибки; рычаги тумблеров в любом рабочем положении и кнопки должны находиться на расстоянии не менее 20...35 мм друг от друга.

Целостность панели управления РЭС достигается благодаря умелому использованию соподчиненности второстепенных элементов главным, пропорциональности и масштабности. Для лицевой панели РЭС ведущим является ее фон, ведомыми — шкалы, индикаторы, кнопки, тумблеры, переключатели, ручки и т. д. Среди ведомых можно выделить наиболее значимые элементы. Пропорции в вертикальном направлении являются более значимыми, чем в горизонтальном. Основным средством достижения пропорциональности является геометрическое подобие на основе использования рядов: арифметических ($H_1 - H_2 = H_2 - H_3$), геометрических ($H_1:H_2 = H_2:H_3$), гармонических $(H_1:H_3) = (H_1 - H_2)/(H_2 - H_3)$ и др. Пропорции, основанные на определенных отношениях, воздействуют весьма активно как зримо воспринимаемая закономерность, нарушение которой сводит на нет целостность формы. Стойка РЭС, построенная с использованием

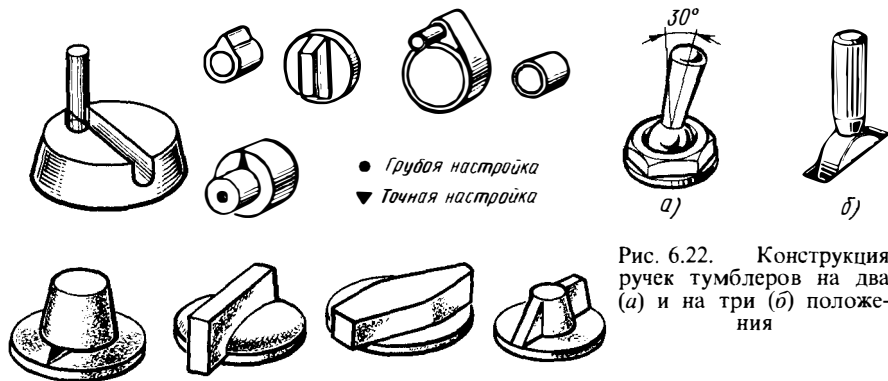


Рис. 6.22. Конструкция ручек тумблеров на два (а) и на три (б) положения

Рис. 6.21. Конструкция управляющих ручек

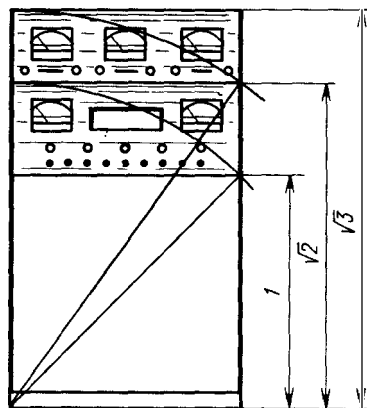


Рис. 6.23. Стойка, высота частей которой получена с использованием иррациональных соотношений

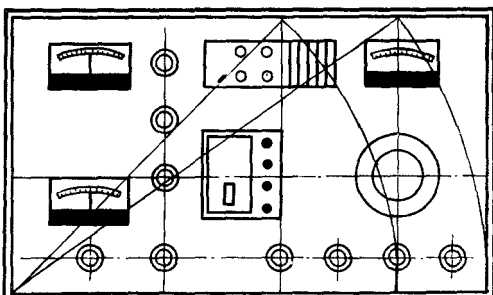
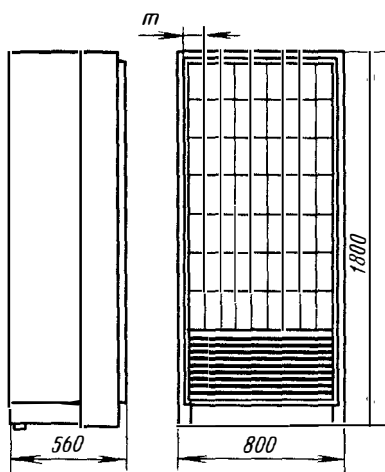


Рис. 6.24. Передняя панель, ширина которой выбрана с использованием иррациональных соотношений

Рис. 6.25. Модульное построение стоек (m — размер модуля по ширине)



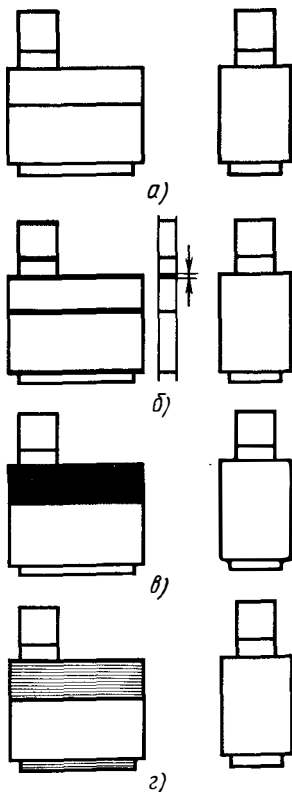


Рис. 6.26. Пропорционирование формы производственного оборудования с использованием различных средств:

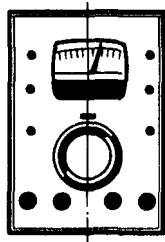
а — пропорции; б — ритм; в — контраст; з — нюанс

вплении без резких скачков и зигзагов; при работе с двумя и более ручками регулировки руки оператора не должны перекрещиваться; при работе двумя руками следует стремиться к тому, чтобы движения оператора были симметричны и синхронны; при наличии нескольких разнесенных пультов их состав и расположение должны быть хорошо продуманы.

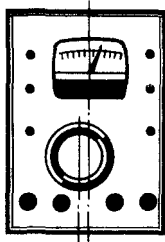
При разработке конструкции для улучшения внешнего вида РЭС широко используют *оптические иллюзии*. Например, белые фигуры на черном фоне кажутся больше черных фигур на белом фоне (см. рис. 6.9, б), вертикальные линии кажутся длиннее горизонтальных, так как глаз точнее оценивает размеры по ширине, чем по высоте и глубине. Поэтому для создания иллюзии ширины следует наносить горизонтальные линии (см.

иррациональных соотношений, представлена на рис. 6.23, а передняя панель прибора — на рис. 6.24. В обоих случаях пропорционирование заключается в увеличении размера прибора в соответствии с иррациональными соотношениями ($1/\sqrt{2}$; $1/\sqrt{3}$), образуемые сторонами квадратов и их диагоналями. Одним из методов пропорционирования является использование соразмерности всего устройства и его частей, называемых модулями m (рис. 6.25). Пропорциональные закономерности могут быть усилены масштабированием, ритмичностью, контрастом и нюансом (рис. 6.26, а — з). Статичности при конструировании панели РЭС достигают путем симметричного расположения рядов клавиш и элементов индикации относительно оси (плоскости) симметрии или контрастного симметричного расположения разногабаритных и разнотоновых элементов (рис. 6.27). При компоновке панели управления в целом необходимо принимать

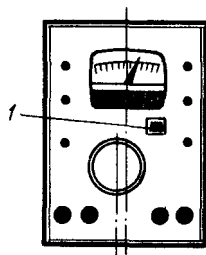
во внимание: взаимное расположение органов индикации и управления с учетом последовательности работы с ними, с тем чтобы органы зрения и управления человека двигались в одном направлении



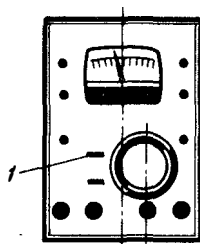
Симметричная композиция



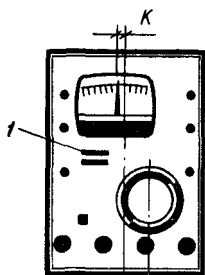
Нарушение целостности формы



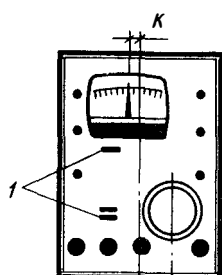
Целостность формы восстановлена



Явное нарушение равновесия



Возможное решение



Уравновешенная композиция

Рис. 6.27. Зрительное уравнивание конструкции передней панели прибора: 1 — разнотоновые элементы (фирменные знаки, надписи)

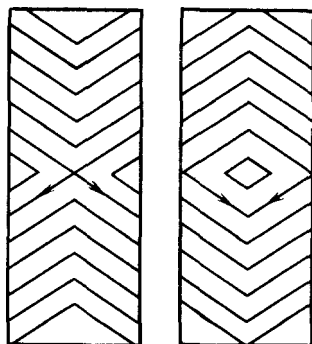


Рис. 6.28. Иллюзия изменения поперечного размера при сходящихся и расходящихся из центра наклонных линиях

рис. 6.10, д); сходящиеся к центру симметрии линии увеличивают горизонтальный размер, а расходящиеся — уменьшают его (рис. 6.28); изменение шага чередования линий или их толщины создает впечатление динамичности (см. рис. 6.6).

В качестве примера проведем анализ конструкции микрокалькулятора БЗ-18А (рис. 6.29, а) и БЗ-18М (рис. 6.29, б). Основной задачей при разработке новой модели БЗ-18М было обеспечение минимума отвлечений и концентрации внимания на наиболее важных участках панели. Для этого были приняты следующие меры: уменьшена раздробленность передней панели путем создания

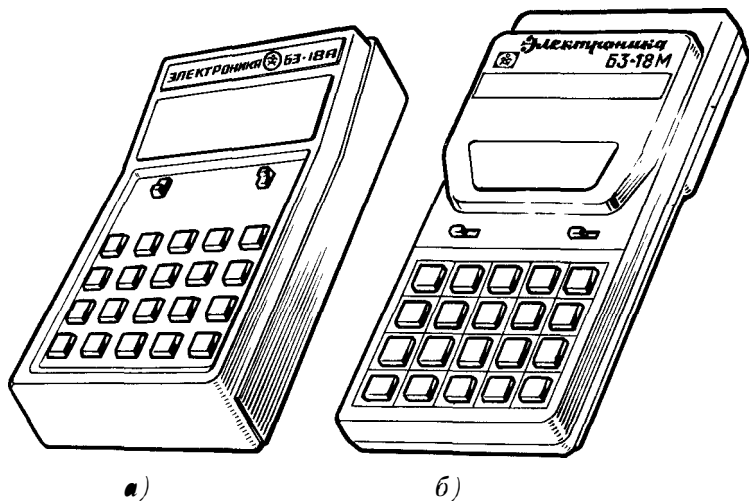


Рис. 6.29. Внешний вид микрокалькуляторов

общего светлого поля серебристого цвета и исключения мелких деталей обрамления; обводы выполнены плавными, чтобы уменьшить отвлечение; поле наблюдения динамически сужено к месту расположения цифр, чтобы сконцентрировать на них внимание; общая высота корпуса уменьшена за счет выступающей конструкции индикатора и поднутрения основания снизу; статичность конструкции при наличии несимметричной надписи «Электроника БЗ-18М» достигнута с использованием зрительного уравновешивания фирменным знаком.

Некоторые решения остались без изменения: цифры индикатора размером 5×2 мм, что позволяет их наблюдение с расстояния примерно 0,5 м; темно-зеленый светофильтр, повышающий четкость цифр; кнопки управления размером 8×8 мм, расположенные с шагом 15 мм; не претерпел изменения цвет кнопок и нанесенных на них символов.

В целом конструкция микрокалькулятора БЗ-18М лучше, она выполнена в соответствии с требованиями эргономики и технической эстетики.

При внешнем оформлении профессионального РЭС необходимо обращать внимание на эргономичность и эстетичность вспомогательных элементов — соединителей, ручек для переноски, элементов крепления, опорных ножек, направляющих и т. д.

Внешнее оформление бытовых РЭС. Электронные бытовые РЭС, в частности электропроигрыватели, являются развитием механических звуковоспроизводящих устройств (граммофонов), которые появились в начале нашего века (рис. 6.30). Первые

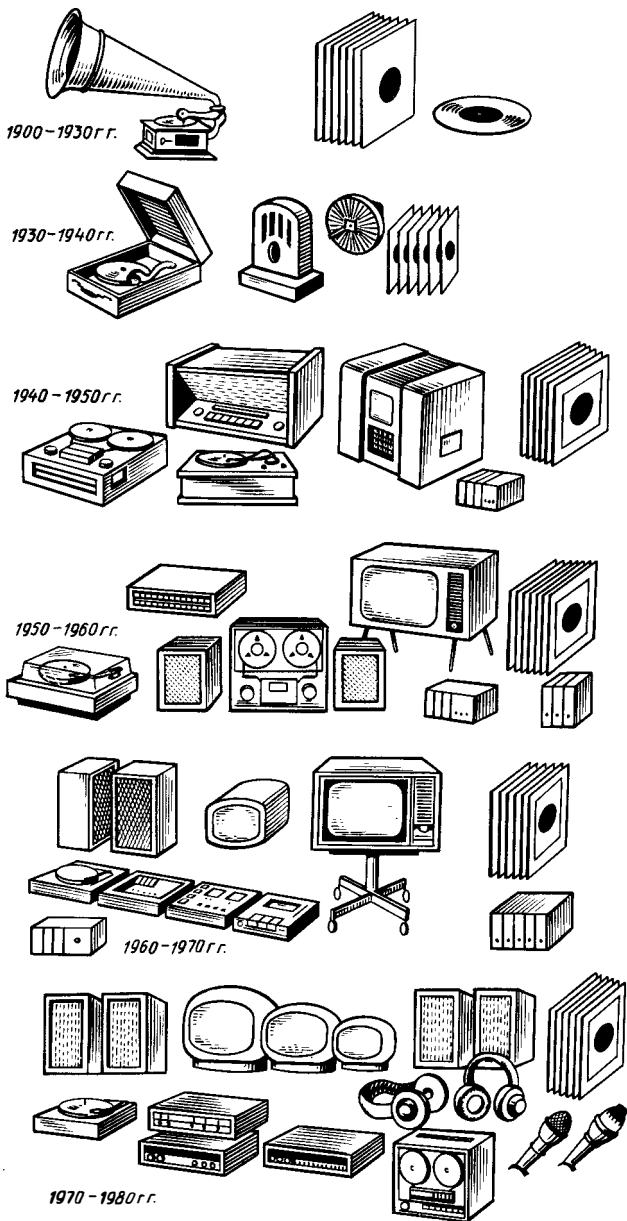


Рис. 6.30. Эволюция бытовой аппаратуры

радиоприемники (рис. 6.31) были оформлены без привлечения дизайнеров. Органы управления и переключения были такими же, как и на профессиональной технической аппаратуре. Успехи

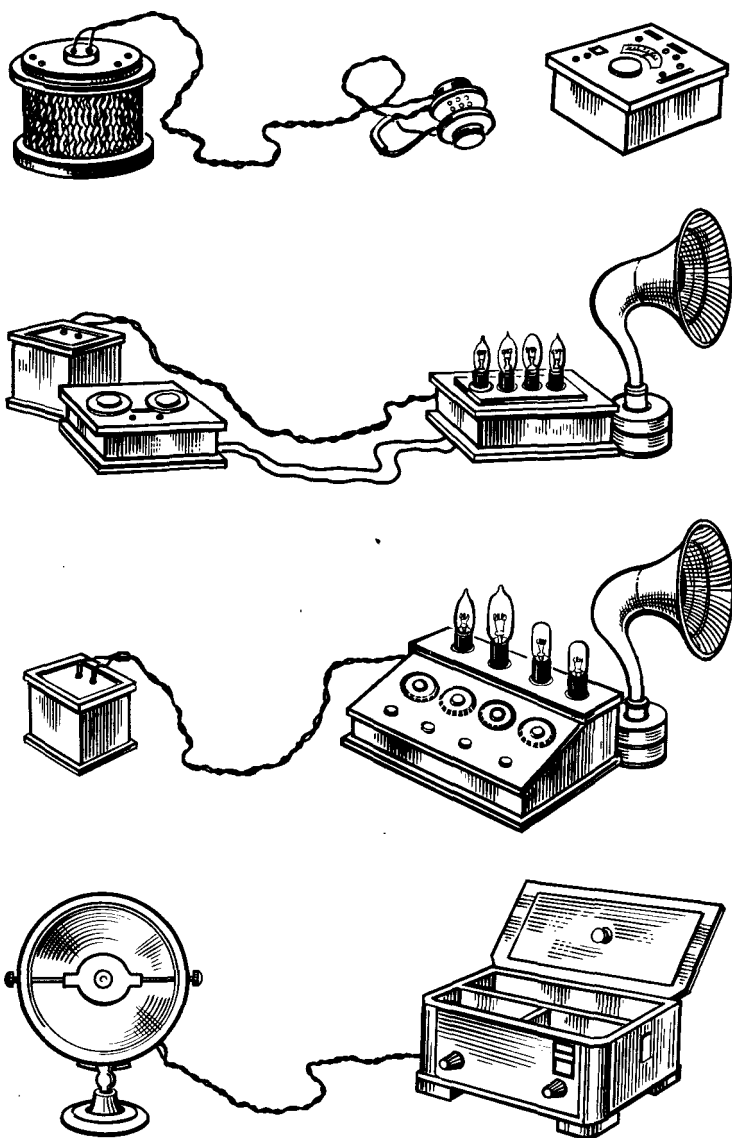


Рис. 6.31. Эволюция формы первых радиоприемников

в миниатюризации электронных ламп, появление электронно-лучевых трубок и усложнение шкал привели к внедрению «мебельного» стиля. Футляры приемников и телевизоров 50-х годов имели внушительные размеры. Шкала приемника и экран телевизора занимали сравнительно небольшое поле на передней панели. Уменьшение размеров деталей и узлов позволило в 60-х годах уменьшить габариты аппаратуры и конструировать телевизоры и приемники с учетом размера экрана телевизора или шкалы приемника, которые в основном определяли их габариты. Стремление уменьшить объем, занимаемый аппаратурой, привело в 60-е годы к объединению различных устройств в «радиокомбайны». При этом, однако, ухудшилась их ремонтпригодность, а радиозаводам пришлось освоить выпуск футляров мебельного типа. Дальнейшее усложнение систем и стремление уменьшить их влияние на интерьер квартиры привело в 70-х годах к созданию радиокомплексов из блоков с унифицированными габаритами и «нейтральным» приборным исполнением. Создание комфортных условий коллективного и индивидуального приема видеозвуковой информации обуславливает необходимость использования систем бытовой аппаратуры (рис. 6.32), состоящих из коммутирующих устройств, наушников, устройств



Рис. 6.32. Состав системы бытового РЭС 70-х годов.

дистанционного управления, индивидуальных громкоговорителей, звуковых колонок и т. д.

Конструкции бытовых РЭС в 80-е годы претерпели значительные изменения. Это связано с появлением новых видов аппаратуры, а также с улучшением характеристик традиционной аппаратуры. *К новым видам бытовых РЭС* следует отнести электронные игры, бытовые компьютеры, видеомагнитофоны и видеокамеры, лазерные воспроизводящие звуко- и видеоустройства. *К РЭС с улучшенными параметрами* относятся цветные телевизоры на ИС с дистанционным управлением и стереофоническим звуком, двухкассетные магнитофоны и магнитолаы, усилители с эквалайзерами, магнитофоны для воспроизведения звуковой и видеoinформации с наушниками и экранами в виде очков, автомобильные магнитолаы и т. д. Эта аппаратура выполняется в виде отдельных блоков. Размеры блоков часто унифицированы, что позволяет их компоновать в виде стоек со встроенными объемами для хранения кассет, пластинок и т. д. При цветовом оформлении преобладают нейтральные цвета, что позволяет учесть возможность их размещения в любом интерьере. Ввиду того что новые виды аппаратуры имеют большое количество органов управления и индикации, при разработке их конструкции в большей степени учитываются требования эргономики.

При оформлении бытовых РЭС требуется учитывать интересы предполагаемого потребителя: технические параметры (звуковые колонки, многодорожечная запись, регулировка качества звука, видеозапись и т. д.), технические и эстетические параметры («престижное» оформление), удовлетворение от самого процесса общения с аппаратурой (наличие большого количества элементов управления и индикации, «приборное» оформление). Цветовое оформление должно учитывать интерьер. Чтобы аппаратура подходила под любой интерьер, иногда идут на «нейтральное», приборное оформление бытовой аппаратуры.

В настоящее время отработка внешнего оформления РЭС осуществляется на всех этапах конструирования. На стадии *эскизного проектирования* изучаются техническое задание, художественно-конструкторские аналоги и прототипы, каталоги, проспекты, ГОСТы 12-й группы и другая информация (в том числе, патентная). *На стадии технического проектирования* эскизный проект корректируется с учетом конкретных конструкторско-технологических требований. При этом окончательно выбирают форму изделия и его цветовое решение с учетом технологических возможностей производства. В результате получают полный комплект художественно-конструкторской документации, необходимый для разработки рабочего проекта. *На этапе разработки рабочей документации* и изготовления опытного образца дизайнер дает консультацию и осуществляет надзор за сохранением замысла технического художественно-конструкторского проекта,

контролирует и визирует конструкторскую и технологическую документацию, оформляет заявку на промышленный образец.

При эргономическом анализе необходимо убедиться в том, что расположение приборов и органов управления обеспечивает удобное положение человека при работе, рабочая плоскость находится на удобной высоте с учетом рабочего положения и расстояния до глаз, органы управления размещены в пределах досягаемости с учетом положения тела оператора при работе; форма, размеры и материал органов управления соответствуют прилагаемому усилию, прилагаемые усилия допустимы с точки зрения физиологии, конструкция обеспечивает удобство обслуживания и ремонта РЭС (доступность, степень риска, освещенность и т. д.), для выполнения данной работы достаточна существующая освещенность, органы управления и индикации размещены на оптимальном расстоянии в поле зрения, деления шкал видны достаточно четко, индикаторы расположены достаточно близко от соответствующих органов управления, в однотипной аппаратуре органы управления расположены одинаково и правильно, по положению органов управления и индикации возможно быстро определить ситуацию (например, включено/выключено), рука при перемещении органа управления не закрывает шкалу индикатора, режим работы оператора допускает правильное чередование работы и отдыха, а также динамических и статических видов нагрузки, существует соответствие между перемещением органов управления и вызванными ими эффектами, органы управления и индикации размещены в последовательности, соответствующей порядку выполнения операций, физическая и психическая нагрузка при работе соответствует возможностям различных операторов (мужчин, женщин, молодых и пожилых работников).

На этапе эстетического анализа выясняется объемно-пространственная структура и определяется ведущий формообразующий принцип (симметричное, асимметричное, статическое, динамическое решение); уточняется композиционная иерархия целого, определяются акценты, главные и второстепенные элементы; определяется логика взаимопереходов и взаимосвязей отдельных объемов и сочленений; выявляется единство и подобие геометрического построения поверхностей элементов целого; оценивается динамика формы, направленности масс (объемов) и их соответствие функции изделия; оцениваются информативные свойства формы, с помощью которой человек информируется о функции изделия в целом и его отдельных частей; проверяется тектоничность основных формообразующих элементов; проверяется соответствие формы конструктивным особенностям применяемого материала и характеру его работы; определяется степень согласованности, соразмерности и подчиненности элементов и целого; оценивается характер отношений отдельных элементов целого (контрастных, нюансных, тождественных связей в форме); прове-

ряется пропорциональность композиции; уточняются наличие модуля и оптимальность его значения; оценивается соответствие пропорционального строя динамическим тенденциям формы изделия; проверяется ритмический строй изделия по горизонтали и вертикали; оценивается сложность ритмического построения и четкость восприятия ритма и соответствие ритма динамическим тенденциям формы; определяется масштаб изделия по отношению к предметам окружающей среды и к человеку, выявляются масштабные несоответствия и элементы — указатели масштаба; оценивается поверхность изделия с точки зрения рисующих световых линий (бликов светового каркаса), гармоничность формы светового каркаса; оцениваются фактура поверхностей и использованные декоративные свойства материала; оцениваются самостоятельные элементы (крепежные детали, органы управления, устройства индикации и т. д.), их одностильность и взаимосогласованность; оцениваются единство деталей и целого, цветовая композиция, единство геометрической формы и цвета, выделение цветом функционально важных элементов, стилевая направленность и наличие фирменного стиля.

Анализ слабых решений столь же полезен, сколь и анализ удачных. Ввиду того что при анализе необходимо учитывать специфику схемотехнических, конструкторских, эргономических и эстетических свойств конкретных образцов РЭС, его целесообразно выполнять на макете или опытном образце, изготовленном промышленными методами из серийно выпускаемых материалов. Это позволяет оценить соответствие художественно-конструкторского замысла по таким тонким свойствам, как фактура поверхности, цветовой колорит, тональность цвета, световой каркас, а также проверить окончательно эргономичность изделия (удобство пользования им).

При художественно-конструкторском оформлении РЭС необходимо учитывать технологические ограничения на формо- и цветообразование, фактуру поверхности (матовая, шероховатая, блестящая, с «рисунком»), параметры применяемых материалов (цветовой тон, защитно-декоративные свойства, технологичность их использования). Художник-конструктор должен учитывать ограничения по формообразованию, накладываемые технологией (прессование пластмасс, литьевое или вакуумное формование и т. д.). Это должно найти отражение в конструкции РЭС (радиусы закругления, литейные уклоны, поднутрения, толщина стенок и т. д.). Особое внимание он должен обратить на соответствие параметров материалов паспортным данным, так как от этого зависят такие нюансные свойства, как тон и фактура поверхности, световой каркас. В ряде случаев художник-конструктор должен и может настоять на изменении компоновки изделия, использовании материалов или улучшенных технологических процессов. Это особенно важно, когда надо обеспечить конкурентоспособ-

ность и быстрый сбыт изделия. Работа художника-конструктора будет тем успешнее, чем с более раннего этапа разработки изделия он в нее включился.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему при конструировании РЭС необходимо учитывать требования эргономики и технической эстетики?
2. Какие функции лучше выполняет человек, а какие — машина?
3. Что такое эргономика?
4. Что такое техническая эстетика?
5. Назовите гигиенические, антропометрические, физиологические и психофизиологические, психологические показатели человека-оператора.
6. Каковы основные средства композиции?
7. Каковы основные способы композиции?
8. Назовите известные категории композиции.
9. Назовите известные критерии композиции и красоты.
10. Какова специфика внешнего оформления профессиональных РЭС?
11. Назовите основные характеристики зрения человека.
12. Изложите алгоритм художественного конструирования.
13. Какова связь средств, способов, категорий и критериев композиции?
14. Какова специфика внешнего оформления профессиональных РЭС?
15. Какова специфика внешнего оформления бытовых РЭС?
16. Назовите порядок эргономического анализа конструкции РЭС.
17. Назовите порядок эстетического анализа конструкции РЭС.

§ 7.1. Функциональные особенности РЭС СВЧ

Радиоэлектронные средства, работающие в диапазоне СВЧ, широко используются в различных областях: в радиоастрономии, для обнаружения и сопровождения различных объектов, в системах опознавания летящих объектов, в системах радионавигации, в связи (телеметрии, радиорелейных и космических системах связи, телевидении, радиоуправлении), в системах радиопротиводействия. Для тех или иных областей применения аппаратуры СВЧ используют различные поддиапазоны частот (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Поддиапазоны частот СВЧ

Наименование поддиапазона радиочастот	Границы поддиапазона	Наименование поддиапазона радиоволн	Границы поддиапазона
Ультравысокие Сверхвысокие Крайне высокие Гипервысокие	300...3000 МГц 3...30 ГГц 30...300 ГГц 300...3000 ГГц	Дециметровые Сантиметровые Миллиметровые Децимиллиметровые	100...10 см 10...1 см 10...1 см 1...0,1 мм

За рубежом применяют следующее деление на поддиапазоны СВЧ: L (0,39...1,55 ГГц); S (1,55...5,20 ГГц); R, LS (1,7...2,60 ГГц); H (3,95...5,85 ГГц); C (5,85...8,20 ГГц); X (5,2...11 ГГц); XN (5,40...8,20 ГГц); W, XW (7,02...10,0 ГГц); Ku, Y (12,4...18 ГГц). Конструкции РЭС СВЧ в значительной степени определяются частотой электромагнитных колебаний, на которой работает РЭС, и поэтому обладают рядом характерных особенностей, общих как для наземных, так и для бортовых РЭС.

Обычно система СВЧ состоит из антенны и узлов, выполняющих функции генерации, приема, усиления и обработки сигналов СВЧ. Первоначально в радиолокационных РЭС (рис. 7.1, 7.2) осуществлялось механическое управление (сканирование) пространственным положением луча и использовались аналоговые методы обработки сигналов. Такие РЭС обладали малым быстродействием и сравнительно низкой точностью, а также требовали мощного источника.

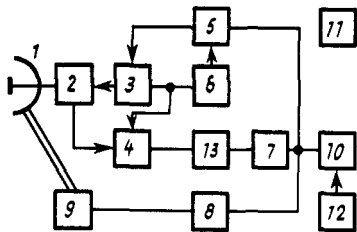


Рис. 7.1. Структурная схема традиционной радиосвязной системы:

1—антенна; 2—волноводная система и СВЧ-коммутаторы; 3—передатчик; 4—приемник; 5—модулятор; 6—синхронизатор и генератор частот; 7—устройство обработки сигналов; 8—устройство слежения; 9—привод управления антенной; 10—индикаторные и исполнительные устройства; 11—источники питания; 12—оператор; 13—детектор

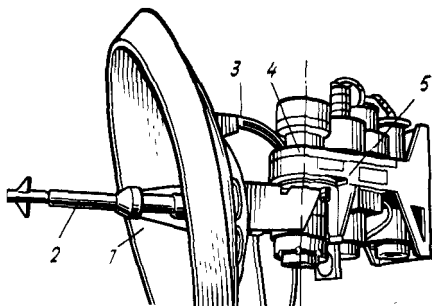


Рис. 7.2. Антенна с механическим сканированием самолетной метеонавигационной РЛС «Гроза»:

1—параболическая антенна; 2—излучатель; 3—рычаг привода в вертикальной плоскости; 4—редуктор; 5—основание

Важнейшей частью системы СВЧ является антенна, обеспечивающая излучение и прием радиоволн. В диапазоне СВЧ антенны создают остронаправленное излучение с шириной луча в единицы и доли градусов и имеют коэффициент усиления, достигающий десятков и сотен тысяч. Антенны с подобными характеристиками часто имеют значительные габариты (рис. 7.3, 7.4). Так, для наземных станций спутниковой связи в США рекомендуется применять зеркальные антенны диаметром не менее 3 м. Наземные транспортируемые антенны размером более 1,8 м выполняются разворачиваемыми (рис. 7.3). Различают антенные системы саморазворачивающиеся и разворачиваемые. По характеру механизма разворачивания антенны

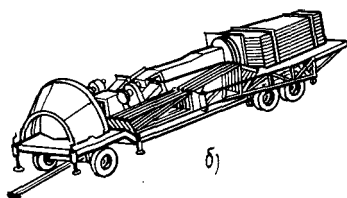
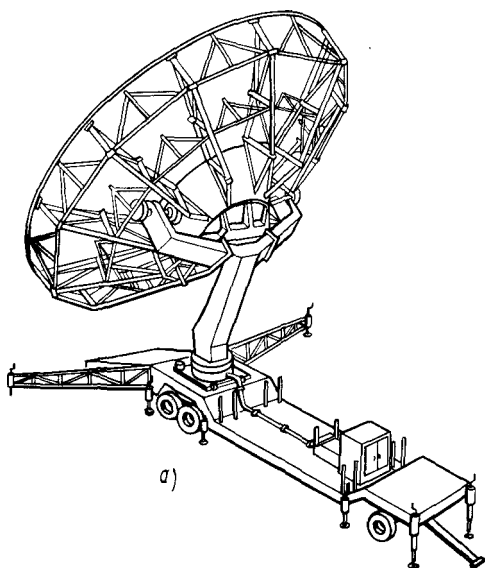


Рис. 7.3. Разборная параболическая антенна для мобильных линий связи, транспортируемая трейлером:

а—рабочее положение; б—свернутая для транспортировки антенна

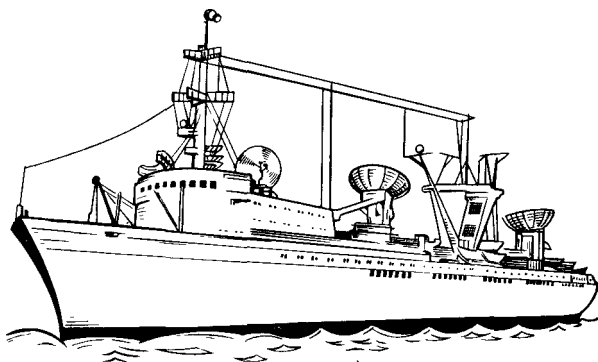


Рис. 7.4. Исследовательский корабль с антеннами космической связи

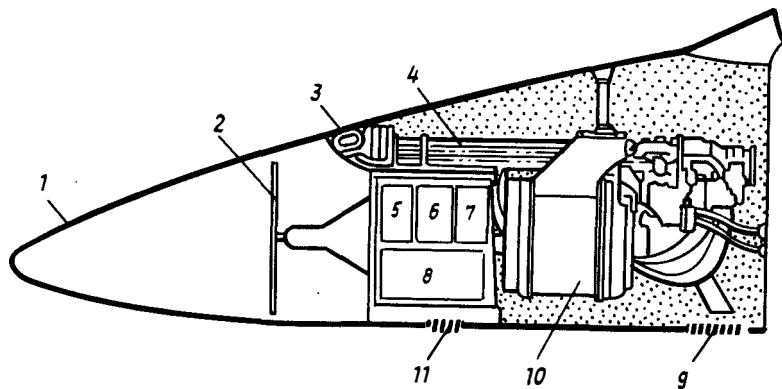


Рис. 7.5. Размещение РЛС AN/APG-65 в носовой части фюзеляжа самолета F-18 (США):

1 — обтекатель; 2 — антенна; 3 — опора ствола пушки; 4 — 20-мм пушка; 5 — приемник/задающий генератор; 6 — ЭВМ, управляющая работой РЛС; 7 — программируемое устройство обработки сигналов; 8 — передатчик; 9, 11 — вентиляционные решетки; 10 — контейнер с боеприпасами

подразделяются на надувные, трубчатые, зонтичные, сборные и т. д. Размер антенн, которые предполагается развертывать в космосе, может достигать 100...1000 м и более. Размер наземных антенн в свернутом состоянии в 10...25 (до 100) раз меньше, чем в развернутом. Точность изготовления зеркала антенны составляет от $\lambda/8$ до $\lambda/32$ для различных областей зеркала, где λ — длина волны колебаний СВЧ. Для антенн дециметрового диапазона это соответствует примерно 10^{-4} ее диаметра.

Антенны самолетных РЛС обычно располагают в носовой части и защищают от аэродинамических нагрузок радиопрозрачным обтекателем (рис. 7.5). Обтекатель должен вносить минимальные потери и искажения сигналов и предотвращать обледене-

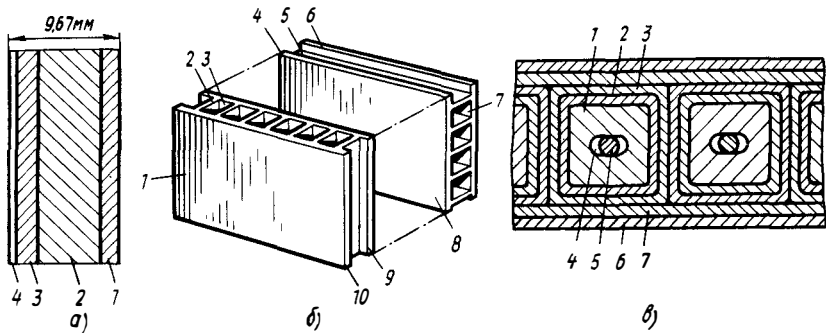


Рис. 7.6. Конструкции стенок антенных обтекателей:

а — поперечное сечение трехслойной стенки с наполнителем из синтактного пенопласта фирмы «Brunswick»: 1 — внутренняя обшивка из слоистого пластика толщиной 1,22 мм; 2 — наполнитель из синтактного пенопласта толщиной 6,22 мм; 3 — внешняя обшивка из слоистого пластика толщиной 1,83 мм; 4 — покрытие толщиной 0,25 мм для защиты от дождевой эрозии; *б* — стенка из панелей фирмы «НТСО»: 1, 8 — интегрально-тканые панели; 2, 5 — ребра жесткости; 3, 7 — отверстия между ребрами жесткости; 4, 6, 9, 10 — обшивка панелей; *в* — стенка с желобковым наполнителем фирмы «Boeing»: 1 — полая оправка из кремнийорганического каучука; 2, 3 — внутренняя и внешняя, намотанные на оправку спирали, предварительно пропитанные заготовки; 4 — эллипсоидальное отверстие; 5 — отрезок кабеля, повышающего стойкость оправки к сжимающим нагрузкам; 6 — внешний слой обшивки; 7 — внутренний слой обшивки

ние. Конструкции стенок некоторых антенных обтекателей представлены на рис. 7.6. Для защиты от обледенения в каналы стенок подается теплый воздух. На самолете может быть установлено несколько антенн с обтекателями; например, бомбардировщик В-1 (США) имеет около 20 различных типов антенных обтекателей, для изготовления которых используют 12 различных радиопрозрачных материалов (стеклопластик, керамические смеси, пеноматериалы, нитрид кремния, оксид бериллия и т. д.), предназначенных для работы на различных частотах и имеющих различные потери. Обтекатели могут иметь значительные размеры; обтекатель РЛС самолета F-104 имеет диаметр основания конуса 838 мм, длину 2300 мм, толщину стенок 9,4 мм.

Начиная с 70-х годов РЭС СВЧ с механическим сканированием луча стали заменять активными фазированными антенными решетками (АФАР) (рис. 7.7, 7.8) с электрическим сканированием луча и цифровой обработкой сигналов. Спецификой структуры, схемы и конструкции АФАР является то, что формирование мощного луча и управление им осуществляются с помощью большого числа сравнительно маломощных приемопередатчиков (активных) модулей, расположенных на плоскости. Подобные системы могут иметь значительные размеры, например диаметр стационарной АФАР фирмы «Rautheon» (рис. 7.8), предназначенной для раннего обнаружения баллистических ракет, составляет около 30 м, антенна содержит 34 768 модулей (из них 15 360 активных). Такая антенна излучает импульсный сигнал мощностью 15,3 МВт. Пример

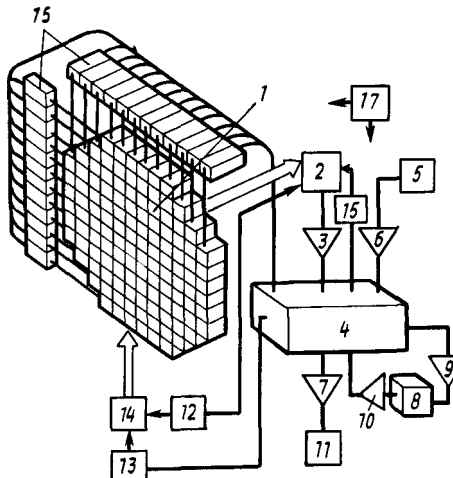


Рис. 7.7. Радиолокационная система, выполненная методами интегральной электроники:

1 — АФАР; 2 — УПЧ и схема обработки сигнала в приемном тракте; 3 — аналого-цифровой преобразователь; 4 — цифровая ЭВМ; 5 — генератор сигнала; 6 — цифро-аналоговый преобразователь; 8 — устройство памяти со схемами ввода 9 и вывода 10 информации; 11 — индикаторно-исполнительные устройства; 12 — генератор опорных частот для формирования сигнала СВЧ; 13 — модуляторное устройство; 14 — устройство выхода на элементарные передатчики; 15 — устройства управления сканированием луча; 16 — преобразователь код — аналог для цифровой системы автоматической регулировки усиления; 17 — источники питания

транспортируемой свертываемой АФАР представлен на рис. 7.9. Данная АФАР имеет две активные плоскости.

Появление АФАР стало возможным благодаря микроминиатюризации устройств СВЧ и достижениям системотехники, что позволило суммировать излучение большого числа маломощных источников. Суммирование мощности может осуществляться в пространстве (сложение полей отдельных излучателей). В этом случае имеется возможность управления лучом путем изменения по некоторому закону фаз сигналов излучателей. АФАР позволяют формировать несколько широких и узких лучей и электрически перемещать их в пространстве с частотой в несколько десятков килогерц, что позволяет создавать многофункциональные РЛС для одновременного обнаружения, опознавания и сопровождения нескольких десятков объектов. Наличие большого числа работающих маломощных каналов повышает надежность АФАР, так

как отказ даже 20% каналов не ведет к катастрофическому отказу всего устройства (несколько изменяются коэффициент усиления, уровень боковых лепестков диаграммы направленности).

Кроме антенн в АФАР входят различные функциональные узлы: усилители мощности СВЧ, умножители частоты, схемы деления/суммирования мощностей, разделительные фильтры, малошумящие усилители приемных каналов, схемы управления фазой для обеспечения заданной

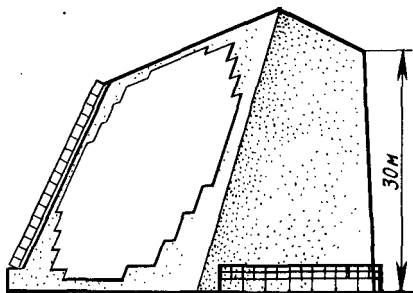


Рис. 7.8. Антенная система фирмы «Rautheon»

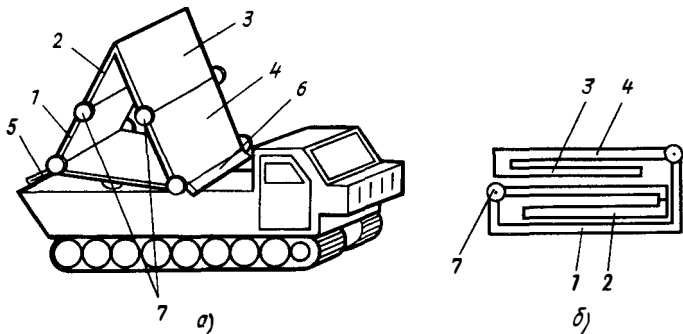


Рис. 7.9. АФАР на гусеничном шасси:

а — рабочее положение; б — в походном положении; 1—4 — панели приемных антенн; 5, 6 — панели передающих антенн; 7 — электроприводы поворота панелей антенны

диаграммы направленности и сканирования луча, элементы юстировки начального значения фазы (электрической длины тракта СВЧ), элементы встроенного контроля и телеметрии, вычислительные устройства, источники вторичного электропитания, системы обеспечения тепловых режимов и т. д. Конструктивно эти узлы выполняются в виде модулей и блоков СВЧ. Под *модулем СВЧ* понимают изделие электронной техники диапазона СВЧ, имеющее законченное конструктивное и схемное выполнение, состоящее из одного или нескольких функциональных узлов СВЧ, неремонтопригодное в условиях эксплуатации и взаимозаменяемое. *Блок СВЧ* состоит из одного или нескольких модулей СВЧ, функциональных узлов и линий передачи СВЧ. *Функциональный узел СВЧ* — сборочная единица или деталь, выполняющая одну или несколько радиотехнических функций и предназначенная для работы в диапазоне СВЧ в составе модуля или блока СВЧ. Конструктивно-функциональный узел представляет гибридную микросборку или полупроводниковую микросхему частного применения, разработанную конструкторами аппаратуры СВЧ для изделия определенного назначения.

Модули различаются по конструктивно-технологическому исполнению связей СВЧ: коаксиально-волноводные, полосковые и микрополосковые (интегральные), комбинированные. В последнее время созданы модули, выполненные с использованием полупроводниковой технологии. Обычно модуль СВЧ выполняет несколько функций, т. е. при его компоновке используется «канальная» интеграция узлов (см. рис. 7.7, 7.10). Теоретически возможно объединить в модуль все узлы канала. Однако на практике это не всегда целесообразно из-за разной высоты компонентов (высота модуля определяется наиболее высоким компонентом), усиления паразитных связей, затруднения настройки отдельных узлов из-за сложности подвода сигнала

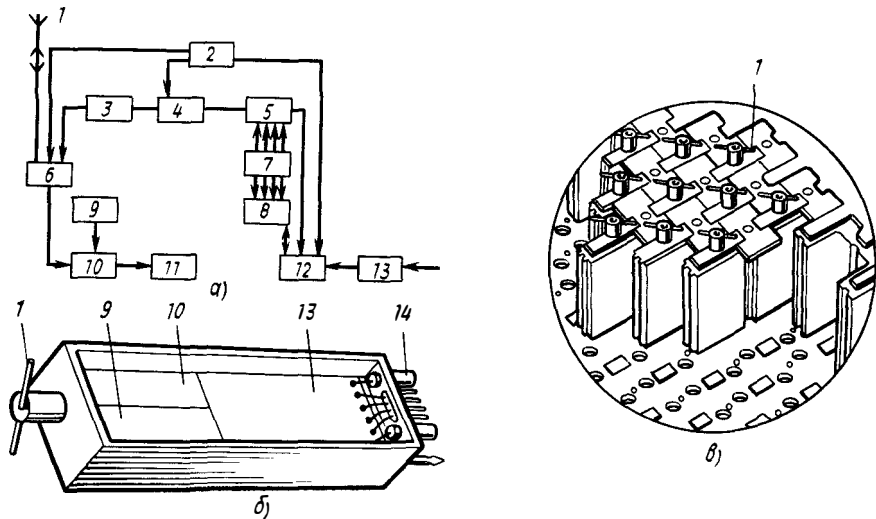


Рис. 7.10. Модуль АФАР МЕРА:

а — структурная схема модуля; б — конструкция приемо-передающего модуля; в — компоновка модулей в АФАР; 1 — излучатель; 2 — модулятор; 3, 9 — умножитель на четыре (x4); 4 — усилитель импульсов; 5, 8, 12 — фазовращатели; 6 — переключатель антенны прием — передача; 7 — логика и усилители управления; 10 — смеситель; 11 — предусилитель ПЧ; 13 — предусилитель мощности; 14 — выход СВЧ (передача на частоте 2,25 ГГц, прием на частоте 2,125 ГГц)

к определенным точкам с помощью дополнительных линейных ответвителей, сложности обеспечения тепловой совместимости компонентов. Кроме того, при объединении модулей и функциональных узлов необходимо учитывать «стратегию» системы. При этом критериями выступают минимум длины межмодульных связей, число высокочастотных соединителей, число дополнительных промежуточных усилителей для восстановления амплитуды и формы сигнала.

§ 7.2. Конструкции пассивных структур СВЧ и полупроводниковых элементов

С конструкторско-технологической точки зрения все элементы приемо-передающего модуля АФАР делятся на пассивные структуры с распределенными параметрами, LCR-структуры с сосредоточенными параметрами, диэлектрические и ферритовые резонаторы, активные полупроводниковые электрорадиоэлементы (элементы), переходные устройства.

Пассивные структуры СВЧ выполняют в виде неразветвленных или разветвленных отрезков полосковых линий заданной конфигу-

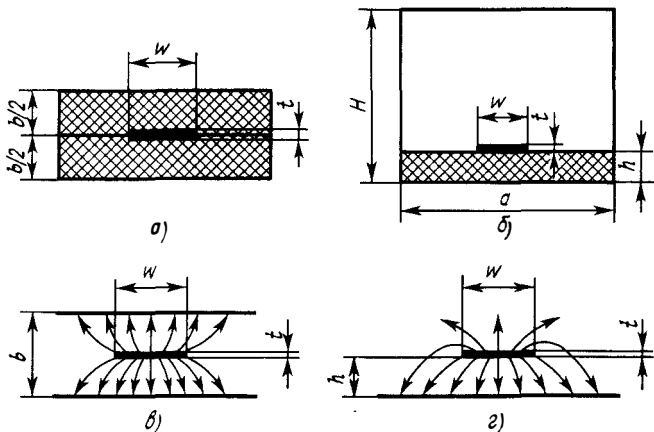


Рис. 7.11. Полосковая линия:

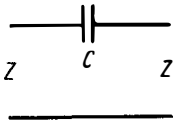
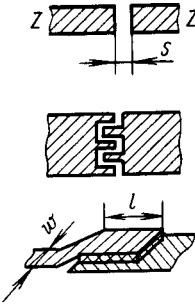
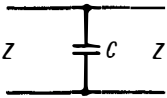
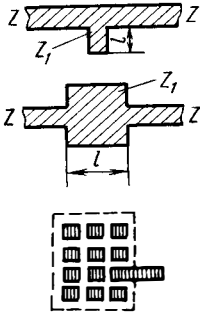
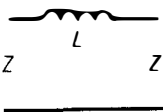
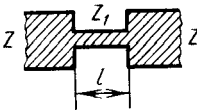
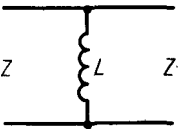
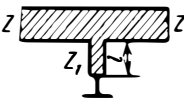
а — симметричная; б — несимметричная; в, г — распределение силовых линий поля в симметричной и несимметричной линии

рации. По конструкции полосковые линии делятся на симметричные (рис. 7.11, а), несимметричные (рис. 7.11, б), щелевые (двухпроводные линии, в которых волна распространяется вдоль щелей между находящимися в одной плоскости проводящими поверхностями), копланарные (трехпроводные линии, в которых волна распространяется вдоль щелей между находящимися в одной плоскости проводящими поверхностями). Если линия выполняется на подложке из материала с большой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon > 6$), то она имеет меньшие размеры и называется *микрострипковой линией (МПЛ)*.

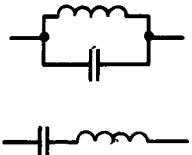
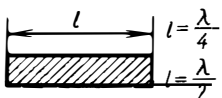
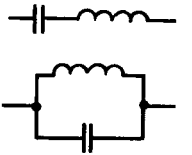
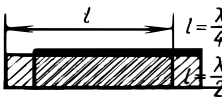
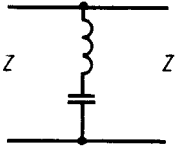
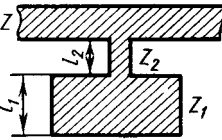
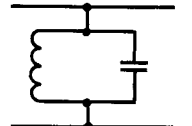
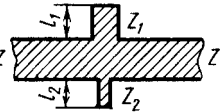
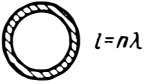
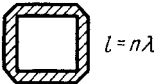
На основе МПЛ могут быть выполнены индуктивности, емкости, резонаторы (табл. 7.2 и 7.3), направленные ответвители, фильтры, резистивные элементы и т. д. Геометрические размеры пассивных элементов на МПЛ зависят от частоты сигнала и диэлектрической проницаемости материала подложки.

В РЭС СВЧ первых поколений использовались полые волноводы, заполненные воздухом ($\epsilon = 1$). Фазовая скорость распространения волны в волноводе с воздушным заполнением равна скорости света c , а длина волны в нем $\lambda_0 = c/f_0$, где f_0 — частота колебаний СВЧ. При использовании диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости ϵ фазовая скорость распространения волны в линии $V_{\phi} = c/\epsilon_{\text{эф}}$, где $\epsilon_{\text{эф}}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость, зависящая от ϵ и геометрии линии, c — скорость света. Уменьшение скорости распространения волны приводит к уменьшению длины волны и обусловленной этим возможности примерно трех- и четырехкратного сокращения размеров пассивных структур, геометрические размеры которых кратны длине волны. Вначале это достигалось заменой полых

Реализация индуктивностей и емкостей на МПЛ

Элемент	Топология
<p>Последовательная емкость</p> 	
<p>Параллельная емкость</p> 	
<p>Последовательная индуктивность</p> 	
<p>Параллельная индуктивность</p> 	

Реализация резонаторов на МПЛ

Схема	Топология
	
	
	
	
	
	

волноводов полосковыми линиями, выполненными методами печатного монтажа на платах из фольгированного диэлектрика ($\epsilon = 2 \dots 6$), а в последнее время стали располагать МПЛ на подложках из материалов с большим значением диэлектрической проницаемости (табл. 7.4), которые, кроме того, имеют меньшие потери на излучение.

При выборе конструкции МПЛ необходимо учитывать не только требование минимизации габаритов, но и оптимизации электрических параметров МПЛ. Обычно рисунок полосковых проводников несимметричной МПЛ выполняется на одной стороне подложки, а экран — на другой. Минимальная ширина экрана $a \geq w$, где w — ширина полоскового проводника. Определенные требования накладываются на толщину полоскового проводника и точность выполнения его геометрических размеров, проводимость, шероховатость поверхности подложки, качество контакта экранного слоя с корпусом модуля или блока.

Для МПЛ используют подложки из керамики, ситалла, ферритов, полупроводниковых материалов (кремний, арсенид галлия). Максимальные размеры подложки из керамики, ситалла и ферритов составляют 48×60 мм, толщина их 0,5 и 1,0 мм для керамики и ситалла, 1 и 2 мм для феррита. Полупроводниковые подложки вырезаются из пластин дисковой формы. Идеальный материал должен иметь минимальные потери на заданной частоте, температурную и временную стабильность ϵ и $\text{tg } \delta$, минимальную шероховатость поверхности после обработки, минимальное количество пор, хорошую теплопроводность, обеспечивать заданную точность, усадку и коробление, поддаваться обработке шлифовкой и полировкой, быть стойким к травителям. Материала, удовлетворяющего одновременно всем требованиям, не существует. Поэтому он (см. табл. 7.4) выбирается для каждого применения. На частотах до 10...20 ГГц обычно используют диэлектрические подложки, обладающие меньшими, чем полупроводниковые (особенно кремниевые), потерями. На более высоких частотах иногда применяют полупроводниковые подложки (например, на основе арсенида галлия), что позволяет выполнить все устройство СВЧ в едином технологическом цикле и уменьшить его массу и габариты. Диэлектрические подложки из поликора и сапфира имеют малые потери, минимальную шероховатость после обработки, высокую теплопроводность. Оксид бериллия и брокерит-9, содержащий 99,7% Be_2O_4 , обладают наивысшей для керамических материалов теплопроводностью, но их пыль (образующаяся при механической обработке) токсична, а потери больше, чем потери подложек из поликора. Подложки из кремния обладают высокой теплопроводностью, но потери в них велики. Достоинством кварца является стабильность диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот и очень низкие диэлектрические потери. Арсенид галлия имеет малые потери, диэлек-

Некоторые свойства материалов подложек гибридных ИС СВЧ

Материал	Плотность, г/см ³	ТКЛР, 10 ⁻⁷ К ⁻¹	$\lambda(20^\circ \text{C}),$ Вт/(м·К)	$\epsilon (f=10^{10} \text{ Гц}),$ $T=20...300^\circ \text{C}$	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ ($f=10^{10} \text{ Гц},$ $T=20...300^\circ \text{C}$)	Интервал температур, °С	Шерохова- тость поверх- ности Ra, мкм
Ситалл:							
СТ-32-1	3,19	32	1,0	10	3...5	—	0,02...0,01
СТ-38-1	2,9	38	1,31	7,25...7,5	2...10	—	0,02...0,01
СТ-50-1	2,65	50	—	8,2	50	—	0,02...0,01
Керамика:							
поликор	4,0	75	25...37,7	9,6±0,2	0,2...0,5	—	0,02...0,01
сапфир	3,93	66,6	23	11,4 (оси) 13,2 (оси ⊥)	— 1	—	0,01
сапфирит	3,96	62	21...25	9,3...10,1	1...1,1	—	—
ГМ (99,6% Al ₂ O ₃)	4	64...80	21...25	9,5...10	0,5...1,2	—	0,04
22ХС (94,4% Al ₂ O ₃)	3,65	60	13,1	9,2...9,4	10	—	0,08
брокерит (99,7% Be ₂ O ₄)	2,90	75...92	6,4...6,6	6,4...6,6	1...5	—	0,1...0,08
Ферриты:							
10СЧ-6	5,02	49...61	2,59	13,8...16,3	70	—	—
30СЧ-6	3,9	50...78	—	8,5...10,5	20	—	—
Арсенид галлия	—	57	41	13,3±0,4	16	—	0,01
Высокоомный кремний	—	42	90...150	12	10...150	—	0,01
Стекло	—	—	1	5	20	—	—
Кварц	—	5,5	6...10	3,78	1	—	0,01
					(при 10 ⁶ Гц)		
Фольгированные диэлектрики:							
ФФ-4, ФАФ-4	2,1...2,3	500...2500	—	1,9...2,2	2,3	-100...+200	—
ВДФ-250	—	—	—	2,5...2,7	7...14	-60...+250	—
СФ-2А	1,9...2,9	—	—	6	250...350	-60...+80	—
Высокочастотный материал с наполнителем:							
ПТ-3	1,07	—	—	2,38...2,58	7...9	-60...+85	—
ПТ-5	1,5...1,75	380...530	—	4,75...5,25	7,9	-60...+85	—
сополимер САМ	—	—	—	2,6...2,8	4,5	-60...+80	—

Некоторые свойства металлических пленок для устройств СВЧ

Группа	Металл	Удельное сопротивление (относительно меди)	Толщина скин-слоя (при 2 ГГц), мкм	ТКЛР, 10^{-6} K^{-1}	Адгезия с подложкой
1	Серебро	0,95	1,4	21	Слабая
	Медь	1,0	1,5	18	Очень слабая
	Золото	1,36	1,7	15	То же
2	Алюминий	1,6	1,9	26	Хорошая
	Хром	7,6	4,0	9,0	»
	Тантал	9,1	4,4	6,6	Очень хорошая
	Титан	32,8	10,21	8,9	То же
	Ванадий	3,2	2,66	4,6	»
3	Вольфрам	3,2	2,6	4,6	Плохая
	Молибден	3,3	2,7	6,0	»
4	Платина	6,2	3,7	—	Средняя

Примечание: Удельное сопротивление меди $1,75 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

трическая проницаемость его постоянна в диапазоне частот 4...40 ГГц, однако стоимость в 10 раз выше стоимости кремния и в 100 раз выше стоимости оксида алюминия.

К материалам *проводящих пленок* (табл. 7.5) для МПЛ предъявляются требования малого удельного сопротивления, хорошей адгезии к подложке, способности к химическому травлению, пайке, сварке, высокой коррозионной стойкости. Материалы группы 1 (серебро, медь, алюминий, золото) используют для получения проводящего (медь, алюминий) или защитного покрытия (золото, серебро), материалы группы 2 — в качестве подслоя для повышения адгезии; вольфрам и молибден используют как резистивные материалы. Платина хорошо противостоит коррозии в условиях повышенной температуры, поэтому ее можно применять в качестве защитного покрытия. Кроме того, платину используют для того, чтобы исключить взаимную диффузию и образование сплавов в структурах из материалов групп 1 и 2.

Для обеспечения приемлемых параметров МПЛ толщина проводящего слоя должна быть не менее четырех толщин скин-слоя. Ширина полосковых проводников w определяется из условия получения заданного волнового сопротивления Z при заданной толщине подложки и ее диэлектрической проницаемости. Для согласования с другими устройствами наибольшее распространение получили полосковые линии с $Z = 50 \text{ Ом}$ для волн короче 15...20 см для дециметрового и сантиметрового диапазона и $Z = 75 \text{ Ом}$ для метрового диапазона. Это объясняется тем, что потери при передаче энергии СВЧ по коаксиальному кабелю минимальны при волновом сопротивлении $Z = 30...70 \text{ Ом}$. Хотя

волновое сопротивление антенны в виде вибратора можно получить значительно больше, например 300 Ом, но в этом случае необходимо использовать дополнительные согласующие устройства (что вносит дополнительные потери) при соединении антенны с измерительной аппаратурой и полосковыми линиями. Добротность пассивных структур на частоте 1...10 ГГц составляет 100...400.

На параметры МПЛ значительное влияние оказывает шероховатость поверхности подложки, от которой зависят потери в полосковой линии и точность рисунка полосковых проводников. Шероховатость поверхности характеризуется средним арифметическим отклонением профиля неровностей R_a (мкм). Иногда удобнее пользоваться безразмерной величиной R_a/δ , где δ — толщина скин-слоя. Например, при $R_a/\delta=2$ потери возрастают на 60%, а при $R_a/\delta=0,8$ — не более чем на 10%. Подложки с шероховатостью $R_a=0,16...0,08$ мкм используют, как правило, в низкодобротных схемах, работающих в нижней части диапазона СВЧ, где требования к потерям и точности рисунка (нестабильности Z) невысоки. У шероховатых подложек ниже стоимость и лучше адгезия полосковых проводников к подложке. С переходом в высокочастотную область диапазона СВЧ используются подложки с $R_a=0,04...0,01$ мкм. При более шероховатой подложке не обеспечивается требуемая точность воспроизведения рисунка схемы из-за снижения качества фоторезистивного слоя. Толщина проводника также влияет на точность рисунка, так как чем она больше, тем больше боковой подтрав.

В ряде случаев кроме элементов с распределенными параметрами в модулях и блоках СВЧ используют элементы с сосредоточенными параметрами в интегральном исполнении (катушки индуктивности, конденсаторы, резисторы), а также дискретные элементы (резисторы, резонаторы, конденсаторы, транзисторы, диоды и т. д.). Параметры элементов рассматриваются как сосредоточенные, если размеры элементов много меньше длины волны. Использование таких элементов позволяет сократить на порядок габариты устройств СВЧ.

В качестве индуктивностей, работающих до частоты 1 ГГц, можно использовать катушки индуктивности из объемного микропровода, на более высоких частотах — катушки в виде плоских спиралей с номинальным значением индуктивности 1...10 нГн при добротности более 100. В целом устройства на элементах СВЧ с сосредоточенными параметрами имеют меньшие добротности, чем их прототипы на отрезках полосковых линий передачи, но правильный выбор схем позволяет эту разницу минимизировать. Конденсаторы с сосредоточенными параметрами, имеющие емкость доли пикофарад, выполняются в виде встречно направленных гребенчатых структур.

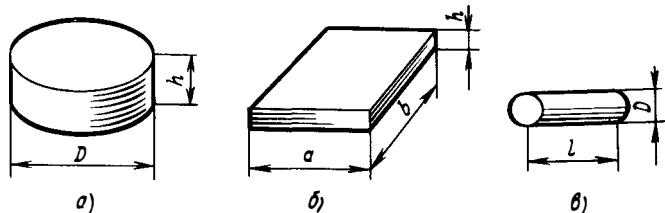


Рис. 7.12. Объемные диэлектрические резонаторы в виде диска (а), параллелепипеда (б), стержня (в)

В конструкциях устройств СВЧ на МПЛ используют *дискретные элементы*: резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы, бескорпусные ИС. Используют микрорезисторы типов СЗ-2-2,7; СЗ-3-0,125 и др., бескорпусные конденсаторы типов К10-9; К10-17В; К53-16; К10-39; К10-42; К10-43; К53-19 и др., миниатюрные трансформаторы (например, типа ТИГ-34).

Значительного уменьшения габаритов фильтров СВЧ можно добиться, используя объемные резонаторы из диэлектриков или феррита. Первые позволяют получить устройства, работающие на одной частоте, а вторые допускают перестройку частоты путем изменения тока подмагничивания.

Объемные диэлектрические резонаторы (рис. 7.12) конструктивно хорошо согласуются с МПЛ, так как между ними устанавливается достаточно простая связь (рис. 7.13). Сигнал, частота которого лежит в пределах полосы пропускания резонатора, переводит последний в режим магнитного диполя. Вследствие магнитной связи излучение такого диполя передается соседнему элементу (звену фильтра или МПЛ). Материалы диэлектрических резонаторов выгодно выбирать с высоким значением ϵ , когда потери на излучение минимальны. При использовании диэлектрических резонаторов из диоксида титана TiO_2 ($\epsilon \approx 85$) размеры фильтра (вследствие уменьшения длины рабочей волны) уменьшаются в 3...5 раз по сравнению с размерами волноводных фильтров. К недостаткам фильтров на диэлектрических резонаторах следует отнести необходимость экранирования (что увеличивает массогабаритные параметры резонатора), а также чувствительность к колебаниям температуры окружающей среды.

Диэлектрический объемный резонатор крепится с помощью пенопласта, диэлектриков полистирольного типа или с помощью стержня небольшого диаметра, проходящего через его ось. Одна из конструкций полосового фильтра на последовательно включенных диэлектрических резонаторах представлена на рис. 7.14. В качестве основания использована подложка из поликора с нанесенными на нее микрополосковыми входной и выходной линиями. Фильтр состоит из четырех дисковых диэлектрических резонаторов, прикрепленных к подложке с помощью стержней

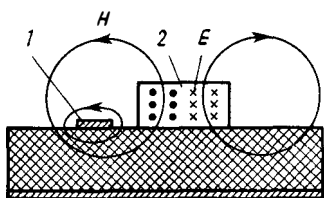


Рис. 7.13. Электромагнитная связь объемного диэлектрического резонатора с МПЛ:

1 — полосковый проводник; 2 — объемный резонатор; H , E — силовые линии магнитного и электрического полей

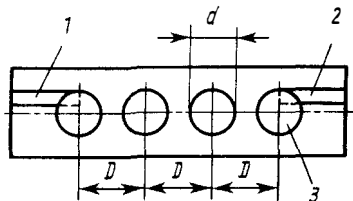
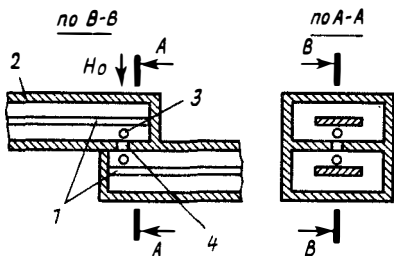


Рис. 7.14. Фильтр с диэлектрическими резонаторами высокой добротности:

1, 2 — МПЛ на входе и выходе фильтра; 3 — резонаторы

Рис. 7.15. Конструкция фильтра на двух ферритовых сферических резонаторах:

1 — полосковые проводники; 2 — волновод; 3 — ферритовые сферы; 4 — прямоугольная щель



из полистирола диаметром 0,5 мм, проходящих через оси дисков. На основе резонаторов из диоксида титана, имеющих размеры $d=8,59$ мм; $h=1,27$ мм и расположенных на расстоянии $D_1=5,51$ мм; $D_2=11,85$ мм; $D_3=12,39$ мм, получен фильтр на частоту $f_0=9,65$ ГГц, с полосой пропускания $2\Delta f_p=50$ МГц, что обеспечило добротность около 200 (что в четыре раза больше добротности фильтра на МПЛ).

Ферритовые резонаторы чаще всего имеют сферическую форму и делаются из железиттриевого граната (ЖИГ). Изменяя намагниченность феррита с помощью петли с током, можно перестраивать фильтр. Одна из возможных конструкций фильтра на основе двухрезонаторной полосковой структуры представлена на рис. 7.15. Резонаторы расположены вблизи короткозамкнутого конца экранированной полосковой линии. Связь между резонаторами осуществляется через щель. При отсутствии резонанса связь между полосковыми линиями очень слабая. При резонансе образующийся в ферритовых сферах высокочастотный дипольный момент с круговой поляризацией вызывает появление составляющей напряженности высокочастотного магнитного поля, благодаря чему резонаторы оказываются хорошо связанными.

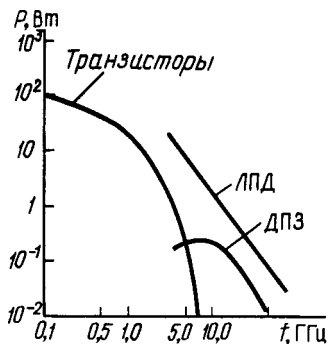


Рис. 7.16. Зависимость мощности полупроводниковых приборов от частоты

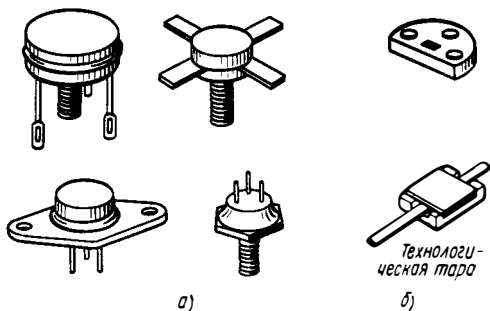


Рис. 7.17. Конструкции мощных высокочастотных корпусированных (а) и бескорпусных (б) транзисторов

К наиболее распространенным активным *полупроводниковым* элементам СВЧ можно отнести транзисторы, диоды с отрицательным сопротивлением различных типов: диоды Ганна (ДГ), лавинно-пролетные диоды (ЛПД), диоды с переносом заряда (ДПЗ), а также диоды с нелинейной зависимостью емкости *p-n*-перехода от напряжения, например параметрические диоды, варакторы и диоды с накоплением заряда. В диапазоне СВЧ мощность активных полупроводниковых приборов и узлов с увеличением частоты уменьшается пропорционально отношению максимальной частоты f_{max} к квадрату действующей частоты f : f_{max}/f^2 . Так, для транзисторов при $f=500$ МГц $P=100$ Вт; при 3 ГГц $P=5$ Вт; при 5 ГГц $P=1$ Вт (рис. 7.16). При этом уменьшается и КПД: при $f=30...300$ МГц он составляет 60...70%, при $f=0,3...3$ ГГц 30...50%; при $f=3...30$ ГГц 5...20%. Уменьшение мощности и КПД с увеличением частоты объясняется влиянием реактивных параметров полупроводниковой структуры. Уменьшение КПД требует интенсификации теплоотвода. Конструктивные особенности полупроводниковых СВЧ-элементов иллюстрирует рис. 7.17. Характерными для них являются хороший теплоотвод за счет использования в конструкции корпуса металла или керамики (22ХС, брокерит-9), большая площадь теплового контакта (в частности, благодаря использованию резьбовых стержней на корпусе), минимальные активные и реактивные сопротивления выводов и межвыводных паразитных параметров благодаря уменьшению их длины (шариковые и балочные выводы, бескорпусное исполнение). Планарные внешние выводы хорошо согласуются с МПЛ по волновым параметрам.

Переходные устройства. Выполнить модуль или блок СВЧ полностью на полосковых линиях не представляется возможным,

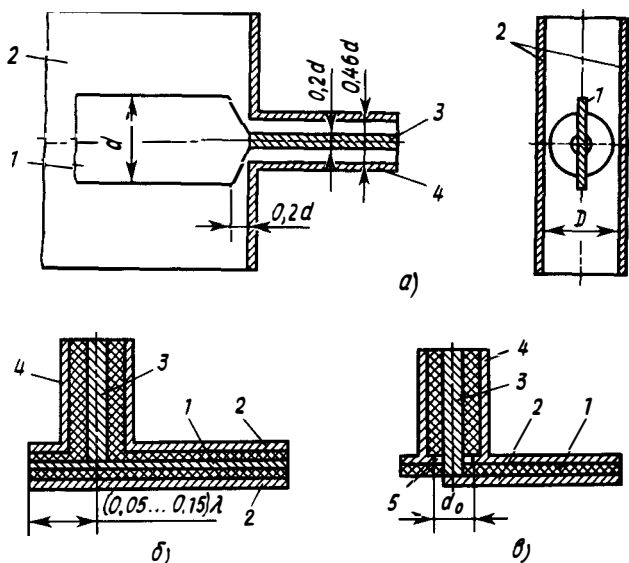


Рис. 7.18. Коаксиально-полосковые переходы:

a — непосредственный переход коаксиальной линии в симметричную полосковую; *б, в* — перпендикулярные переходы на симметричную и несимметричную полосковые линии; 1 — центральный проводник полосковой линии; 2 — экран; 3 — центральный проводник коаксиальной линии; 4 — экран коаксиальной линии; 5 — отверстие для согласования перехода

так как одни узлы (антенна, промежуточный усилитель и т. д.) могут иметь волноводный или коаксиальный вход (выход), другие разделены экраном; иногда необходимо соединить полосковую линию с коаксиальной линией или высокочастотным соединителем, с навесными компонентами.

Варианты коаксиально-полосковых переходов представлены на рис. 7.18. На рис. 7.18, *a* изображен переход с 50-Ом симметричной полосковой линии с воздушным заполнением на 50-Ом коаксиальную линию, обеспечивающий коэффициент стоячей волны по напряжению менее 1,05 в диапазоне 1, 17...7 ГГц. Размеры линии: $d = 16$ мм, $D = 12,7$ мм. Экран коаксиальной линии непосредственно подсоединяется к экрану полосковой линии, а внутренняя жила коаксиального кабеля переходит в центральный проводник полосковой линии.

На рис. 7.18, *б* показан так называемый перпендикулярный переход. Его целесообразно использовать, когда волновые сопротивления и размеры коаксиальной и полосковой линий довольно сильно отличаются. В этом случае для согласования необходимо применять согласующие элементы, которыми могут быть короткозамкнутый на конце четвертьволновый шлейф или разомкнутый на конце шлейф небольшой длины

$(0,05...0,15)\lambda$, подбираемой экспериментально при настройке. Переход с коротким разомкнутым шлейфом более широкополосный. Согласовать переход можно также с помощью ряда проводящих штырьков, соединяющих экранные пластины, число и место расположения которых вблизи сочленения линий подбирается опытным путем. Согласование в перпендикулярных переходах осуществляется с помощью шлейфов, разомкнутых или короткозамкнутых на конце (рис. 7.18, б), или путем подбора диаметра отверстия d_0 в заземленной пластине (рис. 7.18, в). При оптимальном согласовании перехода (рис. 7.18, в) можно получить КСВН меньше 1,2 в диапазоне 2...8 ГГц, а вносимые при этом потери менее 0,5 дБ.

§ 7.3. Конструкции функциональных узлов, модулей и блоков СВЧ

При конструировании устройств СВЧ схемные, конструктивные и технологические факторы учитываются одновременно. Основными задачами, которые решаются при конструировании устройств СВЧ, являются: получение высококачественных трактов СВЧ (малые потери, высокая однородность и стабильность волнового сопротивления, возможность подстройки, малые габариты и масса, малые помехи); обеспечение теплового режима; минимизация габаритов и массы устройства СВЧ, состоящего из функциональных узлов, модулей и блоков; обеспечение высокой надежности работы в условиях воздействия дестабилизирующих факторов (вибраций, ударов, линейных ускорений, тепла, влаги, радиации, электромагнитных полей).

Для решения этих задач необходимо обеспечить точное взаимное расположение элементов устройства СВЧ, малое переходное сопротивление между экраном полосковой линии и корпусом, разработать конструкцию монтажа ВЧ- и НЧ-схем, оценить достижимый уровень интеграции каналов (число и номенклатура входящих в канал узлов).

Функциональный узел СВЧ обычно выполняется на отдельной подложке стандартных форм и размеров (например, $1 \times 24 \times 30$ мм). Чаще всего используют подложки из поликора, который имеет характеристики, близкие идеальным: хорошую теплопроводность, высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 9,6$), хорошо поддается полировке. Одна сторона подложки металлизирована, а на другой создается рисунок пассивной части схемы СВЧ и монтируются навесные элементы. Подложки чаще всего располагаются с одной или двух сторон металлического основания (рис. 7.19). Варианты компоновки модуля СВЧ при

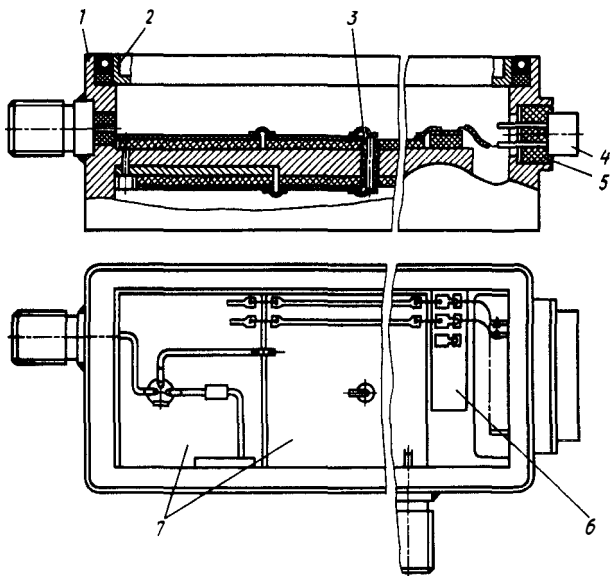


Рис. 7.19. Конструкция модуля СВЧ:

1—корпус; 2—крышка; 3—коаксиальный переход; 4—низкочастотный соединитель; 5—компаунд ПДИ-21; 6—переходная плата; 7—микросборки

одностороннем расположении микросборок представлены на рис. 7.20.

Крепление подложек микросборок к основанию осуществляется (см. рис. 7.20—7.23) клеей, пайкой, с помощью винтов и струбцин. Основными задачами при этом являются обеспечение малого переходного сопротивления экрана МПЛ по отношению к корпусу и стойкость к термоциклированию. Приклеивание с помощью эластичного электропроводящего клея ЭПК-68 на основе кремнийорганического каучука с наполнителем из мелкодисперсного серебра обеспечивает стойкость к термоциклированию (больше 1000 термоциклов при изменении температуры от -60 до $+125^{\circ}\text{C}$), замену неисправных микросборок без температурных воздействий, стойкость к вибрациям и ударам. Недостатком является сравнительно большое сопротивление клеевого слоя ($0,04$ Ом для подложки размером 24×30 мм при толщине слоя $0,1$ мм).

Крепление пайкой позволяет уменьшить переходное сопротивление. Для обеспечения стойкости к термоциклированию (до 200 циклов) необходимо увеличить толщину припоя, что во избежание его вытекания требует армирования сеткой толщиной $0,2$ мм. При необходимости обеспечения увеличения стойкости к термоциклированию (до 500 циклов) толщина переходного слоя увеличивается до $0,7$ мм в результате использования двух слоев припоя с сеткой и

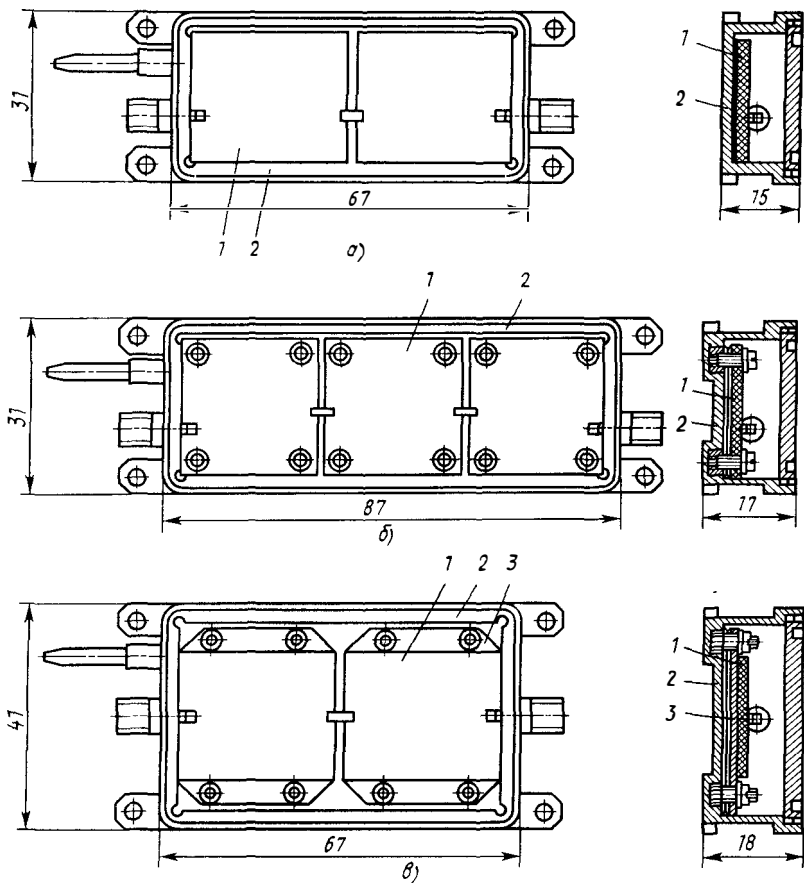


Рис. 7.20. Варианты компоновки модулей СВЧ с односторонним расположением функциональных узлов; крепление микросборок клеей или пайкой (а), винтами за подложку (б) и винтами за переходную плату (в):
 1—микросборка; 2—корпус модуля; 3—переходная плата

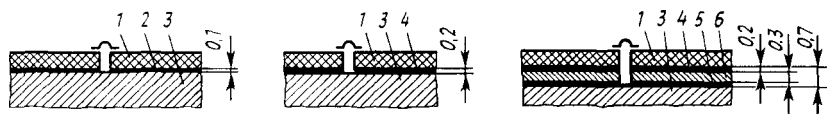


Рис. 7.21. Варианты крепления микросборок клеей и пайкой:
 1—подложка микросборки СВЧ; 2—клей; 3—металлическое основание; 4—припой; 5—припой с медной сеткой; 6—прокладка из титана (слой полосковых проводников и экранирующий слой МПД не показаны)

промежуточной прокладки из титана (см. рис. 7.21). Пайка осуществляется низкотемпературными припоями ПОИп52 с температурой плавления $+125^{\circ}\text{C}$ или еще более низкотемпературными припоями (ПОИпКС, ПСрЗИп). Недостатком этого способа крепления является необходимость нагрева всего модуля при демонтаже и повторном монтаже любой микросборки. Кроме того, затвердевание припоя приводит к появлению внутренних напряжений в подложке, из-за которых могут возникнуть микротрещины.

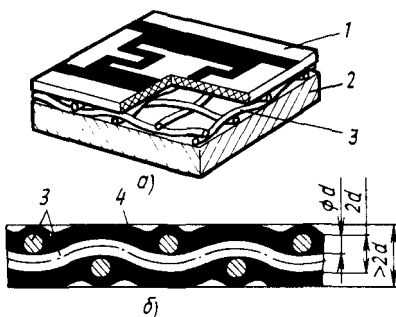
Крепление винтами осуществляется через отверстия в микросборке (рис. 7.23, а, в) к резьбовым втулкам из титана, установленным в основании из алюминиевого сплава. В этом случае необходима упругая контактная прокладка из бериллиевой бронзы. Для улучшения контакта экран МПЛ, контактная прокладка и места контактирования на корпусе покрываются слоем золота. Стоимость такого покрытия составляет 3% стоимости модуля СВЧ, но оно значительно повышает надежность и улучшает другие параметры всего устройства. Недостатками способа крепления с помощью винтов являются увеличение габаритов и массы, возможность взаимного смещения подложек микросборок при механических перегрузках, растрескивания подложек при закреплении винтов. Частично два последние недостатка могут быть уменьшены при усложнении конструкции (рис. 7.23, б, г).

Если несколько подложек микросборок, подобно мозаике (см. рис. 7.20), установлены на едином основании, то соединение полосковых проводников соседних подложек может быть выполнено с помощью медной золоченой или более прочной золотой фольги толщиной 20 мкм или двумя-тремя золотыми проводниками диаметром 50 мкм.

При установке подложек должны выполняться требования, указанные в табл. 7.6. Для выполнения требований соосности выходных полосковых проводников соседних микросборок последние выполняются с высокой точностью геометрических разме-

Рис. 7.22. Расположение проволок медной сетки относительно подложки и металлического основания (а) и взаимное расположение сетки и припоя (б):

1 — плата; 2 — металлическое основание; 3 — медная сетка; 4 — слой припоя с пустотами у поверхности; d — диаметр проволоки



Точность взаимной ориентации плат микросборок модуля СВЧ

Неоднородность тракта СВЧ	Рабочая частота			
	не более 1 ГГц		не более 10 ГГц	
	Толщина подложки, мм			
	0,5	1,0	0,5	1,0
Зазор между платами	$0,15 \pm 0,05$	$0,15 \pm 0,05$	$0,1 \pm 0,05$	$0,1 \pm 0,05$
Несоосность полосковых проводников	0,15	0,3	0,1	0,2
Разновысотность полосковых проводников	0,3	0,3	0,2	0,2
Зазор между полосковым проводником и штырем гермо-соединителя	0,22	0,22	0,22	0,22

Таблица 7.7

Ширина перемычек для соединения полосковых проводников соседних плат модуля СВЧ

Параметр	Толщина подложки, мм	
	0,5	1,0
Ширина полоскового проводника на плате, мм	0,47	0,96
Ширина перемычки, мм	$0,4 \pm 0,05$	$0,9 \pm 0,05$

ров (например, $30_{-0,02} \times 24_{-0,02}$ мм, угол между сторонами $90 \pm 3^\circ$) и с точностью расположения выходных полосковых проводников к базовым сторонам не хуже ± 40 мкм. При использовании подложек с неточными геометрическими размерами ($30_{-0,1} \times 24_{-0,1}$ мм) совмещение полосковых проводников производится визуально. Толщина перемычек из золотой фольги для соединения соседних микросборок (рис. 7.24) составляет 0,02 мм. Ширина перемычки зависит от волнового сопротивления тракта СВЧ, толщины подложки и выбирается по табл. 7.7. Соединение перемычек с полосковыми проводниками осуществляется контактной сваркой. Изгиб перемычки необходим для термокомпенсации. Высокая точность взаимного расположения полосковых проводников обусловлена необходимостью получения воспроизводимых параметров модуля СВЧ без дополнительной подстройки.

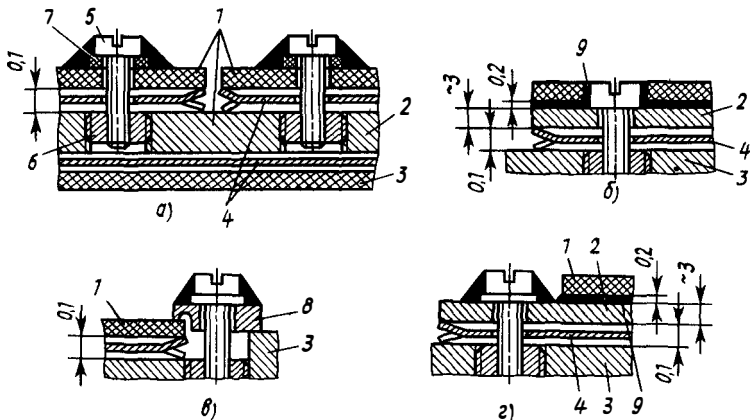


Рис. 7.23. Механическое крепление СВЧ микросборок:

1—плата; 2—промежуточное основание; 3—корпус модуля; 4—прокладка; 5—винт; 6—втулка; 7—неметаллическая шайба; 8—струбцина; 9—припой с сеткой

Корпус модуля СВЧ обычно выполняется коробчатой формы (см. рис. 7.19 и 7.20) и имеет крышку с одной или двух сторон. Герметизация осуществляется паяным швом или резиновыми прокладками (см. гл. 4). Высота от подложки до крышки модуля (рис. 7.25) выбирается из соображений предотвращения распространения волн высших типов, а также с учетом высоты навесных элементов (транзисторов, диодов, ИС, конденсаторов, постоянных магнитов, подмагничивающих катушек и т. д.) и различных переходных устройств. Для исключения распространения волн высших типов необходимо соблюдать условие $(H - h_{пл})/h_{пл} \geq 5$ (до 10) для подложек из поликора (см. рис. 7.25). Иногда для исключения распространения высших типов волн на внутреннюю сторону крышки наносят слой поглощающего материала или изменяют конфигурацию поля с помощью настроечного винта, ввернутого в экспериментально определенное место в экране. С этой же целью размеры любой стороны корпуса, в котором установлены не разделенные экраном подложки, не должны быть более половины самой короткой резонансной длины волны.

При выборе материала корпуса модуля следует учитывать возможность эффективного теплоотвода, близость ТКЛР корпуса и подложки, возможность пайки и т. д. Обычно применяют латунь, медь, алюминиевые сплавы, титан, ковар (табл. 7.8), а также керамику (22ХС , ВеО , $\text{Ве}_2\text{О}_4$) и карбид кремния. Следует учитывать, что алюминиевые сплавы близки по ТКЛР к полиимидным платам, а титан и его сплавы — к стеклотекстолитовым платам, керамика и ковар — к кремнию. Для улучшения тепло-

Параметры металлов и сплавов, используемых для изготовления корпусов модулей СВЧ

Параметр	Латунь	Алюминиевый сплав	Медь	Титан ВТ5-1	Ковар (сплав 29НК)
ТКЛР, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	18,9	26	18	8,3	4,4...5,2
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м \cdot °С)	75...82	92...188	259...400	—	15...21
Плотность, г/см 3	8,7	2,7	8,94	4,4	8,2
Удельная проводимость $\sigma \cdot 10^{-5}$, (Ом \cdot см) $^{-1}$	1,67...4	1,3...3,57	5,8	—	—

проводности корпус из ковара иногда покрывают слоем меди. Керамические корпуса больших размеров обладают значительной массой и не всегда достаточно прочны механически. Кроме того, вследствие колебания усадки при спекании керамики для получения точных геометрических размеров необходимо производить дополнительную механическую обработку. Основные методы изготовления корпусов и их применимость изложены в гл. 5.

Ввод и вывод низкочастотных сигналов из модуля СВЧ осуществляются с помощью герметичных соединителей и гермовводов (см. гл. 4), сигналы СВЧ вводятся и выводятся через коаксиальные герметичные соединители, конструкция которых допускает подсоединение к МПЛ (рис. 7.26). Для герметизации штыря соединителя используется металлостеклянный спай. После установки в корпус соединитель герметизируется опайкой припоем ПОС-61. Допустимое истечение через соединитель не должно

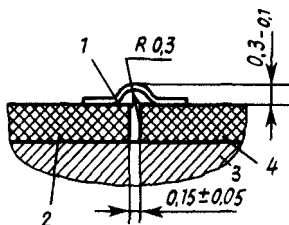


Рис. 7.24. Соединение микроволновых линий соседних микросборок перемычкой из фольги (полосковые проводники и экраны условно не показаны); 1—перемычка; 2, 4—микросборки; 3—корпус модуля

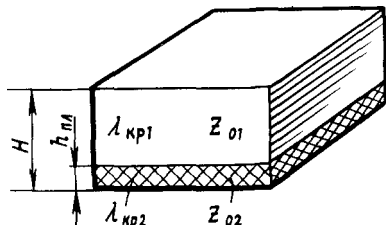


Рис. 7.25. Корпус модуля как волноводный резонатор, частично заполненный диэлектриком: $\lambda_{кр1}$ и $\lambda_{кр2}$ —критические длины волн; Z_{01} и Z_{02} —волновые сопротивления для областей, не заполненной и заполненной диэлектриком соответственно

превышать 10^{-8} дм³·Па/с. Электрическое соединение между герметизированным соединителем и полосковым проводником осуществляется перемычкой из фольги толщиной 0,02 мм (рис. 7.27). Расстояние *A* от плоскости установки микросборки до оси гермосоединителя выбирается по табл. 7.9 и зависит от способа крепления плат и толщины подложки.

Таблица 7.9

Расстояние от плоскости установки платы до оси гермосоединителя

Способ крепления	Толщина подложки, мм	$A \pm 0,05$ мм
Клейка	0,5	1,1
	1,0	1,6
Пайка	0,5	1,3
	1,0	1,8

Одной из основных проблем при конструировании модулей СВЧ является отвод теплоты. Обычно теплота от тепловыделяющих компонентов отводится за счет теплопроводности материалов герметичной конструкции. Иногда все элементы узла располагаются на мощном теплоотводе. Усилитель мощности (рис. 7.28) работает на частоте 2,25 ГГц, обеспечивая выходную мощность 7 Вт; его площадь $6,25 \times 2,5$ мм. В конструкции теплоотвод осуществляется через медь и оксид бериллия. В случае менее теплонапряженного режима достаточно разместить подложки на теплоотводящих основаниях (см. рис. 7.19). При увеличении плотности теплового потока могут быть использованы тепловые

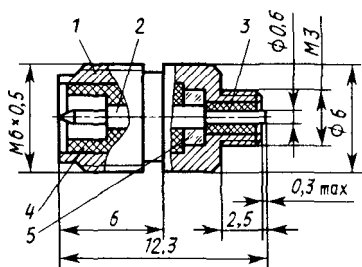


Рис. 7.26. Конструкция герметичного коаксиального соединителя: 1—корпус; 2—штырь; 3, 4—изоляционные втулки из фторопласта; 5—стеклянная таблетка

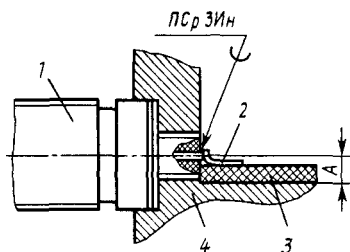


Рис. 7.27. Монтаж коаксиально-полоскового соединителя (полосковый проводник и экран условно не показаны): 1—соединитель; 2—перемычка; 3—плата; 4—корпус модуля

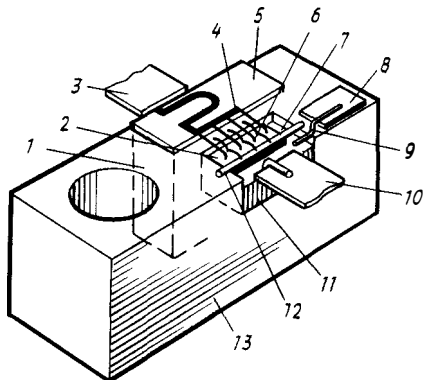


Рис. 7.28. Конструкция усилителя мощности на рабочую частоту 2,25 ГГц и выходную мощность 7 Вт: 1—воздушный зазор; 2—кристалл транзистора; 3—вход; 4—эмиттерный вывод; 5—подложка из сапфира; 6—базовый вывод; 7—коллекторная металлизация; 8—блокировочный конденсатор; 9—коллекторный вывод; 10—выход; 11—слой оксида бериллия; 12—корпусной брус; 13—медный корпус

трубы, расположенные в герметизированном объеме (рис. 7.29). От корпуса модуля или от тепловых труб теплота отводится воздушной или жидкостной конвекцией. Для принудительного воздушного охлаждения наземного РЭС СВЧ иногда стенки негерметичного корпуса, выполняющие одновременно функции экрана, делают (рис. 7.30) в виде сотовой конструкции с вентиляционными патрубками. Каждый такой патрубок

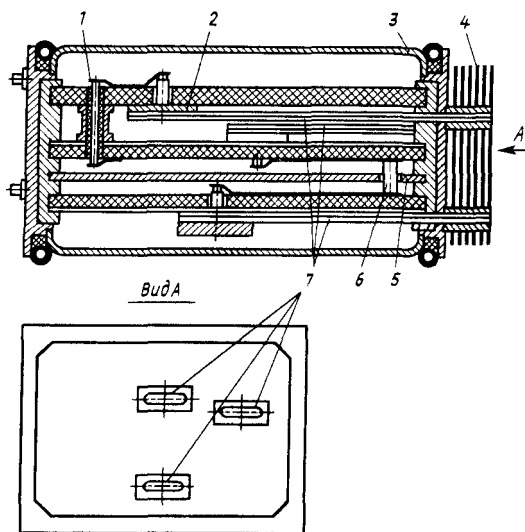


Рис. 7.29. Конструкция модуля СВЧ с тепловыми трубами:

1—коаксиальный переход между платами; 2—основание для крепления тепловых труб; 3—боковая стенка корпуса; 4—радиатор; 5—экран; 6—диэлектрический переход между платами; 7—тепловая труба

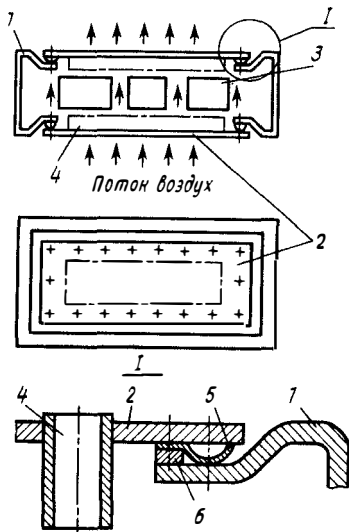


Рис. 7.30. Конструкция экрана корпуса:

1—каркас; 2—крышка с патрубками; 3—функциональный узел; 4—патрубок; 5—контактная гребенка; 6—планка

является запредельным волноводом, не пропускающим электромагнитные волны, но свободно пропускающим поток охлаждающего воздуха.

Примеры конструкций функциональных узлов и модулей СВЧ однослойного (планарного) исполнения. На рис. 7.31 представлен внешний вид модуля, герметизированного паяным швом. Видны низкочастотные и высокочастотный соединители, закрытые крышками.

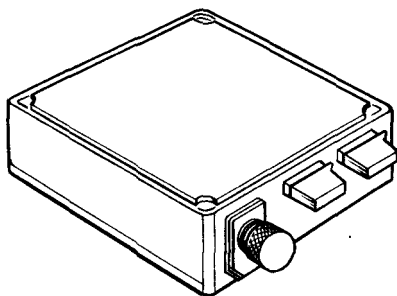


Рис. 7.31. Гермокорпус модуля приемопередатчика

На рис. 7.32 показана конструкция одного из возможных вариантов модуля фазовращателя на переключаемых отрезках линий. На рис. 7.33 приведена топология микросборки однокаскадного транзисторного усилителя, выполненного на основе МПЛ, бескорпусного транзистора и конденсатора, припаяемых непосредственно к МПЛ. На рис. 7.34 изображена

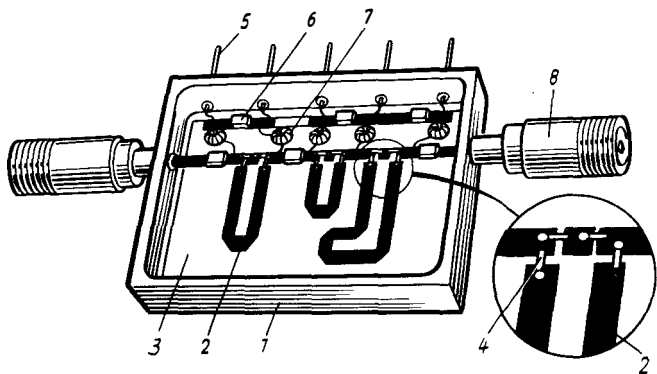
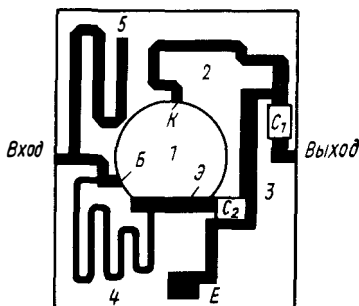


Рис. 7.32. Конструкция модуля трехзвенного фазовращателя:

1 — корпус; 2 — полосковый проводник; 3 — диэлектрическая плата; 4 — *p-i-n*-диоды; 5 — выводы для подключения источника питания; 6 — блокировочный конденсатор; 7 — дроссель; 8 — коаксиально-полосковый переход

Рис. 7.33. Топология функционального узла однокаскадного транзисторного усилителя СВЧ по схеме с общим эмиттером:

1 — отверстие для установки транзистора с обеспечением теплового контакта с корпусом устройства; 2 — коллекторная цепь; 3 — система блокировки источника питания; 4 — цепь смещения базы; 5 — разомкнутый шлейф входной колебательной системы; C_1 и C_2 — навесные конденсаторы; E — напряжение питания



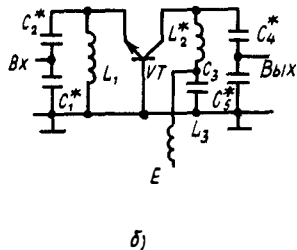
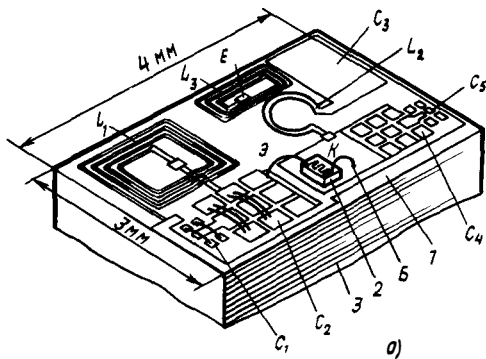


Рис. 7.34. Усилитель S-диапазона с выходной мощностью 1 Вт:

а — топология (1 — земляная шина; 2 — транзистор; 3 — сапфировая подложка толщиной 0,25 мм); б — принципиальная электрическая схема; параметры элементов C_1, C_2, C_4, C_5, L_2 подбираются при настройке

конструкция микросборки усилителя S-диапазона с выходной мощностью 1 Вт, построенного на пленочных элементах ($L_1—L_3$) с сосредоточенными параметрами. Возможна подстройка емкости конденсаторов C_1, C_2, C_4 с помощью элементов, подпаиваемых проволочными перемычками и увеличивающих площадь верхних обкладок. Значения параметров: $C_1 = 1,5...5$ пФ; $C_2 = 3,2...32$ пФ; $C_3 = 40$ пФ; $C_4 = 1,2...16$ пФ; $C_5 = 0,8...5, 0$ пФ; $L_1 = 25$ нГн; $L_2 = 1,4...2$ нГн; $L_3 = 2$ нГн. На рис. 7.35 приведена топология микросборки диодного генератора. Особенностью схемы является наличие разомкнутого шлейфа, к которому подпаивается один или несколько дополнительных отрезков МПЛ. На рис. 7.36

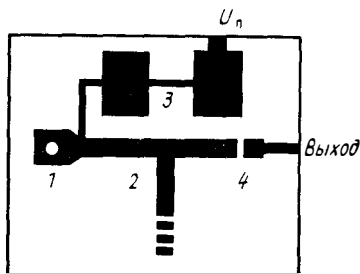


Рис. 7.35. Топология диодного генератора:

1 — диод с отрицательным сопротивлением; 2 — разомкнутый настроечный шлейф; 3 — ФНЧ, блокирующий источник питания; 4 — блокировочный зазор для развязки нагрузки генератора от источника питания

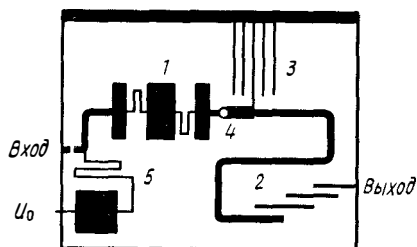


Рис. 7.36. Топология варакторного умножителя частоты:

1 — ФНЧ; 2 — полосовой фильтр выходной колебательной системы; 3 — блокировочная короткозамкнутая линия; 4 — варактор; 5 — система блокировки источника смещения U_0

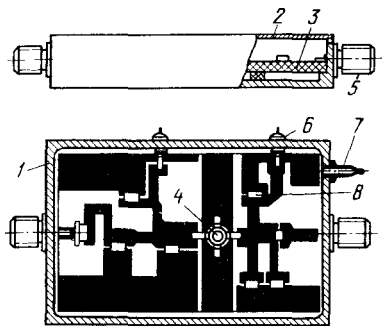


Рис. 7.37. Конструкция широкополосного усилителя мощности: 1 — корпус модуля; 2 — крышка; 3 — плата; 4 — транзистор с планарными выводами; 5 — коаксиальный гермоввод; 6 — НЧ-гермоввод; 7 — узел герметизации; 8 — навесной конденсатор

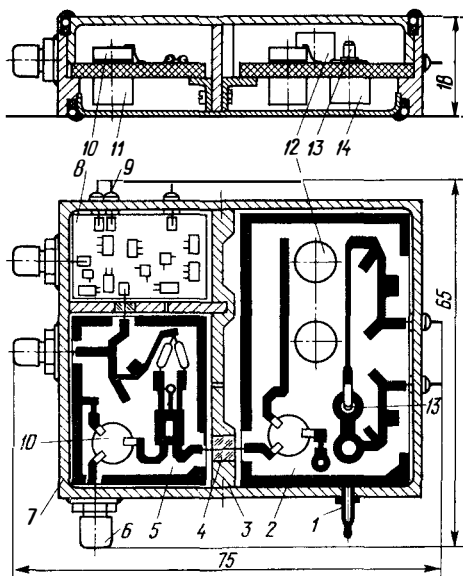


Рис. 7.38. Конструкция приемного устройства РЛС:

1 — узел герметизации; 2 — плата местного гетеродина; 3 — внутренняя экранирующая стенка модуля; 4 — межплатный СВЧ-переход; 5 — плата балансного смесителя; 6 — высокочастотный гермоввод; 7 — корпус модуля; 8 — плата предварительного усилителя промежуточной частоты; 9 — НЧ-гермоввод; 10 — ферритовый диск; 11 — магнит; 12 — диэлектрический резонатор; 13 — диод Ганна; 14 — радиатор

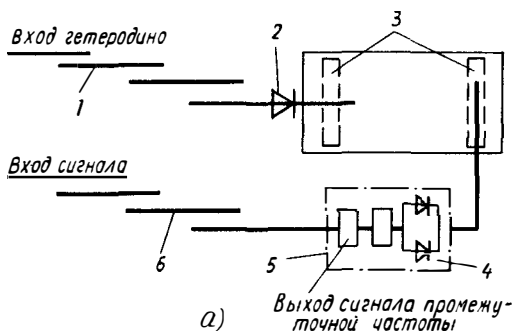


Рис. 7.39. Схема супергетеродинного приемника (а) и его конструкция в виде объемной интегральной схемы (б):

1 — входной фильтр умножителя; 2 — умножитель частоты; 3 — щелевые резонаторы выходного фильтра умножителя; 4 — фильтр низкой частоты; 5 — экран; 6 — входной фильтр в цепи сигнала; 7 — коаксиальный переход в цепи вывода сигнала промежуточной частоты; 8 — внешний экран

приведена топология варакторного умножителя частоты, включающего блокировочную короткозамкнутую линию и фильтр на МПЛ. На рис. 7.37 показана конструкция модуля широкополосного усилителя дециметрового диапазона с выходной мощностью 30...40 мВт, размещенного в гермокорпусе. Герметизация осуществляется пайкой крышки с последующей откачкой воздуха и заполнением внутреннего объема модуля сухим азотом. На рис. 7.38 приведена конструкция модуля приемного устройства РЛС. Отдельные узлы (гетеродин, балансный смеситель, УПЧ) разделены экранирующими перегородками, через которые проходят линии связи. Отвод теплоты от диода Ганна осуществляется радиатором.

Модули планарной конструкции в ряде случаев имеют неоправданно большие габариты. Одним из путей уменьшения габаритов

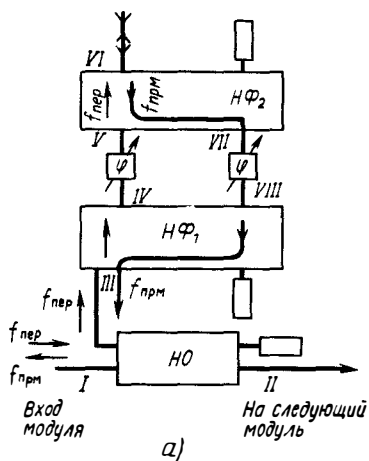
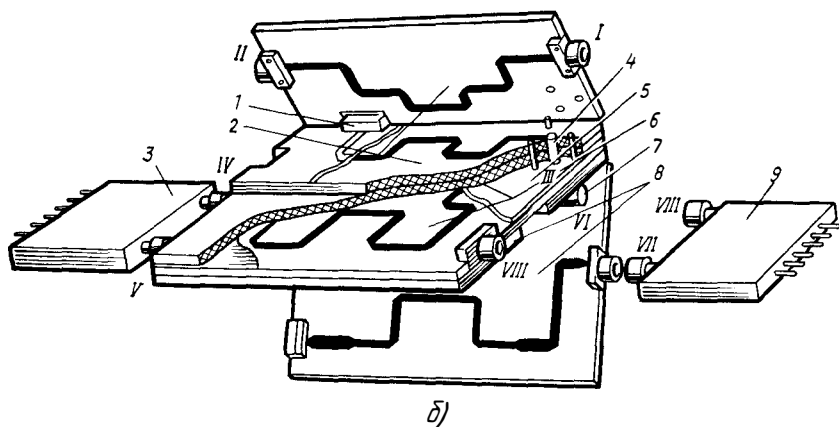


Рис. 7.40. Структурная схема приемо-передающего модуля АФАР (а) и его конструкция в поэтажном исполнении (б):

1 — согласованная нагрузка; 2 — верхняя и нижняя платы НО; 3 — фазовращатель передающего канала; 4 — этапный ВЧ-переход; 5 — диэлектрическая прокладка НФ₁; 6 — верхняя и нижняя платы НФ₁; 7 — выход модуля на излучатель; 8 — верхняя и нижняя платы НФ₂; 9 — фазовращатель приемного канала; $f_{\text{прм}}$, $f_{\text{пер}}$ — частота сигналов в режиме приема и в режиме передачи



(на 1—3 порядка) является применение объемных (многослойных) интегральных схем. Конструкция приемника на таких схемах представлена на рис. 7.39. Спецификой является использование электромагнитной связи между умножителем и его фильтром, щелевыми резонаторами этого фильтра, между ФНЧ и выходным фильтром в цепи сигнала. Вывод сигнала промежуточной частоты выполняется коаксиальным переходом. Весь модуль помещен в экран.

На рис. 7.40,а представлена схема, а на рис. 7.40,б — конструкция трехэтажного приемопередающего модуля АФАР. Направленные ответвители (НО) и направленный фильтр НФ₂ расположены на крайних платах, а направленный фильтр НФ₁ — на средней плате. Фазовращатели выполнены в виде модулей, подключаемых через высокочастотные соединители, расположенные на торцах трехслойной структуры.

Значительно уменьшить габариты и массу модулей можно используя гибкие платы на основе перспективных полимерных материалов (см. табл. 7.4). Для увеличения диэлектрической проницаемости применяют композиционные материалы (смесь органической основы с порошком неорганических материалов), имеющие большое значение ϵ (для материала ПТ5 $\epsilon \approx 5$, для материала Duroid-6010 $\epsilon = 10,5 \pm 0,26$, для материала Epsilam 10 — около 10 и т. д.). Уменьшить габариты модулей СВЧ можно, применяя эластичные подложки микросборок из полимерных материалов (табл. 7.10), выполненные с учетом формы корпуса, например в виде цилиндра.

Таблица 7.10

Параметры некоторых полимерных материалов подложек микросборок устройств СВЧ

Материал	ϵ (1 ГГц)	$\text{tg } \delta$ (100 МГц)	Удельное объемное сопротивле- ние, Ом·см	Максималь- ная рабочая температура, С
Тефлон, армированный стеклотканью	2.5	0,0008	10^{18}	240
Полисульфон	3.07	0,003	$10^{13} \dots 10^{14}$	170
Сополимер тетрафтор- этилена и шестифтористого пропилена	2,0...2,05	Менее 0,0003	Свыше 10^{18}	220
Сополимер этилена и тет- рафторэтилена	2.6	0,0008	$10^{16} \dots 10^{17}$	230
Полифенилоксид	2.6	0,0007	$10^{17} \dots 10^{18}$	104

Компоновка РЭС СВЧ радиотехнического назначения, построенных с использованием АФАР, представлена на рис. 7.41—7.45.

Общим в их компоновке является наличие излучателей, модулей в герметичном исполнении и системы высокочастотной разводки.

АФАР дециметрового диапазона (рис. 7.41) предназначена для связи в полевых условиях. Устройство разбирается на несколько частей и переносится в упаковках. Основание, имеющее регулируемые опоры, служит для установки модулей в герметичном исполнении. На лицевой части наклонной панели располагаются излучатели, закрытые радиопрозрачными обтекателями (рис. 7.41, а). В дециметровом диапазоне расстояние между излучателями сравнительно велико, что позволяет разместить приемопередающие модули в традиционном одноканальном исполнении в непосредственной близости от излу-

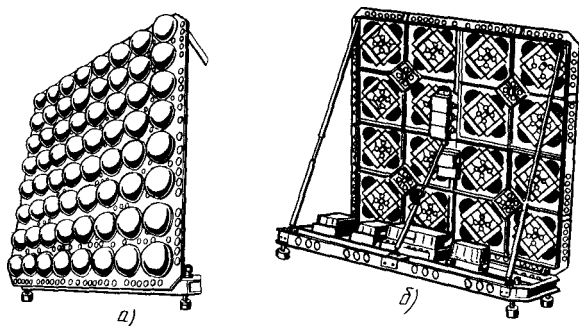


Рис. 7.41. Конструкция АФАР дециметрового диапазона

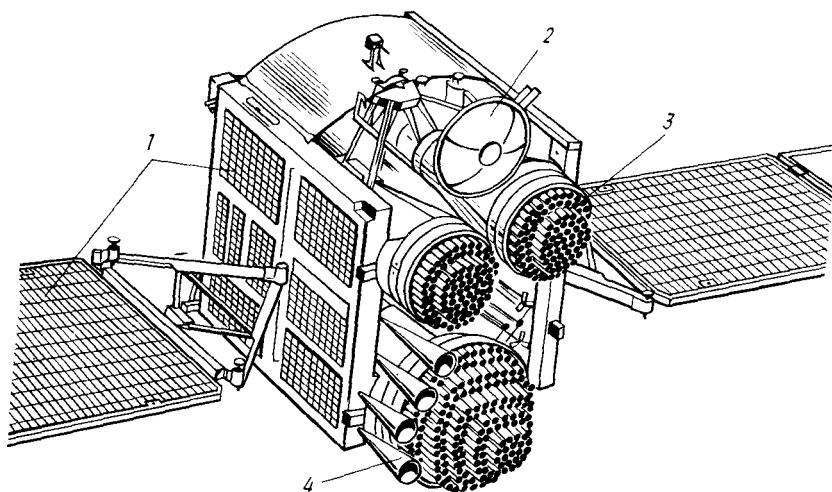


Рис. 7.42. Внешний вид спутника-ретранслятора:

1—солнечная батарея; 2—зеркальная антенна; 3—АФАР; 4—роупорные антенны

телей — каждый модуль (сторона «квадрата»), расположенный на обратной стороне панели, находится около своего излучателя с обратной стороны панели (рис. 7.41, б). Высокочастотные соединения блоков основания между собой, с блоками на панели и последних с излучателями осуществляются с помощью коаксиальных кабелей и разъемных ВЧ-соединителей. Для уменьшения массы в основании и панели выполнены отверстия, не снижающие прочности всего устройства. В сантиметровом диапазоне расстояние между излучателями уменьшается, что может привести к необходимости выполнения приемопередающих модулей для нескольких излучателей в едином блоке.

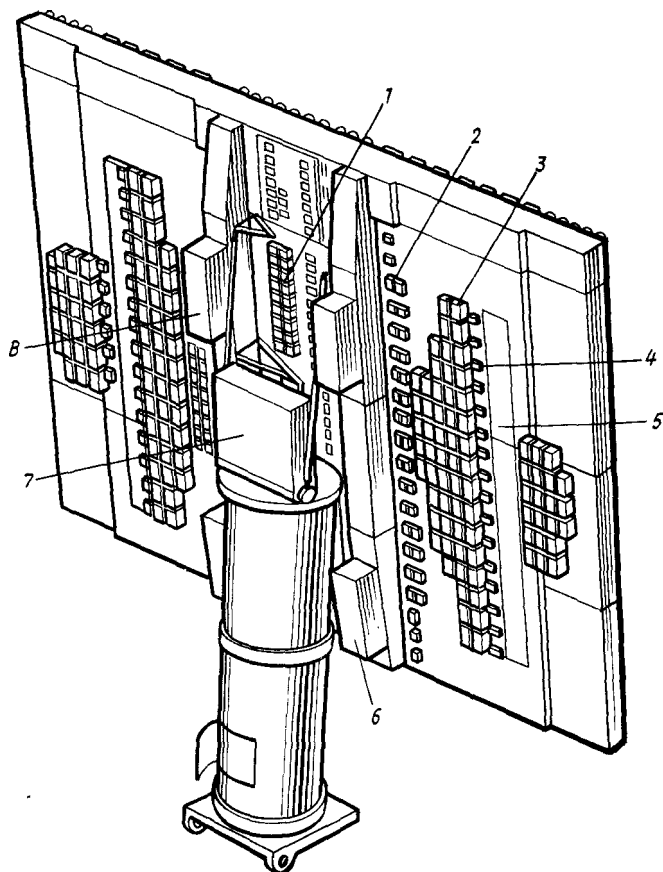


Рис. 7.43. Внешний вид стационарной АФАР на пьедестале:

1— фазовращатели приемной решетки; 2— маломощные усилители и циркуляторы; 3— присмопередающие модули; 4— фазовращатели передающей решетки; 5— аттенюаторы передатчиков; 6— блок управления лучом; 7— контрольное устройство системы формирования луча и радиочастотного тракта приема; 8— усилители мощности

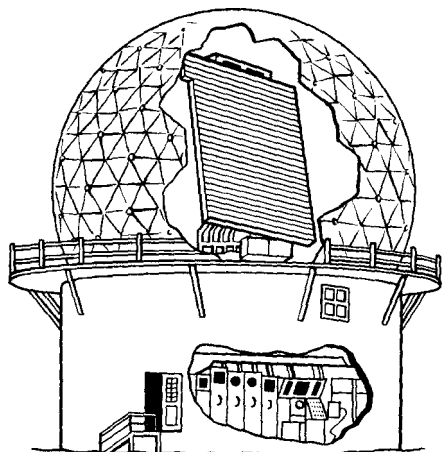


Рис. 7.44. Внешний вид стационарной РЛС на АФАР

Спутник-ретранслятор (рис. 7.42) является сложным радиотехническим устройством, содержащим АФАР, а также рупорные, зеркальные и другие антенны. Питание ретранслятора осуществляется от солнечных батарей.

АФАР широко используются для стационарных радиолокационных устройств. На рис. 7.43 представлена компоновка наземной АФАР, а на рис. 7.44 — ее размещение в радиолокационном комплексе. Для защиты АФАР от климатических воздействий использован шаровидный обтекатель сотовой конструкции

из радиопрозрачного материала (например, из пропитанного компаундом шелка). В цокольном помещении находятся операторы и аппаратура. Размещение АФАР и ее блоков на американской ракете иллюстрируется рис. 7.45. Несущими основаниями являются печатные платы дисковой формы, к которым крепятся модули и блоки СВЧ, а также модули

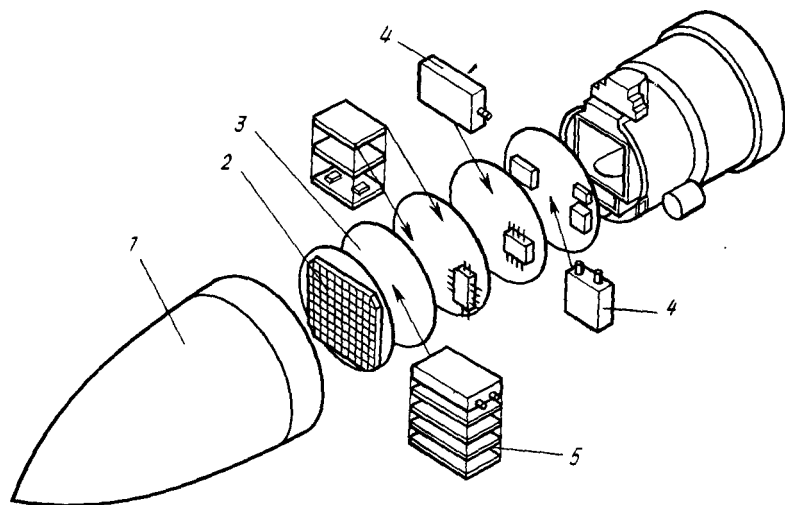


Рис. 7.45. Размещение АФАР на ракете (США):
1 — обтекатель; 2 — АФАР; 3 — платы; 4 — модуль СВЧ; 5 — блок СВЧ

обработки цифровой информации. Все устройство закрыто радиопрозрачным обтекателем.

РЭС СВЧ широко используются в устройствах связи. На рис. 7.46 схематически представлена система спасения на море, а на рис. 7.47 — конструкция маяка-ответчика для этой системы, работающего на частоте 9320...9500 МГц. Маяк реагирует на сигнал радиолокатора поискового корабля или самолета. Питание маяка осуществляется от водоактивированной батареи, которая начинает работать при заполнении ее водой (в случае аварийной ситуации). О работе батареи сигнализирует лампа наверху маяка. Основной конструкции маяка является полый волновод, состоящий из трех звеньев. Полый волновод имеет меньшие потери, чем МПЛ. Наличие трех звеньев облегчает контроль работы, параметров приемника и передатчика, а также установку перегородки в среднем звене для разделения волноводных трактов приемника и передатчика. В среднем звене выполнены щелевые антенны приемника и передатчика. В верхнем звене волноводного тракта расположена плата приемника, в нижнем — передатчика, а в основании маяка — преобразователь напряжения водоактивированной батареи. Все узлы маяка заключены в водонепроницаемый разъемный корпус из пластмассы. Место разъема нижней и верхней частей корпуса

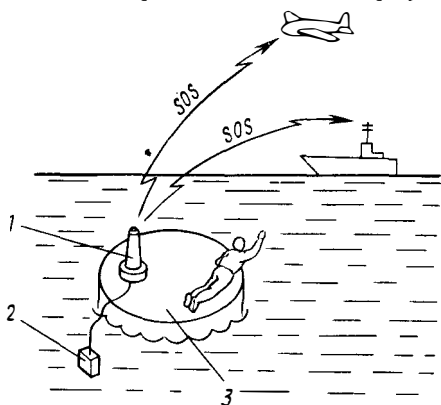


Рис. 7.46. Структура системы спасения на море:

1 — маяк-ответчик; 2 — водоактивированная батарея питания; 3 — спасательный плот

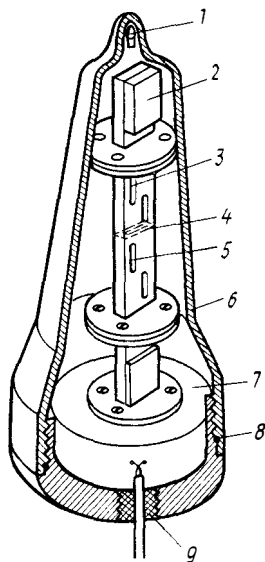


Рис. 7.47. Конструкция маяка-ответчика фирмы «Mitsubishi»:

1 — сигнальная лампа источника питания; 2 — плата приемника; 3 — щелевая антенна приемника; 4 — перегородка; 5 — щелевая антенна передатчика; 6 — корпус; 7 — преобразователь напряжения; 8 — прокладка герметизации корпуса; 9 — герметизирующая заливка кабеля питания

герметизировано резиновой прокладкой, а место выхода из корпуса кабеля питания залито герметизирующим компаундом.

При разработке РЭС СВЧ необходимо учитывать конструкторские и технологические факторы, от которых зависят такие параметры, как потери и добротность МПЛ, нестабильность волнового сопротивления МПЛ, адгезия проводящих слоев к подложке. На потери в МПЛ оказывают влияние такие конструкторские факторы, как геометрия полосковых проводников, толщина подложки и диэлектрическая проницаемость ее материала. Технологическими факторами обуславливается многослойность полосковых проводников (слой хрома для адгезии, медь для проводящего слоя, золото для защитного слоя), а также шероховатость поверхности подложки. Сопротивление проводников зависит от зернистости, пористости и толщины слоев, которые, в свою очередь, зависят от стабильности технологических режимов и качества инструмента, оснастки и оборудования.

На нестабильность волнового сопротивления влияют разброс размеров рисунка полосковых проводников, непараллельность и разнотолщинность подложки, нестабильность диэлектрической проницаемости. Точность рисунка полосковых проводников зависит, в частности, от толщины проводников, влияющей на величину бокового подтрава, а также от точности изготовления фотошаблонов и их усадки со временем. Как уже указывалось, большое значение имеют точность взаимного расположения МПЛ соседних подложек и размеры соединительных перемычек.

Необходимо учитывать возможное воздействие такого технологического фактора, как возникновение механических напряжений из-за кристаллизации припоя, затяжки винтов крепления, термических технологических воздействий при термовакuumной сушке и пайке крышки корпуса.

Особое внимание должно быть уделено выбору элементов, которые позволяли бы осуществить подстройку параметров МПЛ путем подключения дискретных их частей или удаления части полоскового проводника с помощью лазера или микропескоструйки. Необходимо предусмотреть возможность настройки модуля при закрытой крышке и подключение измерительных приборов без внесения значительных неоднородностей в тракт прохождения сигналов СВЧ. Кроме того, необходимо оценить напряженность поля излучения, действующего на наладчика аппаратуры СВЧ, и принять меры по уменьшению его до норм, допустимых с точки зрения техники безопасности.

Вопросы для самоконтроля

1. Где используются устройства СВЧ?
2. Из каких материалов делаются обтекатели антенн?
3. Назовите известные Вам методы управления пространственным положением луча.
4. Какие функциональные узлы входят в состав АФАР?
5. Какие пассивные структуры СВЧ, их конструкции, материалы Вам известны?
6. Какова конструкция объемных резонаторов на диэлектриках и ферритах?
7. Как обеспечивается теплоотвод в конструкциях СВЧ?
8. Какие основные задачи решаются при конструировании устройств СВЧ?
9. Как крепятся подложки микросборок СВЧ к корпусу модуля?
10. Чем определяется необходимость обеспечения точности взаимного расположения подложек?
11. Какова конструкция устройств ввода/вывода НЧ- и ВЧ-сигналов модуля?
12. Как осуществляется подстройка параметров микросборки и модуля?
13. Что дает применение объемных интегральных схем СВЧ?
14. Назовите особенности компоновки устройств СВЧ радиотехнического назначения.
15. Какие технологические факторы влияют на параметры микросборок СВЧ?

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ НАЗЕМНЫХ И БОРТОВЫХ РЭС ДИАПАЗОНОВ НЧ И ВЧ

§ 8.1. Факторы, влияющие на характер конструкций РЭС

Во введении указывалось, что на характер конструкции РЭС оказывают влияние следующие факторы: функциональное назначение всей системы, подсистем и отдельных устройств, частотный диапазон, уровень конструкторской иерархии, тип производства.

Если 40...50 лет назад РЭС использовались в основном для связи, то в настоящее время они широко применяются в различных областях: для радиовещания, телевидения, связи; управления производством и технологическим оборудованием (в том числе для управления роботами); управления космическими объектами и системами вооружения (космическими станциями, радиолокационными установками, управляемыми ракетами и т. д.); планирования народного хозяйства; построения информационных систем; диагностирования в медицине; перевода с одного языка на другой; звуковоспроизведения; обеспечения спортивных состязаний и т. д. Иногда часть сложного РЭС размещается в стационарных условиях, а часть — на борту транспортного средства (наземного, авиационного, космического, ракетного).

Многообразие функциональных систем обусловлено тем, что в общем случае сложное РЭС включает следующие подсистемы: сбора информации, содержащие различные датчики и линии связи, приема и передачи информации, обработки информации (с устройствами запоминания), связи с человеком-оператором, питания, обеспечения нормальных режимов эксплуатации (защита от влаги, тепла, механических и биологических воздействий, радиации и т. д.). Подсистемы, в свою очередь, состоят из отдельных устройств: передатчиков, приемников, ЭВМ и т. д.

Разнообразие применений РЭС, наличие в них подсистем и отдельных устройств определяет специфику и большое число вариантов конструкции РЭС.

Особенно большое влияние на конструкцию РЭС оказывает функциональное назначение, поскольку оно, в частности, определяет характер и интенсивность дестабилизирующих факторов (см. § 3.1, 4.1, 5.1, табл. 8.1).

По характеру и интенсивности воздействия климатических и механических факторов (см. табл. 8.1) наземные РЭС делятся

на стационарные, работающие в отапливаемом помещении (группа 1), стационарные, работающие на открытом воздухе (группа 2), возимые автомобильным (группа 3), речным (группа 4) и железнодорожным (группа 5) транспортом, носимые на открытом воздухе (группа 6) и в отапливаемом помещении (группа 7). В табл. 8.1 переносные РЭС не выделены, хотя в последнее время эта группа расширилась в результате миниатюризации многих видов РЭС, которые ранее относились к стационарным (персональные компьютеры, различные виды медицинской аппаратуры и т. д.).

Кроме приведенных в табл. 8.1 основных дестабилизирующих факторов для отдельных групп наземных РЭС имеют место дополнительные дестабилизирующие факторы: механические резонансы в конструкции при частоте 10...30 Гц с амплитудой 0,5...0,8 мм и временем действия 4 мин; пониженное давление $6,1 \cdot 10^4$ Па при температуре -10°C в течение 2...6 ч (для групп 1—7); циклические воздействия температур в диапазоне $-40...+60^\circ\text{C}$ в течение 2...6 ч (для групп 3—5); циклические воздействия температур в диапазоне $-50...+60^\circ\text{C}$ в течение 2...6 ч (для групп 6—7); воздействие инея и росы при температуре -10°C в течение 2...6 ч (для групп 2—6).

Те или иные условия эксплуатации характеризуются степенью жесткости (табл. 8.2, 8.3). Особую группу дестабилизирующих факторов составляют воздействия, вызванные космической и ядерной (от реакторов и атомных двигателей) радиацией, ядерными взрывами (облучение потоком гамма-фотонов, быстрых нейтронов, протонов, дейтронов).

На характер конструкции РЭС оказывают влияние также такие факторы, как регулярность использования изделия (одно- или многоразовое), режим работы (автоматический или автоматизированный), характер ремонтной базы и квалификация обслуживающего персонала, серийность производства, патентоспособность конструкции, требования по стоимости изготовления и т. д.

Рассмотрим особенности конструкций наземных и бортовых РЭС.

§ 8.2. Особенности конструкций наземных стационарных РЭС

Наземные РЭС целесообразно рассмотреть в соответствии с группами, представленными в табл. 8.1.

Наземные стационарные РЭС применяются в широкоэвещательных радио- и телевизионных передающих станциях, вычислительных системах для научных исследований и управления народным хозяйством, наземных частях систем спутниковой связи, электронных и квазиэлектронных АТС, системах управления воздушным

герметичность	Глубина погружения, м	--	--	--	--	--	0,5	--
	Время выдержки, ч	--	--	--	--	--	1	--
атмосферные осадки	Интенсивность дождя, мм/мин	--	3	3	3	3	3	3
	Время выдержки, ч	--	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
воздействие пыли	Скорость потока, м/с	--	10	10	--	10	10	--
	Время выдержки, ч	--	1	1	--	1	1	--
морской туман	Температура, °С	27	27	27	27	27	27	27
	Содержание воды, г/м ³	2...3	2...3	2...3	2...3	2...3	2...3	2...3
	Время выдержки, ч	24	48	48	48	48	48	48
Механические:								
вибрация на одной частоте	Частота, Гц	20	20	20	20	20	20	20
	Ускорение g	2	2	2	2	2	2	2
	Время выдержки, ч	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
вибрация в диапазоне частот	Диапазон частот, Гц	--	--	10...70	10...30	10...70	10...70	10...30
	Ускорение g	--	--	0,8...3,8	0,25...3,1	0,8...3,8	0,8...3,8	0,25...1,1
одиночные удары	Время выдержки, ч	--	--	12	4	12	12	4
	Длительность, мс	--	--	5...10	5...10	5...10	5...10	--
	Число ударов в 1 мин	--	--	40...80	40...80	40...80	40...80	--
	Ускорение g	--	--	15	15	15	10	--
	Общее число ударов	--	--	60	60	60	60	--
многократные удары	Длительность, мс	--	--	5...10	5...10	5...10	5...10	5...10
	Число ударов в 1 мин	--	--	40...80	40...80	40...80	40...80	40...80
	Ускорение g	--	--	15	15	25	10	10
	Общее число ударов	--	--	12 000	12 000	12 000	6000	6000
падение	Высота, мм	--	--	--	--	--	750	500
	Число падений	--	--	--	--	--	11	11

Параметры механических воздействий для РЭС

Диапазон частот, Гц	Ускорение g	Длительность, мс	Степень жесткости
<i>Вибрации</i>			
1...35	0,5	—	I
1...60	1,0	—	II
1...60	2,0	—	III
1...80	5,0	—	IV
1...100	1,0	—	V
1...200	5,0	—	VI
1...200	10,0	—	VII
1...600	5,0	—	VIII
1...600	10,0	—	IX
1...1000	10,0	—	X
1...2000	5,0	—	XI
1...2000	10,0	—	XII
1...2000	15,0	—	XIII
1...2000	20,0	—	XIV
1...3000	20,0	—	XV
1...5000	10,0	—	XVI
1...5000	20,0	—	XVII
1...5000	30,0	—	XVIII
1...5000	40,0	—	XIX
100...5000	40,0	—	XX
<i>Многократные удары</i>			
—	15	2...15	I
—	40	2...10	II
—	75	2...6	III
—	150	1...3	IV
<i>Одиночные удары</i>			
—	4	40...60	I
—	20	20...50	II
—	75	2...6	III
—	150	1...3	IV
—	500	1...2	V
—	1000	0,2...1	VI
—	1500	0,2...0,5	VII
—	3000	0,2...0,5	VIII
<i>Линейное ускорение</i>			
—	10	—	I
—	25	—	II
—	50	—	III
—	100	—	IV
—	150	—	V
—	200	—	VI
—	500	—	VII

движением, аппаратуре координационно-вычислительных центров космических исследований, системах автоматизированного проектирования и подготовки производства, системах управления технологическим оборудованием и т. д. Эти РЭС, как указывалось, состоят из большого числа сложных подсистем и отдельных устройств, часть которых работает в автоматическом режиме, а часть — во взаимодействии с человеком-оператором.

К месту установки они обычно доставляются упакованными. Поэтому такие механические воздействия, как вибрации и удары, вызванные транспортированием, при разработке конструкции стационарной РЭС можно не учитывать (если это специально не оговорено техническими требованиями). Не предусматривается также возможность падения и погружения в воду. На РЭС, предназначенные для работы в отапливаемом помещении, не предусматривается воздействие инея и росы, дождя и воздушно-пылевого потока. Таким образом, требование устойчивости к дестабилизирующим факторам для этого вида РЭС гораздо менее жесткие, чем для транспортируемых или носимых РЭС.

Так как к массе и габаритам стационарных РЭС не предъявляется жестких требований, то несущие конструкции могут выполняться из стали, а элементная база может быть корпусированной (с индивидуальной корпусной защитой отдельных ЭРЭ). В то же время стационарные РЭС специального назначения должны быть устойчивы к сейсмическим (см. § 5.1) воздействиям, которые могут быть вызваны землетрясением или атомным взрывом. Стационарные РЭС рассчитаны на длительные сроки эксплуатации. Использование ЭРЭ, ИС в герметичных корпусах облегчает замену вышедших из строя ЭРЭ. Сложность электрической схемы, многообразие выполняемых РЭС функций приводят к сложности конструкторской реализации, что обусловлено большим числом аналоговых и цифровых узлов устройств памяти, источников питания (иногда автономных), различных электро-механических периферийных устройств.

Конструктивно стационарные РЭС обычно состоят из большого числа стоек, шкафов, пультов, тумб, блоков, периферийных устройств (дисплеев, печатающих устройств, графопостроителей, антенн и т. д.). В ряде случаев отдельные устройства системы могут быть разнесены в пространстве. Для обеспечения взаимодействия отдельных устройств системы используют кабельные линии связи (рис. 8.1) или кабельные линии и радиоканалы (рис. 8.2). Сложностью конструкции наземных РЭС обусловлены их большие габариты, масса, стоимость и энергопотребление, которые ограничиваются только стоимостью эксплуатации (площадь используемых помещений, расход материалов и электроэнергии и т. д.). Высокая стоимость стационарных РЭС предполагает продолжительную эксплуатацию и, в свою очередь, высокую ремонтпригодность

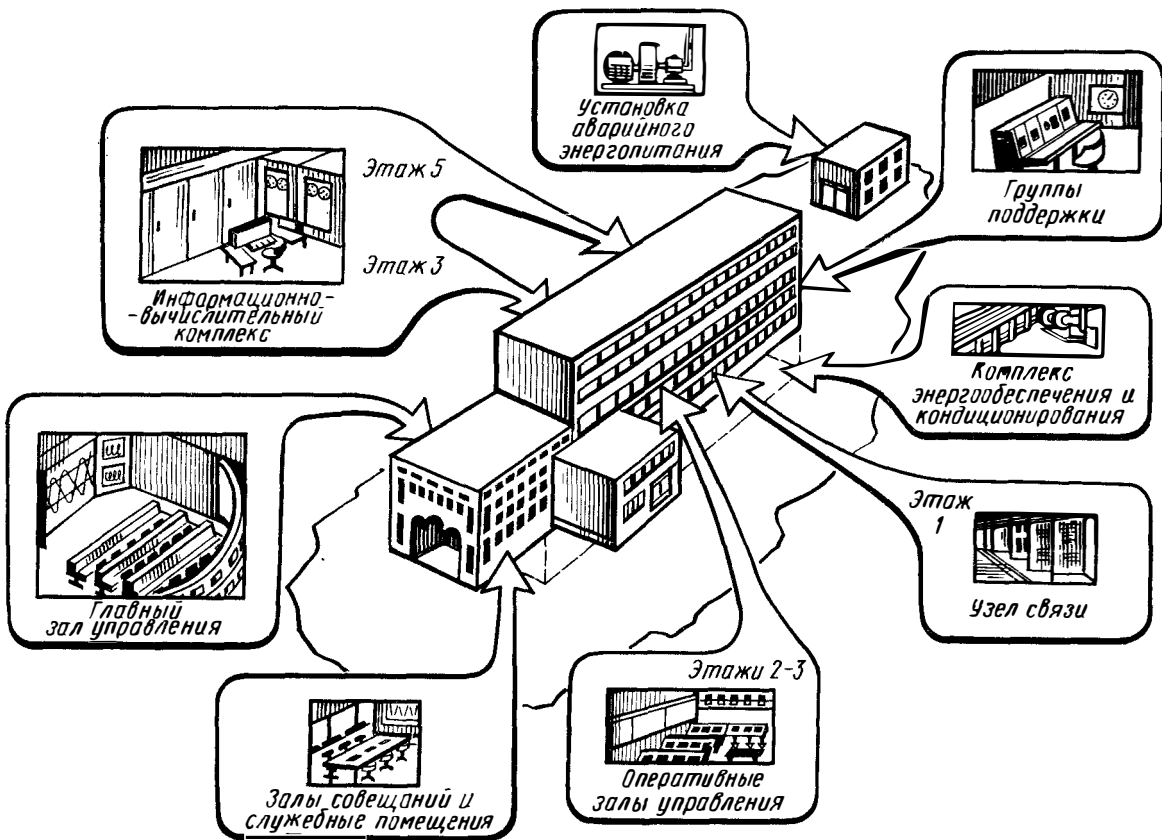


Рис. 8.1. Основные службы центра управления космическими полетами

Возможные изменения температур внешней среды

Рабочая температура, С		Степень жесткости	Предельная температура, С		Степень жесткости
верхнее значение	нижнее значение		верхнее значение	нижнее значение	
40	+1	I	+50	-50	I
45	-5	II	+60	-60	II
50	-10	III	—	-85	III
55	-25	IV	—	—	—
60	-30	V	—	—	—
70	-40	VI	—	—	—
85	-45	VII	—	—	—
100	-60	VIII	—	—	—
125	-85	IX	—	—	—
150	—	X	—	—	—
200	—	XI	—	—	—
250	—	XII	—	—	—
315	—	XIII	—	—	—
400	—	XIV	—	—	—
500	—	XV	—	—	—

и возможность модернизации эксплуатируемых РЭС по мере необходимости. Особенностью стационарных РЭС является также то, что отдельные устройства (передатчики, приемники, процессоры, запоминающие устройства, устройства питания, блоки отображения информации и т. д.) разрабатываются различными ведомствами, что приводит к большому разнообразию конструкторских решений.

Радиопередающие устройства (РПДУ) связи и вещания являются типичным примером наземных стационарных РЭС. Они выполнены в виде комплекса, предназначенного для преобразования энергии источников питания в энергию радиочастотных колебаний и управления последними с целью передачи информации в открытое пространство. Мощность, подводимая к антенне, составляет от 0,1 кВт до нескольких мегаватт (для связных устройств — в режиме нажатого ключа, для вещательных — в режиме «молчания»). Стационарные РПДУ являются устройствами не только информационными, но и энергетическими, поэтому в их состав входят не только усилители и модуляторы, но и генераторы, а также устройства питания, охлаждения, контроля. Для питания РПДУ используется подающаяся по двум высоковольтным линиям (основной и резервной) сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 110, 35, 11 или 6 кВ. Понижение до 6 кВ осуществляется специальной подстанцией. Для питания РПДУ используются выпрямители напряжениями 5...12 кВ для анодных цепей выходных каскадов,

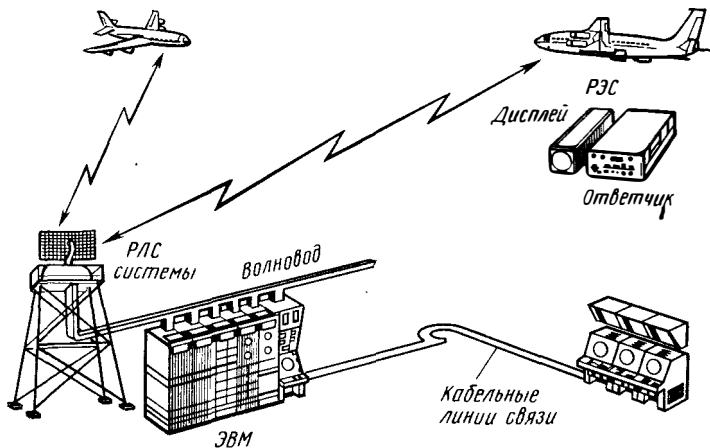


Рис. 8.2. Схема системы управления воздушным движением (США)

1...5 кВ для промежуточных каскадов и экранных сеток, 300...1000 В для маломощных каскадов предварительных усилителей и стабилизированных выпрямителей задающих генераторов; 27 В для цепей автоматики.

К основным электрорадиоэлементам РПДУ относят генераторные лампы, индуктивности и емкости (в том числе перестраиваемые). Так как в выходных каскадах выделяется значительное количество теплоты (КПД РПДУ мощностью 30...250 кВт составляет около 45%), то элементы РПДУ имеют значительные размеры, а от генераторных ламп теплота отводится с помощью воздушного, водяного или испарительного охлаждения.

Для генерации высокочастотных колебаний в РПДУ можно использовать различные электронные приборы (рис. 8.3), однако наиболее распространенными при мощностях 500...1000 кВт (вплоть до сантиметровых волн) являются генераторные электровакуумные лампы с металлокерамическим корпусом (рис. 8.4 и 8.5). В конструкции генераторных ламп предусмотрен максимальный отвод выделяющейся теплоты. Анод выполняется из меди и является частью наружной герметичной оболочки лампы, имеет оребрение для улучшения теплоотвода. Лампы, представленные на рис. 8.4, в, д и 8.5, имеют радиаторы для воздушного охлаждения, на рис. 8.4, а, б — для водяного, на рис. 8.4, г, е — для испарительного охлаждения. Титанокерамическая лампа (рис. 8.5) обеспечивает работу на частоте до 7 ГГц при температуре +200° С. Это достигается благодаря уменьшению паразитных связей, увеличению теплопроводности корпуса лампы, согласованности спая металла и керамики.

При воздушном охлаждении радиаторы ламп размещаются в потоке воздуха (рис. 8.6). Система воздушного охлаждения охватывает все стойки РПДУ. Воздух подается через сетчатый фильтр со стороны шкафа выпрямителей одним или двумя приточными вентиляторами, а в шкафы контурной системы засасывается через сетчатые фильтры одним или двумя вытяжными вентиляторами. При температуре окружающей среды ниже $+40^{\circ}\text{C}$ работает один приточный и один вытяжной вентилятор, а при повышении температуры — два приточных и два вытяжных вентилятора. Недостатком воздушной системы охлаждения является то, что она может быть использована для передатчиков или их частей мощностью до 150 кВт.

При больших мощностях используется жидкостная (рис. 8.7) или испарительная (рис. 8.8) система. В обоих случаях аноды ламп помещаются в бак с водой. В испарительной системе охлаждения для исключения образования паровой пленки в ребрах радиатора делаются поперечные прорезы. В жидкостной системе (рис. 8.7) перекачивающие насосы в первом и втором контурах условно не показаны. В испарительной системе для уменьшения шума конденсатор пара с воздушным радиатором и вентилятором располагают вне помещения, а конденсат возвращается в бак самотеком. В ряде случаев охлаждение всех компонентов высокочастотного блока может осуществляться (см. рис. 3.13) с использованием жидкого диэлектрика.

Многие РПДУ предназначены для работы в диапазоне частот, поэтому в конструкциях контуров и согласующих устройств необходимо предусмотреть возможность перестройки. В РПДУ используют катушки индуктивности с плавной регулировкой с помощью скользящего контакта (рис. 8.9) или изменения взаимного положения катушек индуктивности (вариометры, рис. 8.10), конденсаторы постоянной и переменной емкости (рис. 8.11). Для улучшения теплоотвода катушки изготавливают однослойными, из плоской ленты, меди или медной трубки квадратного сечения, через которую пропускается охлаждающая жидкость. Диаметр таких катушек составляет 50...1000 мм (в зависимости от мощности РПДУ). Каркасом служат стержни из радиофарфора, укрепленные в литых рамах из алюминиевого сплава. Скользящий контакт осуществляется с помощью пластин из фосфористой бронзы с укрепленными на них серебряными контактами.

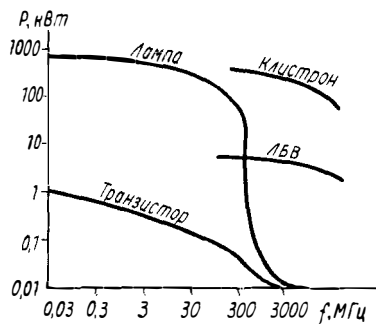


Рис. 8.3. Зависимость мощности от частоты для различных электронных приборов

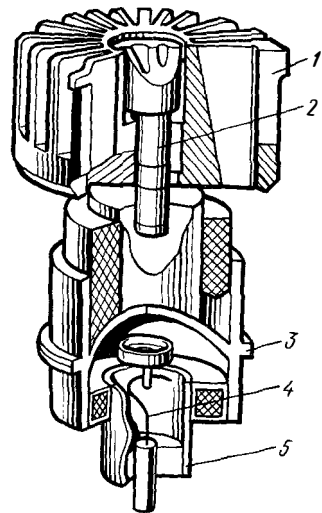
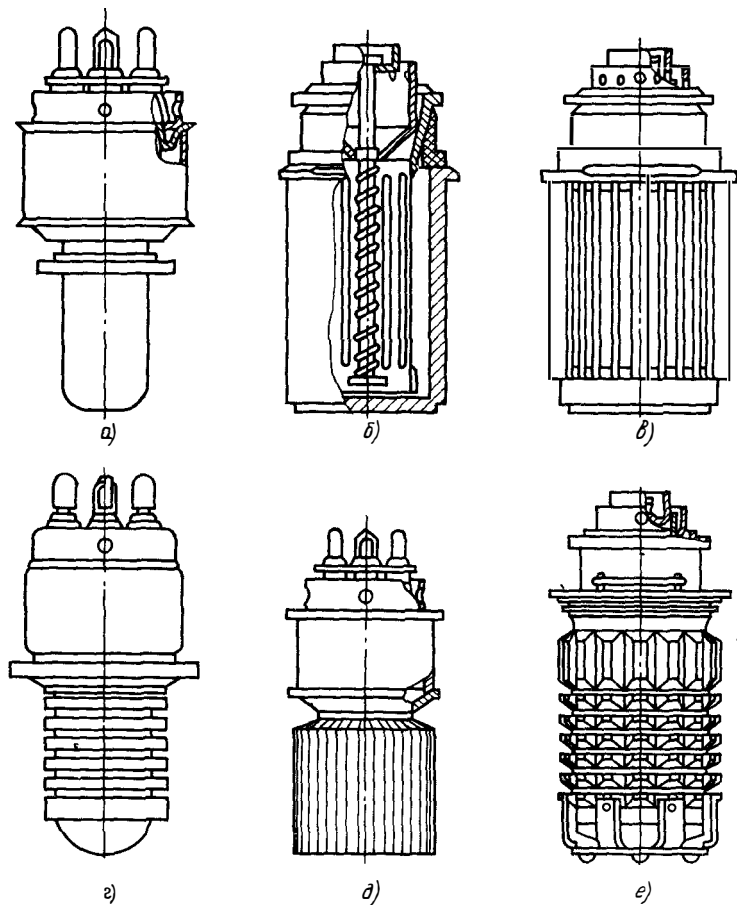


Рис. 8.5. Конструкция металлокерамической генераторной лампы:

1—радиатор воздушного охлаждения; 2—штырь с резьбой для соединения анода с радиатором; 3—цилиндрический вывод сетки; 4—подогреватель; 5—цилиндрический вывод катода

Рис. 8.4. Конструкции мощных генераторных ламп с водяным (а, б), воздушным (в, д) и пароводяным (г, е) охлаждением анода

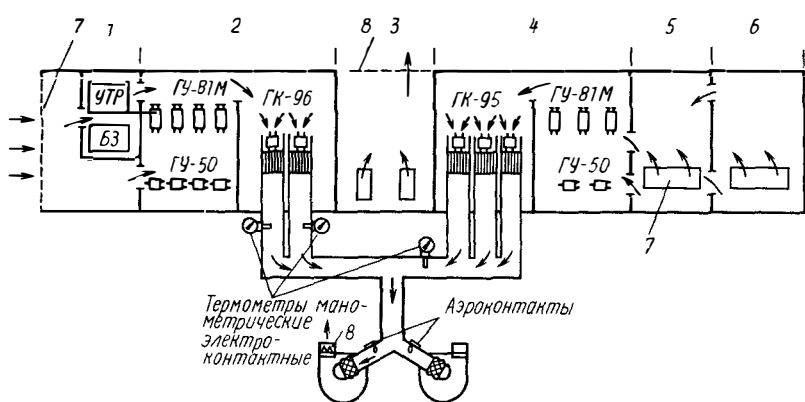


Рис. 8.6. Схема воздушного охлаждения передатчика широковещательной станции: 1 — шкаф выпрямителя; 2 — шкаф НЧ-каскадов; 3 — шкаф питания и управления; 4 — шкаф ВЧ-каскадов; 5, 6 — шкафы основной и дополнительной контурной системы; 7 — воздухозаборник; 8 — выброс горячего воздуха; УТР — блок управления тиристорным регулятором; БЗ — блок защиты

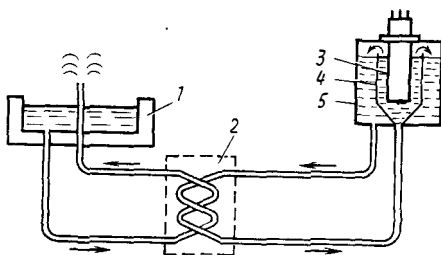


Рис. 8.7. Упрощенная схема принудительного водного охлаждения генераторных ламп широковещательного передатчика: 1 — бассейн с водой; 2 — теплообменник; 3 — анод лампы; 4 — внутренний бак; 5 — наружный бак

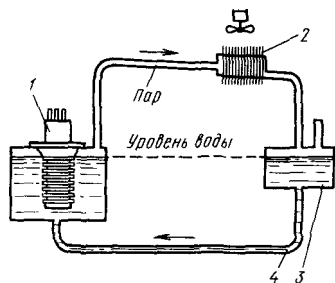


Рис. 8.8. Упрощенная схема испарительного охлаждения генераторных ламп: 1 — лампа; 2 — конденсатор паров воды; 3 — бак контроля уровня воды; 4 — водяной коллектор

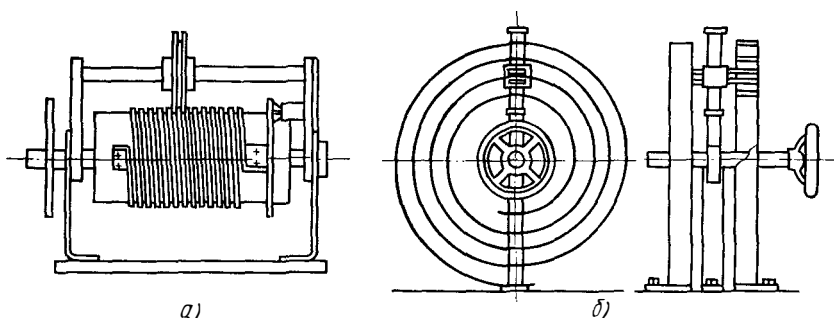


Рис. 8.9. Конструкции катушек индуктивности с плавной регулировкой а — цилиндрическая на фарфоровом каркасе; б — плоскоспиральная

Большие габариты имеют и другие элементы РПДУ: резонаторы, переключатели, резисторы. Все они размещаются в шкафах на керамических изоляторах (см. рис. 8.10) с зазорами между токоведущими частями, равными примерно 1 см на киловольт приложенного напряжения. Обязательным условием является устранение острых кромок металлических токонесущих деталей. На изоляторах располагаются и баки, в которые погружены аноды генераторных ламп. Наличие мощных узлов не исключает

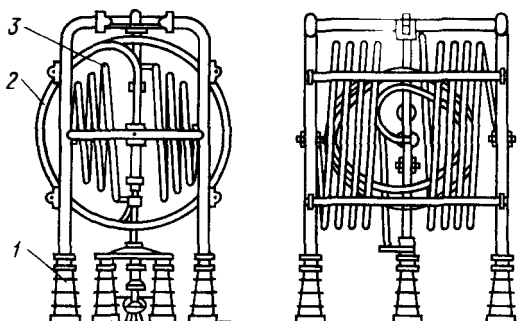


Рис. 8.10. Конструкция вариометра:
1 — высоковольтные изоляторы; 2 — неподвижная катушка индуктивности; 3 — подвижная катушка индуктивности

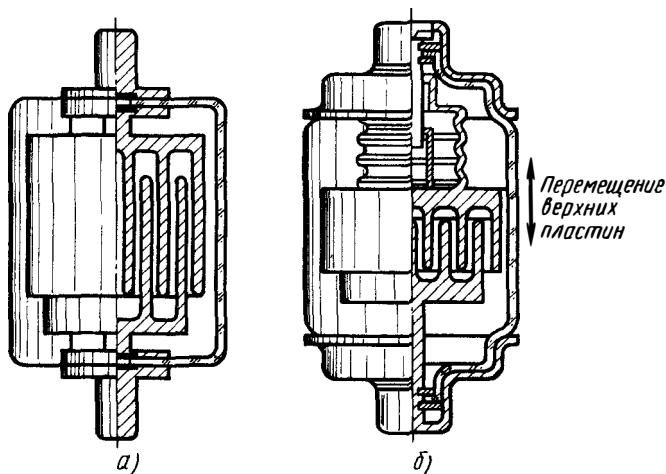


Рис. 8.11. Конструкция вакуумных конденсаторов постоянной (а) и переменной (б) емкости

использования узлов в микроэлектронном исполнении (усилителей, схем автоматики, маломощных блоков питания, узлов управления электромеханическими устройствами памяти и т. д.). Каркасы шкафов выполнены из сварных стальных уголков, стенки — из стальных листов, прикрепленных винтовыми соединениями или сваркой. Это обеспечивает электробезопасность и экранирование. Для исключения поражения операторов высоким напряжением дверцы шкафов имеют блокировочные контакты для отключения питания при открывании.

Размеры стоек, шкафов и блоков студийной телевизионной аппаратуры стандартизованы. Шаг расположения шкафов (стоек) составляет 550 мм. При меньшей ширине стоек между ними устанавливаются дистанционные прокладки, чтобы шаг размещения оставался равным 550 мм.

При конструировании РПДУ следует учитывать, что они, как правило, выпускаются единично или малыми сериями. Поэтому предусматривается использование универсального оборудования при изготовлении. К специфичным узлам конструкции РПДУ следует отнести довольно большие детали из радиофарфора, а к особенности производства — настройку и регулировку установок с большой мощностью высокочастотных колебаний.

Мини-ЭВМ являются другой большой группой наземных стационарных РЭС. На основе мини-ЭВМ серии «Электроника» и ЭВМ серии СМ строят системы управления технологическим оборудованием, системы автоматизированного проектирования, системы диагностики в медицине и т. д. Наиболее характерными частями конструктивных систем мини-ЭВМ являются шкаф и тумба, выполняемые на основе метрического или дюймового модуля и характеризующиеся тремя размерами: шириной передней панели L , высотой H и глубиной B . Для стойки с модулем в метрической системе $L=522$ мм; $H=1200; 1400; 1600; 1800; 2200$ мм; $B=400; 600; 800$ мм. Ширина передней панели вставляемых в стойку блоков для метрического модуля составляет 480 мм, а для дюймового — 19" (482,6 мм).

Конструктивные варианты стоек мини-ЭВМ приведены на рис. 8.12. Стойка каркасной конструкции, выполненная с использованием тонколистового проката стали толщиной 1,5...1,8 мм или алюминиевого сплава толщиной 2,0...2,5 мм (рис. 8.12, а), имеет сварной каркас, изготовленный из профилированных балок. Боковые проемы каркаса закрывают однотипными крышками с резиновыми уплотнениями по всему периметру. Сверху приваривается крышка, снизу — днище. При размещении в каркасе блоков с лицевыми панелями в передний проем каркаса ввариваются переключки П-образного профиля. Боковые и задние крышки крепят винтами. Для естественной или внутренней принудительной вентиляции в боковых крышках делают вентиляционные отвер-

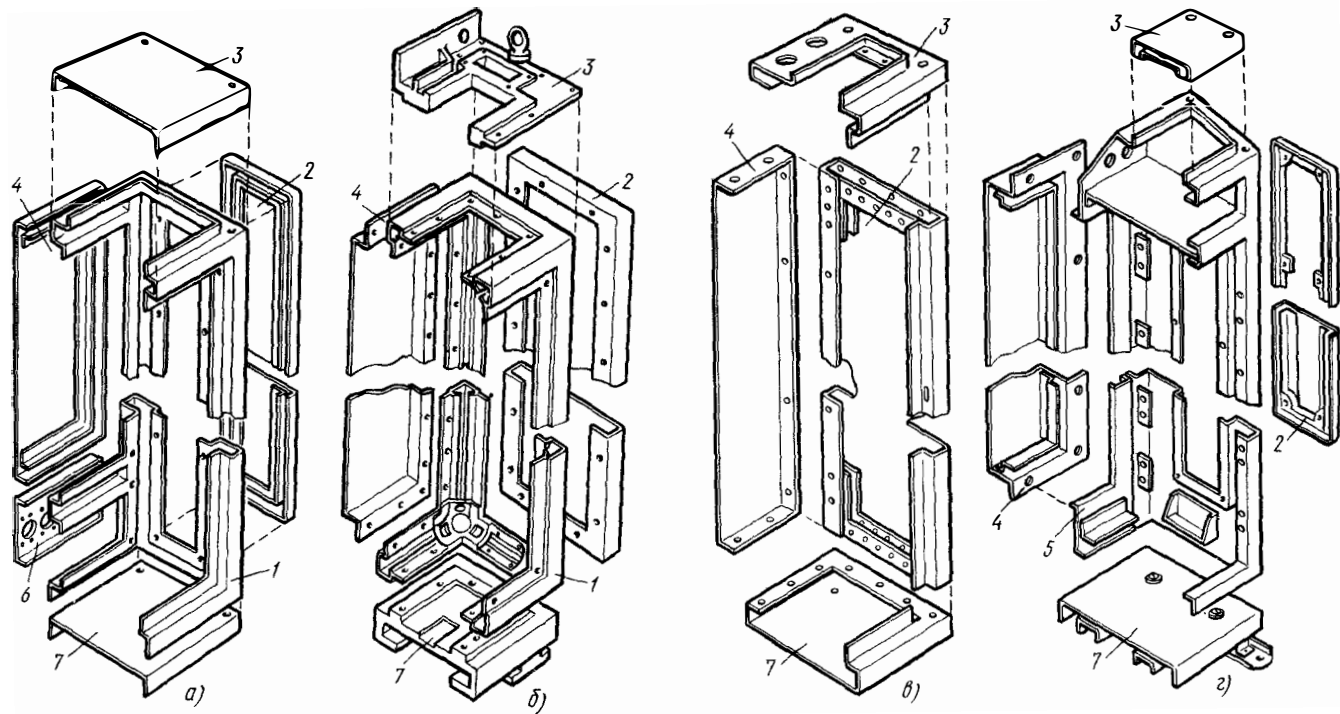


Рис. 8.12. Конструкции стоек мини-ЭВМ:

a — стойка каркасного типа из тонколистового проката; *б* — каркасная стойка из прессованных профилей и литых оснований; *в* — бескаркасная стойка; *г* — стойка с усиленным профилем каркасная; 1 — каркас; 2 — боковая стойка; 3 — крышка; 4 — задняя стенка; 5 — усиление каркаса; 6 — нижняя дверца; 7 — основание

стия; при принудительной централизованной вентиляции устанавливаются присоединительные патрубки.

Стойка второго типа (рис. 8.12, б) выполнена с использованием литых деталей (основание и крышка) и пресованных профилей каркаса, соединенных винтовыми соединениями. Боковые и задние стенки делают из тонколистового алюминиевого сплава.

Бескаркасная стойка (рис. 8.12, в) состоит из боковых и задней стенок, днища и верхней крышки, выполненных из листовой стали толщиной 1,5...2,0 мм. Сборка стойки производится винтовыми соединениями с помощью четырех стяжек П-образного профиля. Стяжки перфорированы отверстиями диаметром 9 мм с шагом 20 мм для установки направляющих блоков. При установке в передний проем дверцы стойка превращается в шкаф.

Стойка четвертого типа (рис. 8.12, г) имеет сварную конструкцию и предназначена для жестких условий эксплуатации во влажной и брызгонесущей среде. Детали изготовлены из тонколистового проката алюминиевого сплава толщиной 2,0...2,5 мм. Заднюю стенку при необходимости делают съемной и крепят винтами, прижимая брызгозащитное уплотнение. Вид стоек в плане представлен на рис. 8.13.

Стойки всех четырех типов предназначены для наземных РЭС; они обладают высокой технологичностью конструкции, так как собираются из профилей и имеют малую материалоемкость благодаря использованию проката, литья и минимальной обра-

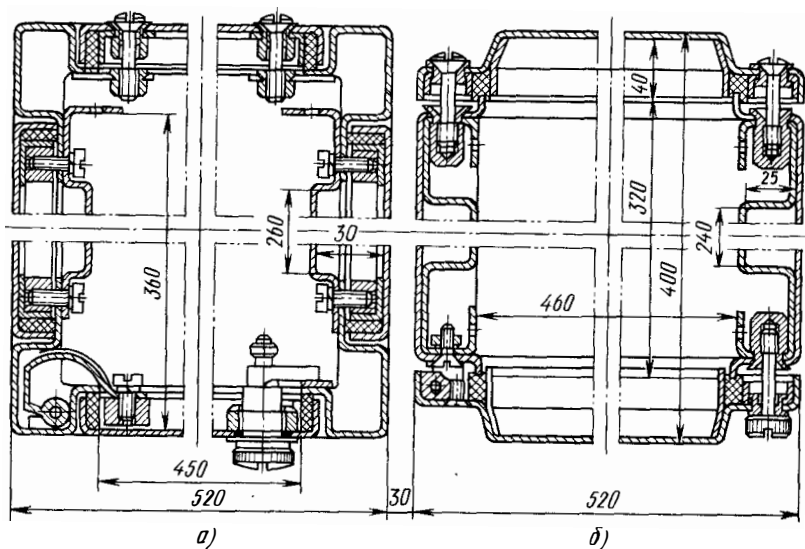


Рис. 8.13. Конструкции стоек (вид в плане):

а — брызгозащитное исполнение, базовый каркас; б — бескаркасная стойка водозащитного исполнения

ботке со снятием стружки. Стойки первого и четвертого видов могут быть использованы в транспортируемых РЭС; они обладают повышенной прочностью и жесткостью благодаря сварному каркасу, а резиновые прокладки крышек обеспечивают защиту от брызг. Все конструкции обеспечивают хорошее экранирование и возможность теплоотвода за счет естественной или принудительной воздушной конвекции. Стойки второго и третьего типов имеют более низкую прочность из-за наличия винтовых соединений, поэтому они используются для стационарной аппаратуры, однако стоимость сборки таких стоек меньше. В стойки третьего типа можно устанавливать блоки различной высоты, что удобно при модернизации устройства. Спецификой стоек четвертого типа является

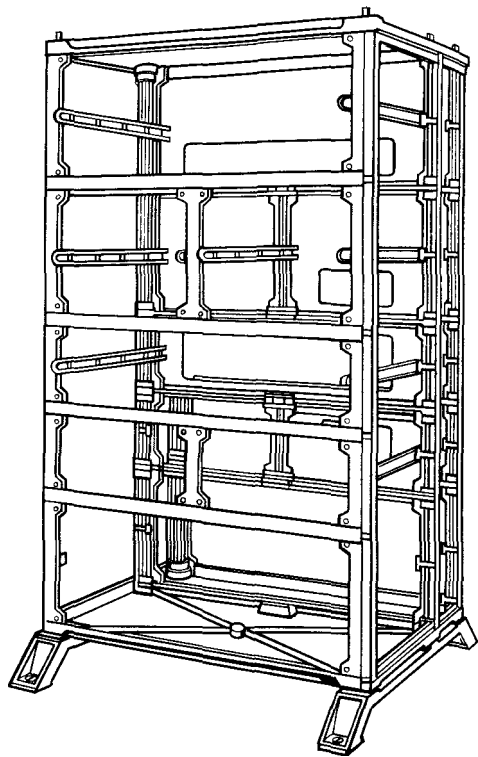


Рис. 8.14. Конструкция стойки из литых элементов

наличие сверху дополнительного каркаса для размещения соединителей межстоечных связей и дополнительных профилей каркаса для увеличения механической прочности.

Кроме приведенных конструкций известны также каркасы стоек стационарных РЭС, собранные путем свинчивания литых деталей (рис. 8.14).

Кроме стоек в состав мини-ЭВМ входят, как правило, пульты. Варианты конструкции пультов представлены на рис. 8.15. Пульты могут иметь панели управления прямоугольной или треугольной формы. Последние позволяют компоновать несколько пультов по дуге вокруг оператора. В таблицах на рисунке приведены линейные и угловые размеры для вариантов исполнения пультов.

Размеры стойки и тумбы для мини-ЭВМ при использовании дюймового модуля приведены на рис. 8.16 и 8.17. Высота стойки и тумбы H пропорциональна модулю $U = 1,75'' = 44,45$ мм. Размер B для стойки и тумбы равен 600 мм, а для стола — 800 мм.

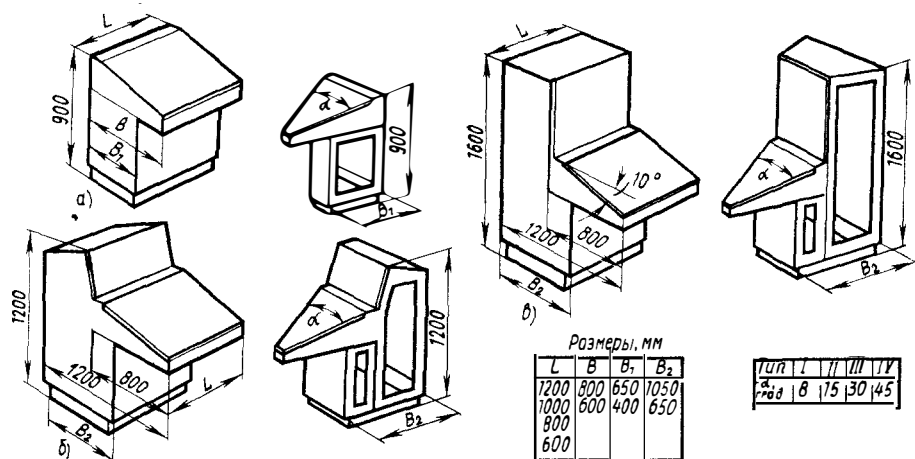


Рис. 8.15. Конструкции секций и угловых вставок для пультов: а — низких, б — средней высоты; в — высоких

Иногда в качестве модуля при построении мини-ЭВМ выступает тумба, имеющая размеры 550 × 590 × 600 мм. Размеры стоек и шкафов получаются при расположении вертикально друг над другом нескольких тумб. Если две тумбы соединить столешницей, можно получить пульт. Предусмотрена возможность увеличения размера стойки с 550 до 600, 700, 800, 900, 1000 мм. Использование дюймового модуля обусловлено тем, что мини-ЭВМ могут входить в состав технологического оборудования, поставляемого на экспорт (например, в состав станков с ЧПУ и робототехнических комплексов).

Универсальные ЭВМ — это машины серии ЕС, БЭСМ-6, «Эльбрус» и др., обладающие большим быстродействием, сложной структурой, развитой системой памяти и периферийных устройств. В настоящее время ЕС ЭВМ являются наиболее массовой и наиболее совершенной вычислительной системой в странах — членах СЭВ, с единым математическим обеспечением, построенной на основе единой элементной и конструкторско-технологической базы. Технические средства ЕС ЭВМ разрабатывались на основе единого подхода, всесторонней стандартизации программных, схемных и конструкторско-технологических решений, использования передовых достижений в области конструирования РЭС. В качестве элементной базы выбраны ИС серий К155, К531 (ТТЛ), 500, К1500 (ЭСЛ). За исключением серии К155, это ИС повышенных быстродействия и степени интеграции. К конструктивно-технологическим особенностям относятся единая конструк-

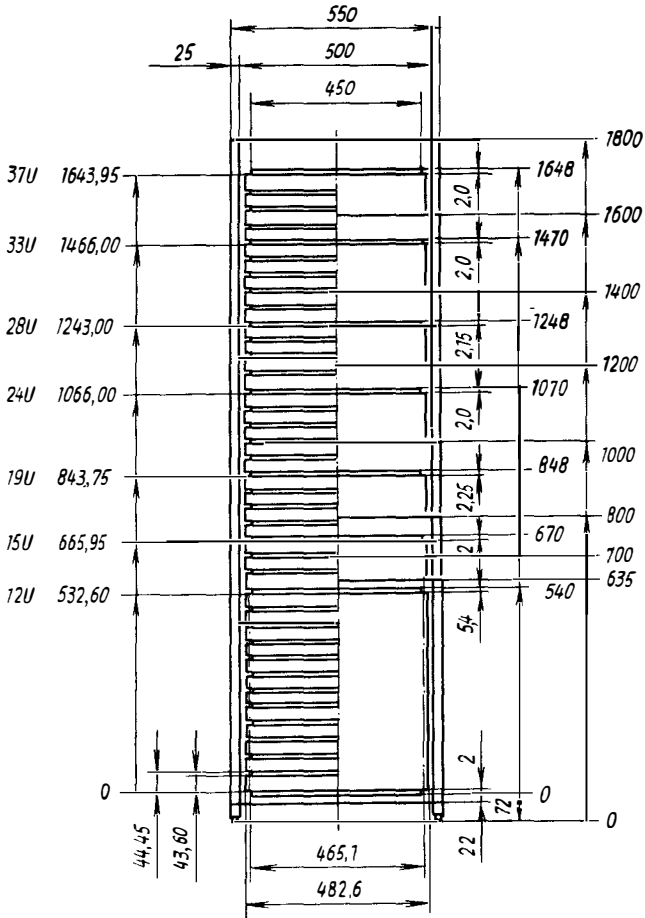


Рис. 8.16. Размеры стойки мини-ЭВМ с модулем в дюймовой системе

торская иерархия ЕС ЭВМ, широкое использование многослойного печатного монтажа, унификация соединителей и кабельных изделий (плоских кабелей, перевитых пар и троек), применение полупроводниковой памяти и унифицированных источников питания. Элементная и конструктивно-технологическая база ЭВМ серии ЕС, а также методы построения и электронного конструирования ее технических средств стали, по существу, универсальными для построения современных электронно-вычислительных устройств и цифровых РЭС различного назначения.

Высокая стоимость и большой срок эксплуатации требуют обеспечения ремонтпригодности, которая в ЕС ЭВМ достигается за счет развитой конструкторской иерархии (рис. 8.18—8.20),

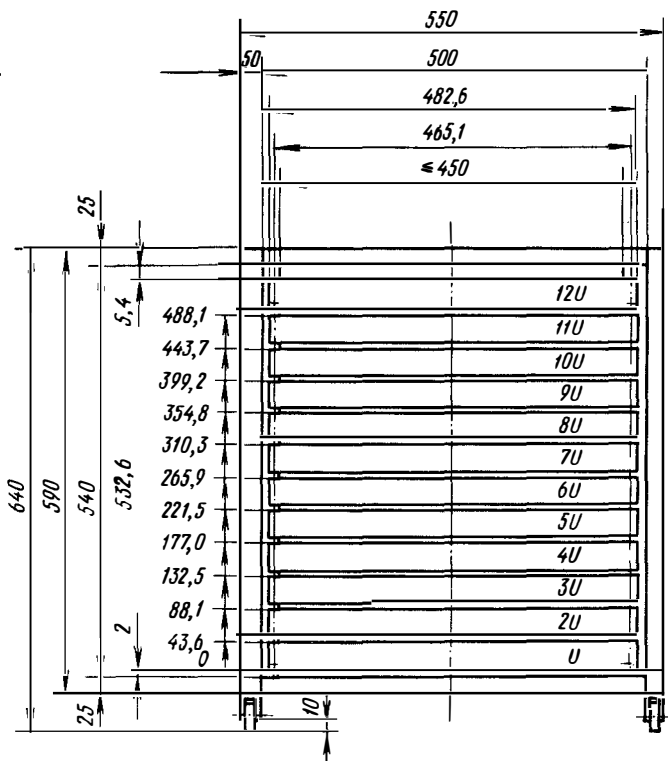


Рис. 8.17. Размеры тумбы мини-ЭВМ с модулем в дюймовой системе

включающей следующие конструктивные уровни: 1) РЭМ0 — электрорадиоэлементы (ИС, микросборки дискретные элементы); 2) РЭМ1 — типовой элемент замены (см. рис. В.10); 3) РЭМ2 — панель и рама (рис. 8.18); 4) РЭМ3 — стойка (рис. 8.19), пульт.

Размеры ТЭЗ 140×150 мм (ДПП, МПП) или 350×150 мм (МПП). Размер панели $386 \times 358 \times 240$ мм. Одна рама объединяет шесть панелей. Размер стойки ЕС ЭВМ $L = 1200 \pm 100K$, мм; $H = 1600$ мм; $B = 800 \pm 50K$, мм; где $K = 1, 2, 3, \dots$. Тумба выполняется высотой $H = 1050$ или 725 мм. Панель объединяет до 40 ТЭЗ; стойка состоит из трех рам, на каждой из которых может быть установлено шесть панелей. Крайние рамы (рис. 8.19) могут откидываться, открывая доступ к средней раме.

Минимизация задержек и защита от помех в ЕС ЭВМ выполнены организацией электрических связей при электронном конструировании. Связи в ТЭЗ выполняются либо печатным монтажом с контролируемым волновым сопротивлением, либо перевитыми парами (тройками) объемных проводников. ТЭЗ выполняется на основе ДПП или МПП (от 8 до 12 слоев). ТЭЗ размером 150×330 мм на ДПП объединяет до 24 ИС, на МПП — до

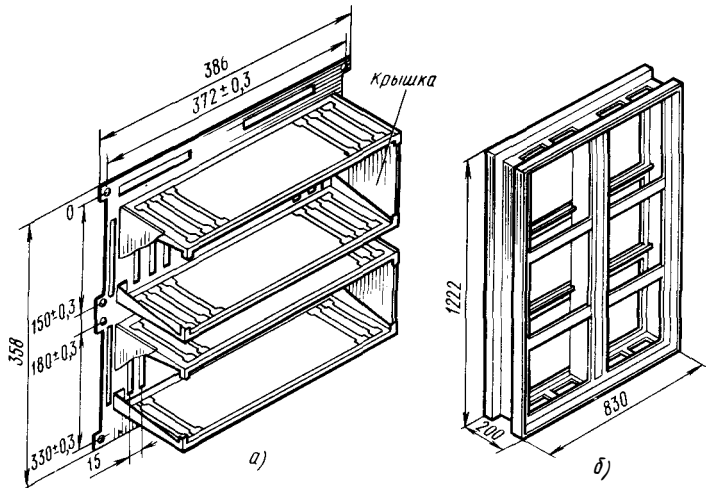


Рис. 8.18. Несущие конструкции ЕС ЭВМ:

а — панель для размещения ТЭЗ; б — рама для размещения панелей

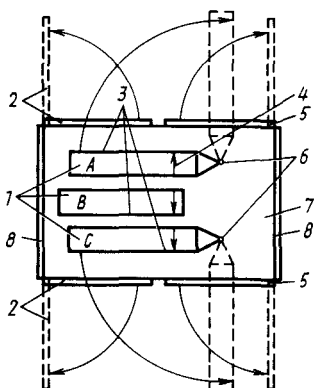
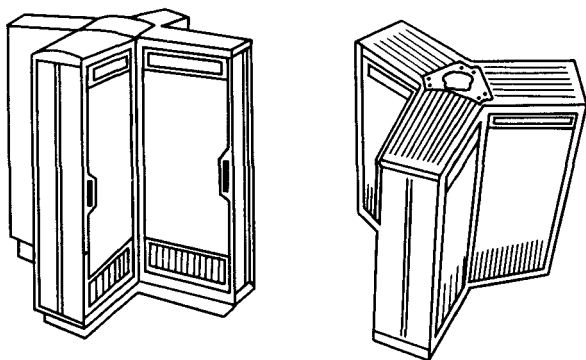


Рис. 8.19. Типовая стойка ЕС ЭВМ (вид сверху):

1 — рамы; 2 — откидывающиеся (с возможностью съема) дверцы; 3 — монтажная сторона рамы; 4 — направление установки ТЭЗ в рамах; 5 — оси подвески дверок; 6 — оси подвески подвижных рам; 7 — пространство для размещения кабельных жгутов; 8 — съемные торцевые щиты

Рис. 8.20. Комплекс стоек



128 ИС. Используются соединители типа СНП-34-135. Панели монтируются с применением печатных плат и контактирования накруткой. Платы запаиваются волной припоя.

Ввиду нежестких условий эксплуатации ЕС ЭВМ для защиты от воздействия влаги используют монолитные полимерные или полые металлокерамические корпуса с двумя рядами выводов. Обеспечение теплового режима осуществляется с помощью принудительной воздушной конвекции. Восемь осевых вентиляторов, расположенных в нижней и верхней частях каждой крайней рамы, обеспечивают расход продуваемого воздуха $2400 \text{ м}^3/\text{ч}$, плотность отводимого теплового потока до $1 \text{ Вт}/\text{см}^2$, температуру корпуса ИС не более 70°С .

Особенностью конструкции пультов ЕС ЭВМ является выполнение требований эргономики при размещении элементов индикации и управления. Несущие конструкции выполнены с использованием высокопроизводительных методов (штамповка, сварка, литье под давлением). Стальные крышки (стенки) шкафов являются хорошими экранами от внешних электромагнитных полей.

Для сокращения длины линий связи (задержек распространения сигналов) в конструкции шкафов сверхбыстродействующих ЭВМ (например, «Эльбрус») предусматривается контактирование не только с задней стороны ячеек, но и с передней (рис. 8.21). В этом случае с лицевой стороны шкафа предусматриваются специальные каналы («кабельгоны») для укладки жгутов с вилками накидных соединителей на концах. Другим фактором, ограничивающим быстродействие ЭВМ, является тепловыделение элементов (которое тем больше, чем выше быстродействие). Это объясняется тем, что быстродействие зависит от постоянной времени, пропорциональной произведению RC (R — выходное сопротивление схемы, C — суммарная емкость цепи). Величину C (входную и выходную емкости схем, емкость линии связи, паразитную емкость) существенно уменьшить не представляется возможным. Поэтому

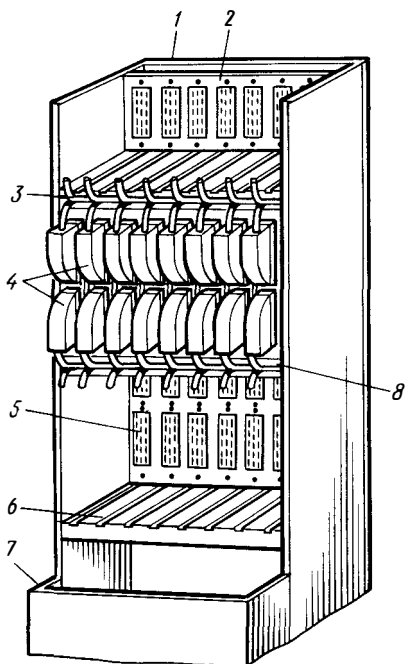


Рис. 8.21. Стойка быстродействующей стационарной ЭВМ:

1 — задняя крышка; 2 — задняя панель; 3 — кабели с лицевой стороны стойки; 4 — вилки накидных соединителей для подключения к платам с лицевой стороны стойки; 5 — розетки соединителей для подключения плат; 6 — направляющие с разъемными теплопереходами; 7 — передняя крышка; 8 — канал для укладки жгутов («кабельгон»)

стремятся уменьшить выходное сопротивление схем, а это ведет к увеличению потребляемой энергии и тепловыделения схемы. Стремлением уменьшить задержку сигналов в линии связи обусловлено уменьшение размеров ИС и сближение их. Однако при этом появляются затруднения с отводом теплоты. Уменьшение энергопотребления элементов для облегчения теплового режима приводит к уменьшению быстродействия, к такому же эффекту приводит попытка разнести элементы (увеличивается задержка сигналов в линиях связи). Всем этим объясняется тот факт, что за последние 20...25 лет задержка сигналов в элементах уменьшилась в 10 раз (с 10 до 1 нс), а другие технико-экономические параметры (степень интеграции, потребляемая мощность, стоимость, надежность) изменились в $10^2 \dots 10^5$ раз.

Использование быстродействующих логических элементов даже небольшой степени интеграции может потребовать интенсивности теплоотвода с помощью жидкостной системы охлаждения. Так, ЭВМ «Gray-1» (США), выпускавшаяся с 1976 г., построенная на ЭСЛ ИС малой степени интеграции (16 логических элементов, плоский керамический корпус) и содержащая около 65 000 корпусов, выделяет в виде теплоты около 95 кВт. Интегральные схемы расположены на теплоотводящих шинах (плата размером 152×203 мм), которые с помощью разъемного клинового контакта (рис. 8.22) соединены с боковыми стойками, охлаждаемыми фреоном до температуры $18,5^\circ\text{C}$. Температура шин на краю платы 25°C , а температура корпусов ИС 65°C . В других быстродействующих ЭВМ используют разъемные тепловые переходы (рис. 8.23), допускающие оперативный демонтаж плат в случае выхода их из строя. Низкое тепловое сопротивление разъемного теплового контакта при умеренных требованиях к точности изготовления достигается за счет большой суммарной площади многореберного теплового перехода.

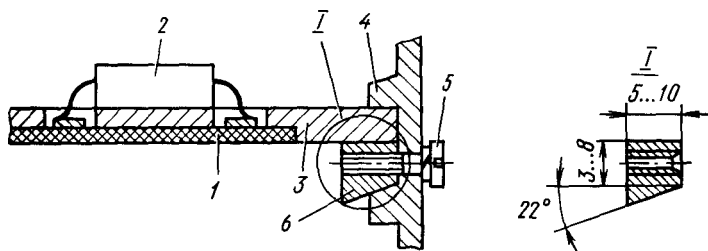
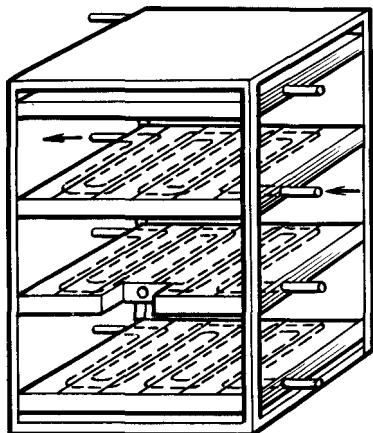
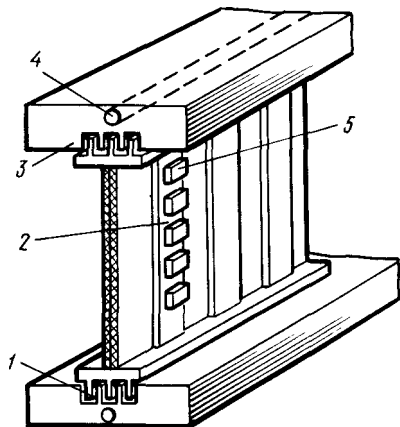


Рис. 8.22. Конструкция теплового контакта, реализуемого с помощью односкосного клина:

1 — печатная плата; 2 — ИС; 3 — теплоотводящая шина; 4 — корпус стойки (блока); 5 — винт; 6 — клин



а)



б)

Рис. 8.23. Стойка быстродействующей ЭВМ с водяным охлаждением (а), плата с разъемными теплопереходами (б):

1—многозвенный разъемный теплопереход; 2—теплоотводящая шина; 3—корпус ЭВМ; 4—канал для охлаждающей жидкости; 5—ИС

Фирмой «IBM» (США) для ЭВМ 3081 (рис. 8.24) разработаны модули, охлаждаемые жидкостью. При этом теплота от установленных на керамических подложках кристаллов отводится к корпусу модуля через подпружиненные стержни и через гелий, заполняющий модуль. Модули расположены на печатной плате, имеющей 20 слоев (из них 12 для подачи питания) и размеры 610×711 мм. ЭВМ потребляет мощность около 1400 Вт при токе 450 А. Недостатком конструкции является наличие подпружиненных теплоотводов. Усилие пружин для обеспечения низкого теплового сопротивления должно быть довольно велико. Это требует массивного и прочного корпуса и создает нежелательные напряжения в кремниевом кристалле. Наличие гелия в тепловом зазоре между стержнем и кристаллом незначительно снижает тепловое сопротивление в месте контакта. Гораздо более эффективен теплоотвод от кристаллов, установленных на проходящие через плату выступы основания (рис. 3.22, б). Однако если устанавливаются кристаллы, находящиеся под различным потенциалом, то между кристаллом и основанием должен быть расположен тонкий слой диэлектрика, который практически не ухудшает теплоотвода.

Несмотря на малые габариты самой ЭВМ, система жидкостного охлаждения может занимать такой же или даже больший объем, чем сама ЭВМ. Поэтому в некоторых японских фирмах

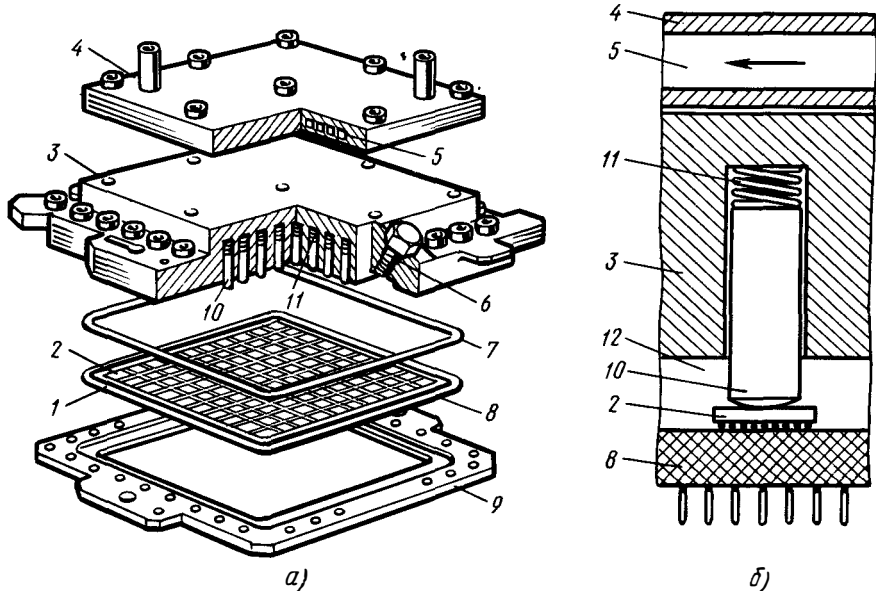


Рис. 8.24. Конструкция герметичного модуля стационарной быстродействующей ЭВМ фирмы «IBM»:

a—теплоотводящий модуль; *б*—схема теплоотвода от кристалла через металлический плунжер и заполненный гелием внутренний объем; 1—металлическое основание подложки; 2—кристалл ИС; 3—крышка корпуса ЭВМ; 4—панель охлаждения; 5—каналы для воды; 6—пробка отверстия для заполнения гелием; 7—уплотнительная прокладка; 8—керамическая подложка; 9—основание корпуса ЭВМ; 10—плунжер; 11—пружина; 12—гелий

для охлаждения ЭВМ используют многорреберные радиаторы, установленные на ИС и находящиеся в потоке охлаждающего воздуха. Пример шкафа ЭВМ, имеющего воздушно-водяное охлаждение, приведен на рис. 8.25.

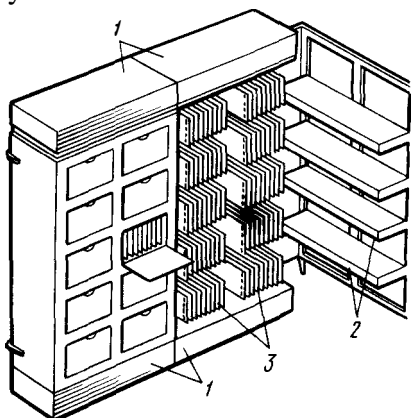


Рис. 8.25. Конструкция стойки с воздушно-водяным охлаждением: 1—воздуховоды; 2—теплообменники с проточной водой; 3—ячейки

Несмотря на то что мини-ЭВМ пока являются менее быстродействующими, чем универсальные ЭВМ, в связи с тенденцией увеличения их быстродействия («Электроника-79», «Электроника-82» и др.) способы уменьшения задержек и обеспечения теплового режима, разработанные для универсальных ЭВМ, могут быть использованы и в конструкции мини-ЭВМ, в том числе входящих в РЭС технологических установок.

Конструкция РЭС технологических установок. Использование стационарных РЭС в технологических установках позволяет осуществить программное управление, повысить точность и про-

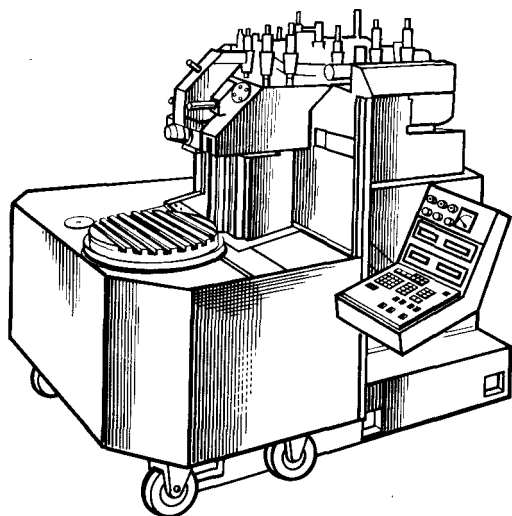


Рис. 8.26. Расположение устройства числового программного управления на фрезерном станке

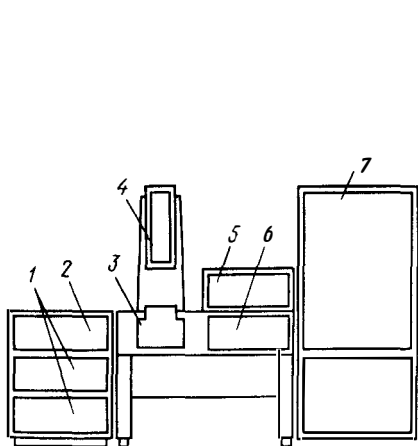


Рис. 8.27. Компонка лазерной установки «Луч-3»:

1—блок питания лазерной головки; 2—панель управления блоками питания; 3—координатный стол; 4—лазерная головка; 5—пульт управления; 6—выдвижной блок; 7—стойка программного управления

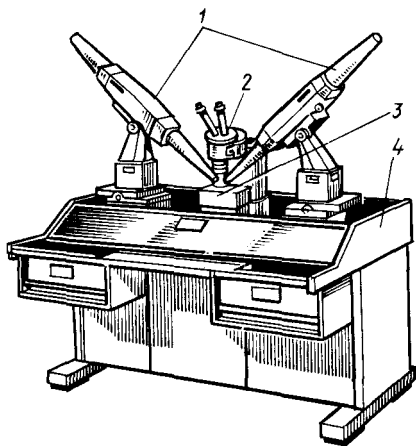


Рис. 8.28. Компонка лазерной двух-лучевой установки:

1—лазерные головки; 2—бинокулярный микроскоп; 3—координатный стол; 4—рабочий стол с электронными блоками управления

изводительность технологических автоматов: роботов, манипуляторов, контрольно-испытательного оборудования, робототехнических комплексов, микрофотонаборных установок, станков с ЧПУ и т. д. Конструкция этих РЭС должна отвечать ряду требований: совместимости с технологической установкой, возможности компоновки в технологическую линейку, эстетичности и эргономичности, экономичности.

В ряде случаев РЭС встраивается непосредственно в технологическую установку (рис. 8.26—8.28). В этом случае необходимо учитывать форму, размеры и взаимное расположение частей технологической установки. Устройство ЧПУ (рис. 8.26) для фрезерного станка, в конструкции которого не предусмотрено места для размещения РЭС, смонтировано в виде выносного пульта, прикрепленного сбоку к станине станка.

При компоновке лазерных технологических установок (рис. 8.27, 8.28) основное внимание направлено на целостность композиции (минимум отвлечения оператора) и эстетичность всей установки. Это осложнялось сложностью формы конструкции лазеров, координатного стола и наличием различных РЭС

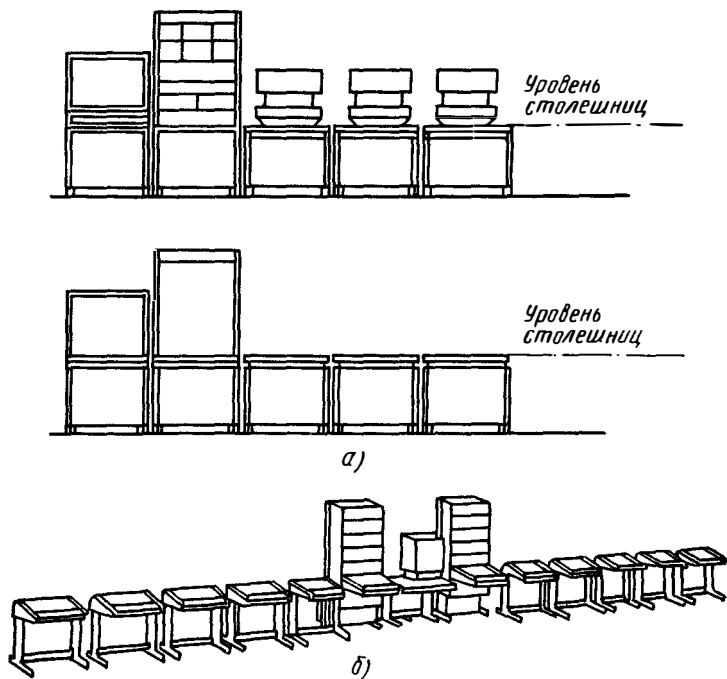


Рис. 8.29. Варианты компоновки измерительного комплекса (а) и эскиз композиционного решения (б)

(программного устройства, блоков питания, управления, устройств охлаждения лазера и др.). Целостность формы достигается лаконичностью декоративных колпаков и обеспечением композиционной устойчивости всей установки путем визуального уравнивания площадей и объемов частей установки относительно оси симметрии. Кроме того, учитываются требования техники безопасности.

Особое внимание уделяется проработке компоновки технологической линейки (рис. 8.29), которая обычно состоит из ряда секций (сборочных, монтажных, измерительных и т. д.). В состав технологической линейки могут входить пылезащитные камеры (скафандры) (рис. 8.30), монтажные или сборочные столы (рис. 8.31), стойки РЭС с блоками (рис. 8.32). При компоновке технологических линеек учитываются номенклатура выполняемых операций и их последовательность, возрастные, половые и национальные (размеры частей тела) особенности операторов. Размещение РЭС среди других технологических установок линейки (см. рис. 8.29) определяется порядком следования операций. Особое внимание уделяется обеспечению требований эргономики и технической эстетики: единству стиля всех секций, удобству работы и обслуживания при ремонте. Это достигается выбором формы, учетом пропорций и масштаба отдельных частей, их цветовым оформлением. При расположении панелей управления

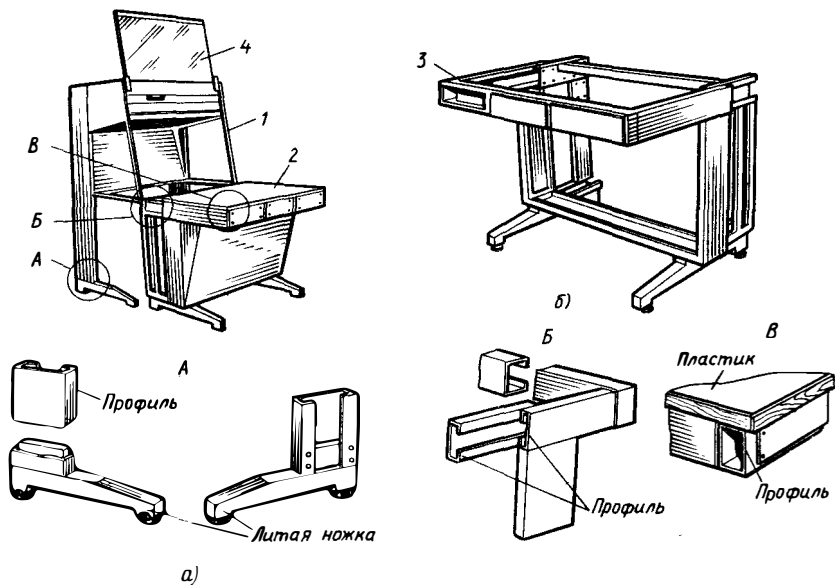


Рис. 8.30. Вариант компоновки стола с пылезащитной камерой (а) и конструкция основания (б):

1 — камера; 2 — стол; 3 — основание; 4 — прозрачная поднимающаяся стенка

принимаются во внимание удобство доступа к элементам управления и индикации, удобство обслуживания, ремонта, простота изменения программы работы.

Если в составе оборудования технологической линейки имеются пылезащитные камеры, то они снабжаются приточной или вытяжной вентиляцией. Вытяжная вентиляция осуществляется от рабочих мест электромонтажников и мест, где ведутся работы с применением токсичных веществ. Для снижения трудоемкости изготовления скафандров рабочие столы и стойки РЭС (см. рис. 8.30—8.32) собираются из типового проката, прессованных,

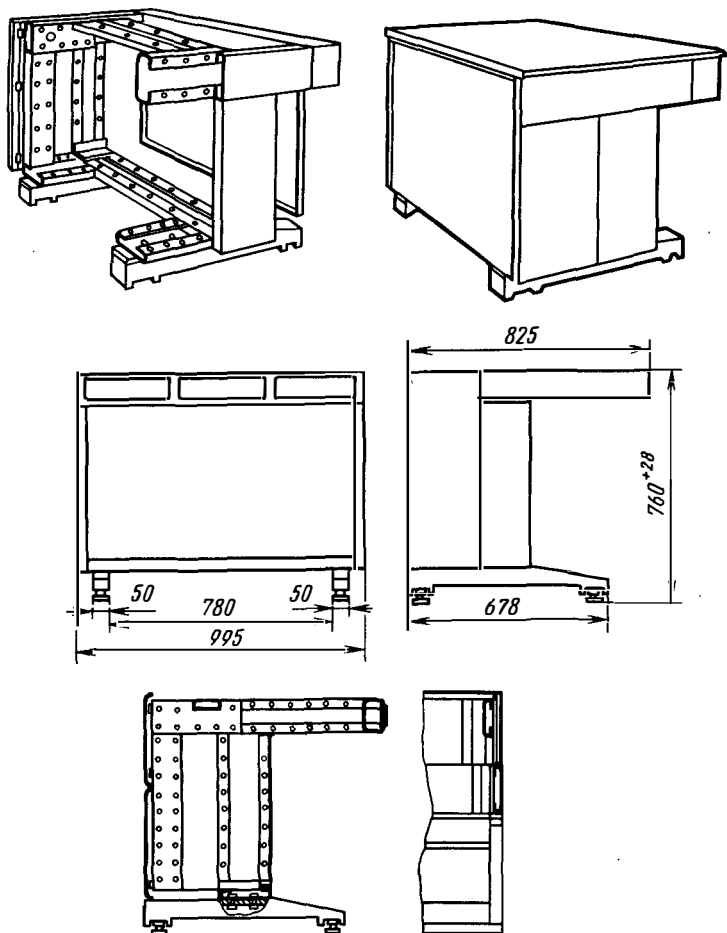


Рис. 8.31. Каркасы монтажно-сборочного оборудования, выполненные из гнутого С-образного профиля

литых или штампованных профилей свинчиванием, реже сваркой. При конструировании РЭС технологического оборудования необходимо учитывать возможное воздействие дестабилизирующих факторов: вибраций, ударов, повышенной и пониженной (в лазерных установках, охлаждаемых жидким азотом) температур, паров масел и агрессивных жидкостей или газов, высокого напряжения и т. д.

РЭС кабельной электросвязи (электронных АТС). Для лучшего

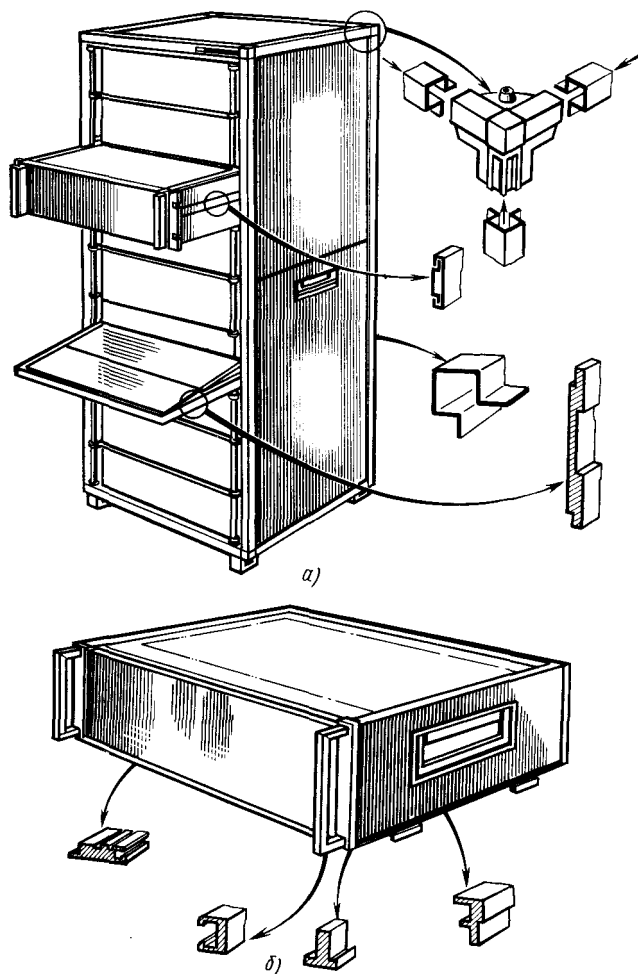


Рис. 8.32. Конструкция стойки управления технологической установкой:
а — корпус стойки; б — корпус блока

использования объема помещений используются стойки повышенной высоты и уменьшенной глубины. Они могут быть установлены в один или два ряда («спина к спине»). Сверху стойки имеют кабельные каналы. Высота стойки не более 2600 мм; ширина 120, 160, 600 мм; ширина в конце ряда 225 или 450 мм (допускается эту часть ряда собирать из трех стоек шириной 150 мм), глубина 225 и 450 мм (для стоек шириной 120 и 150 мм допускается глубина 240 мм). При двухрядном расположении стоек общая глубина не должна превышать 520 мм с учетом выступающих элементов (органов управления и контроля, крышек, радиаторов и т. д.). Платы располагаются в стойках рядами. Шаг размещения плат и блоков по ширине кратен 15 мм. Ячейки располагаются в восемь рядов по высоте стойки. Некоторые блоки (питания, микроЭВМ, телетайп, магнитофон и т. д.) могут занимать несколько позиций с шагом, кратным 15 мм. Один из типоразмеров ячеек 323 × 233 мм.

Меры по обеспечению технологичности конструкции стационарных РЭС сводятся к использованию типовых конструкций, их выбору с учетом серийности РЭС. Серийные конструкции РЭС должны быть приспособлены к изготовлению высокопроизводительными методами: сборка плат с использованием роботов и манипуляторов, автоматизированные методы электромонтажа (контактирование накруткой, пайкой волной припоя, автоматизированный контроль и т. д.). Увеличению технологичности служит обеспечение легкого доступа к узлам и элементам при обслуживании и ремонте.

§ 8.3. Особенности конструкций наземных транспортируемых РЭС

Транспортируемые РЭС устанавливаются на автомобильном, гусеничном, водном и железнодорожном транспорте. Водный транспорт делится на речные и морские суда гражданского флота (пассажирские, грузовые, рыболовные, ледокольные, исследовательские и т. д.) и корабли военно-морского флота (надводные корабли, подводные лодки). Транспортировке подвергаются РЭС различного назначения: связные, навигационные, радиолокационные, контрольно-испытательные, измерительные и т. д. Разнообразие объектов, установки и назначения транспортируемых РЭС обуславливает большое разнообразие конструкций.

При разработке конструкции транспортируемых РЭС прежде всего надо учитывать габариты и форму помещения (кузова, отсека) объекта установки РЭС. На рис. 8.33 показано размещение РЭС в автофургоне, на рис. 8.34 — в фургоне на гусеничном шасси, а на рис. 8.35 — размеры помещения железнодорожного вагона и путевых строений. Отдельные устройства размещаются вдоль передней и боковой стенок автофурунгов, кузовов гусенич-

ных шасси, а в задней стенке обычно имеется дверной проем. Операторы располагаются в центральной части фургона. Аналогично расположение частей РЭС и в отсеке судна (рис. 8.36), хотя объем помещения в этом случае больше и аппаратура электропитания и вентиляция могут быть расположены в отдельном помещении.

Теплоотвод в наземных транспортируемых РЭС обычно осуществляется естественной или принудительной воздушной конвекцией; в РЭС водного транспорта для охлаждения можно использовать забортную воду. При централизованной принудительной вентиляции воздух перед подачей в помещение может очищаться, охлаждаться или подогреваться с использованием кондиционера (рис. 8.37). Особенно актуальна очистка воздуха в случае опасности радиоактивного заражения.

Антенны, размещаемые на транспортных средствах, как правило, выполняются в виде выносных узлов. Антенны значительных габаритов делаются выдвижными (см. рис. 8.33), сборно-разборными (рис. 8.38) или разворачиваемыми с помощью механизмов (см. рис. 7.9), возимыми в сложенном состоянии на отдельном прицепе (см. рис. 7.3). Для ускорения разворачивания используются зонтичные антенны, надувные и т. д. Антенны системы предупреждения столкновений легкового автомобиля для улучшения аэро-

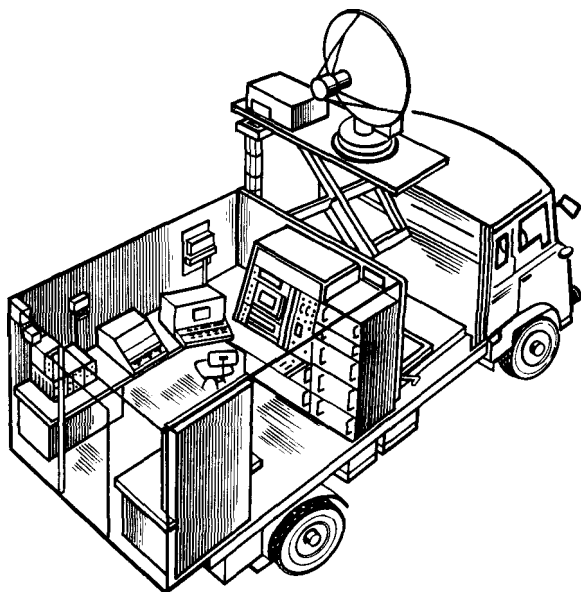


Рис. 8.33. Компоновка подвижной станции радиопротиводействия (США)

динамики выполняются заподлицо с обшивкой кузова (рис. 8.39). Выступающие части антенны на железнодорожном транспорте не должны касаться различных путевых сооружений (тоннелей, платформ, зданий, мостов и т. д., рис. 8.35, б, в).

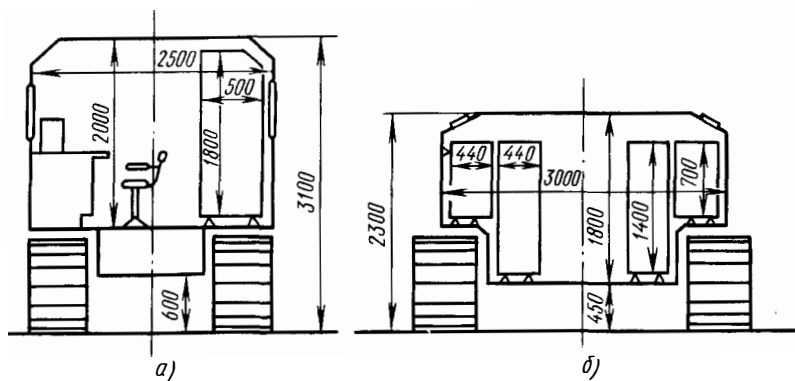
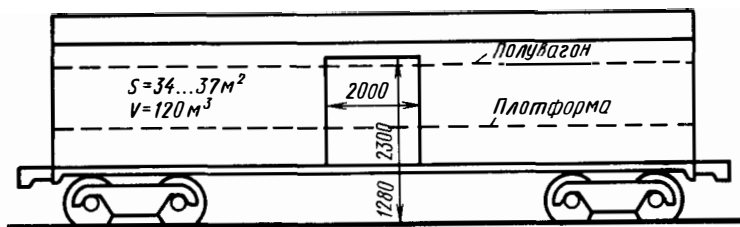


Рис. 8.34. Размещение РЭС в кузове обычной высоты (а) и низком кузове (б) для шасси на гусеничном ходу



а)

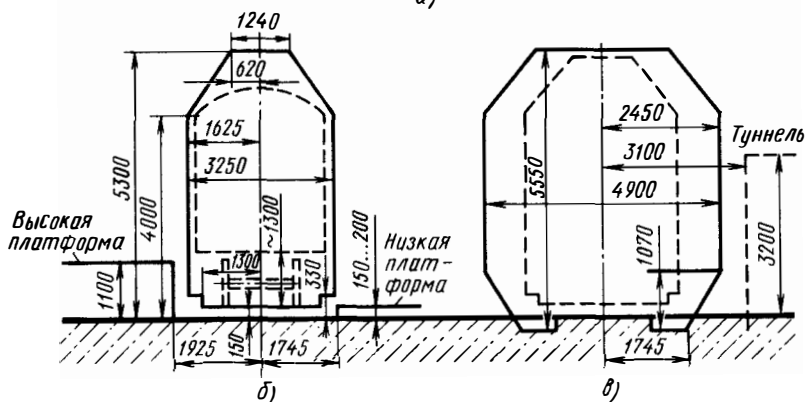


Рис. 8.35. Основные размеры четырехосных железнодорожных платформ, полувагонов, вагонов и дверных проемов в них (а); допустимые габариты подвижного состава железных дорог (б) и габариты расположения строений (в)

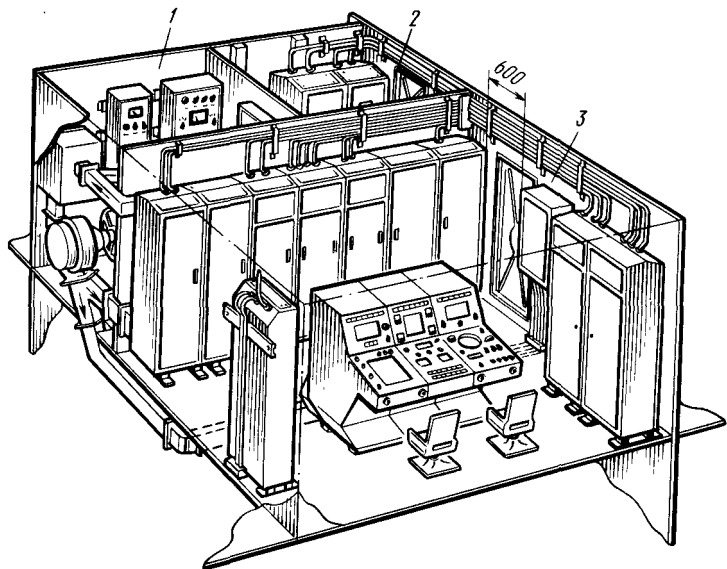


Рис. 8.36. Комплекс РЭС, размещенных в отсеке корабля:

1—вентиляторная и помещение для запасного имущества; 2—генераторная; 3—помещение для размещения радиоэлектронных средств

Транспортируемые РЭС устанавливают и на легковых автомобилях (рис. 8.39, 8.40) для обеспечения безопасности движения и оперативной диагностики неисправности отдельных агрегатов. Спецификой этих РЭС является то, что они размещены по всему автомобилю, а также в местах, подверженных воздействию пыли, вибраций, ударов, паров масел и топлива, высокой температуры. Это требует герметичного, ударовибропрочного и термостойкого исполнения (см. гл. 3—5).

Узлы РЭС, устанавливаемые на буюх (рис. 8.41), размещаются как внутри (электронные блоки, источники электропитания), так и снаружи (антенна, микрофон, телефон, наушники, фонарь, элементы управления). Места выхода из внутреннего объема кабелей, антенн и элементов управления должны тщательно герметизироваться. Корпус буюх должен быть выполнен из материалов, не подверженных коррозии в воде (например, латуни, титана, нержавеющей стали, влагостойкого полимера).

Обычно транспортируемые РЭС выполняют в виде стоек, шкафов и пультов с выдвижными блоками (рис. 8.42) или отдельных блоков в переносном исполнении. Размеры транспортируемых РЭС должны выбираться с учетом размеров дверных проемов и люков, через которые РЭС помещаются внутрь транспортного средства, а допустимая масса отдельных блоков,

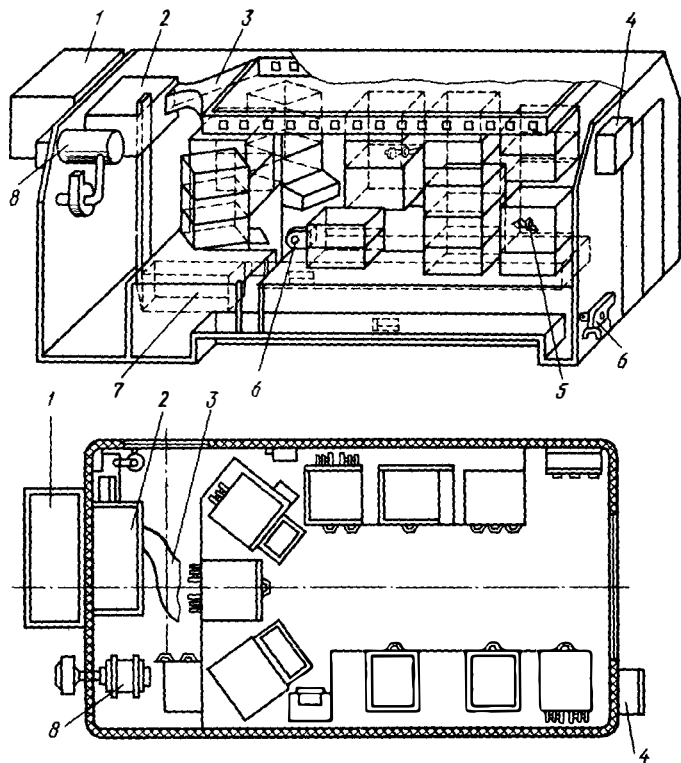


Рис. 8.37. Конструктивно-компоновочная схема системы обеспечения теплового режима РЭС, расположенного в кузове автомашины: 1—кондиционер; 2—воздухонапорный агрегат; 3—воздуховод; 4—осевой вентилятор; 5—маломощные центробежные вентиляторы; 6—нагреватели; 7—отопительная установка; 8—вентиляторная установка

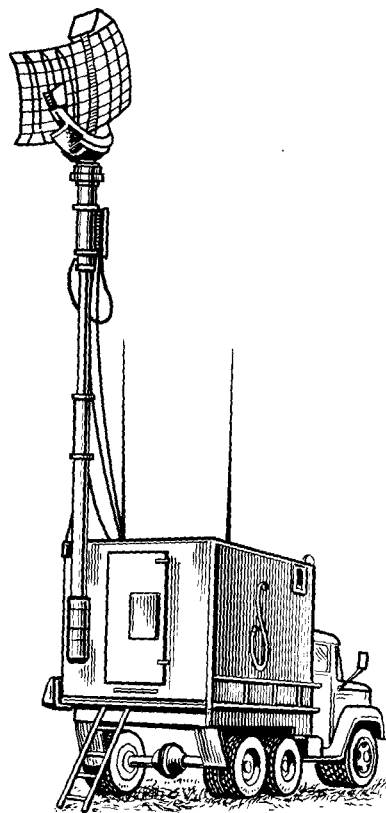


Рис. 8.38. Возимая связная радиостанция, размещаемая в кузове автомашины

щкафов и стоек — с учетом удобства монтажа и демонтажа, а также общей грузоподъемности транспортного средства. Максимальные размеры стоек РЭС, размещаемых внутри транспортного средства через двери, люки и монтажные проемы, составляют $320 \times 590 \times (860...1900)$ мм. Размеры блоков, размещаемых в стойках, пропорциональны размерам модуля 156×221 мм (см. рис. В.1). Масса блоков не более 80 кг, масса стоек 100 кг.

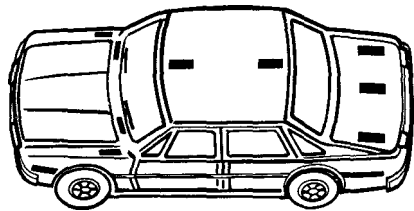


Рис. 8.39. Варианты размещения антенн системы предупреждения столкновений на легковом автомобиле

Общая масса транспортируемых РЭС не должна превышать двух третей грузоподъемности транспортного средства (одна треть остается для операторов и запасного имущества). Кроме размеров объекта установки на характер конструкции транспортируемого РЭС оказывают влияние различные дестабилизирующие факторы (см. группы 3—5 табл. 8.1)—вибрации, удары, линейные ускорения, изменение температуры внешней среды, термоудары, воздействие инея и росы, морского тумана и т. д.

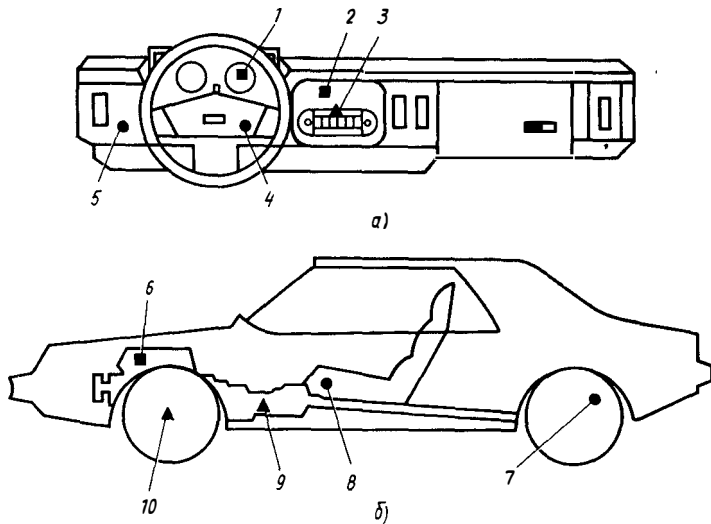


Рис. 8.40. Расположение микропроцессорной системы в автомобиле «Трабант» (ГДР):

а — индикаторы на щитке; б — датчики; 1 — цифровая панель управления; 2 — мультиплексный контроль; 3 — контроль настройки радиоприемника; 4 — контроль воздуха и диагностика; 5 — контроль скорости; 6 — интегрированный контроль двигателя; 7 — профилактическая система; 8 — контроль нагрузки и память; 9 — контроль передачи; 10 — четырехколесный антиблокировочный контроль

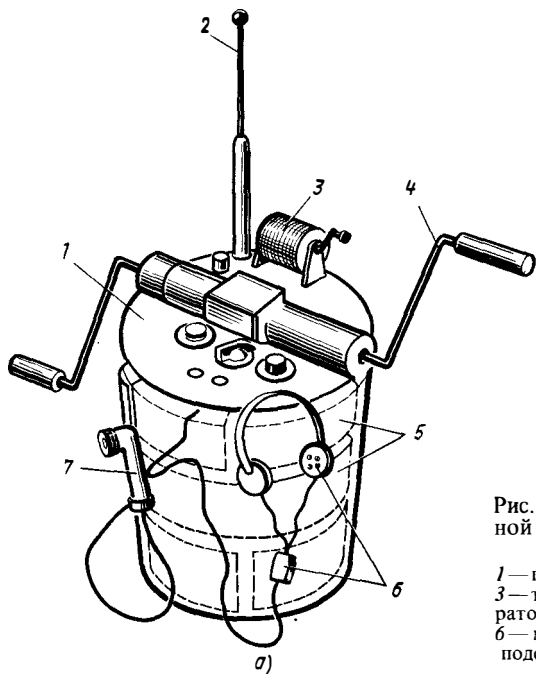


Рис. 8.41. Внешний вид аварийной морской радиостанции (а) и радиобуя (б):
 1—пульт управления; 2—антенна;
 3—трос; 4—привод ручного генератора;
 5—функциональные узлы;
 6—микрофон; 7—фонарь; 8—подставка для хранения радиобуя

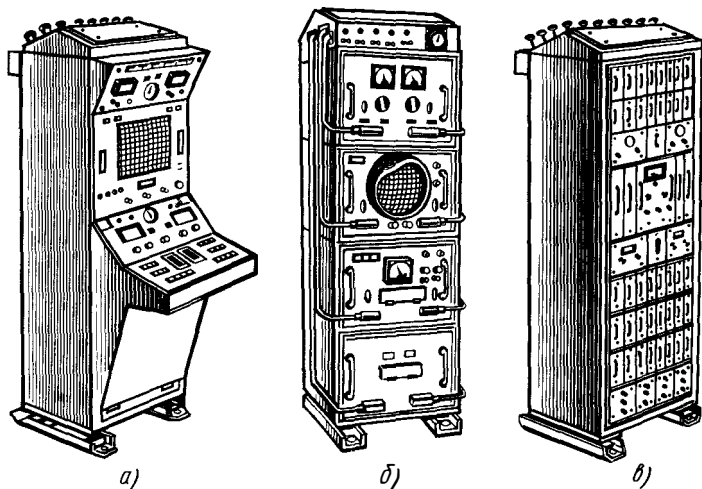


Рис. 8.42. Конструкция транспортируемых РЭС:
 а—стойка с пультом, б—стойка с блоками; в—шкаф со снятой дверцей

Для автомобильных и железнодорожных РЭС можно не учитывать такие факторы, как падение аппаратуры с заданной высоты и погружение в воду, воздействие пыли, если это не оговорено в технических требованиях. Спецификой транспортируемых РЭС является усиленная конструкция стоек, блоков, ячеек, а также амортизация стоек (рис. 8.43, 8.44).

Стойки судовой и корабельной аппаратуры иногда устанавливают на амортизаторах, прикрепленных к стенке отсека (рис. 8.44). Особенностью судовых и корабельных РЭС является также то, что антенны обычно располагаются в развернутом виде (см. рис. 7.4).

Для облегчения демонтажа РЭС блоки могут извлекаться из шкафов и стоек (рис. 8.42 и 8.43), а стойки и шкафы снабжаются рым-болтами (см. рис. 8.43 и 8.44) для монтажа с использованием подъемных механизмов. Усиление несущей конструкции достигается за счет использования сварных каркасов из профилированных деталей, имеющих повышенную жесткость (см. рис. 8.12, а, з), прочных материалов (легированных сталей, титана), ребер жесткости, увеличения числа точек крепления, установки дополнительных упоров в плоскости плат и т. д. Блоки и ячейки, подлежащие установке на транспортные средства (см. рис. В.1), имеют элементы фиксации (штыревые, пружинные, рис. 8.45) и крепление передних панелей блоков и передних планок ячеек к стойкам с помощью невыпадающих винтов.

Конструкции транспортируемых РЭС рассчитываются и испытываются на прочность и жесткость (см. гл. 5) из условия минимизации массы. Для повышения ударовибропрочности иногда механические узлы заменяют электронными (прерыватель, реле-регулятор, устройство управления карбюратором автомобиля и т. д.). Для облегчения теплового режима на корпусе РЭС делают ребрение (устройств, расположенных вблизи двигателя).

Для защиты транспортируемых РЭС от воздействия влаги

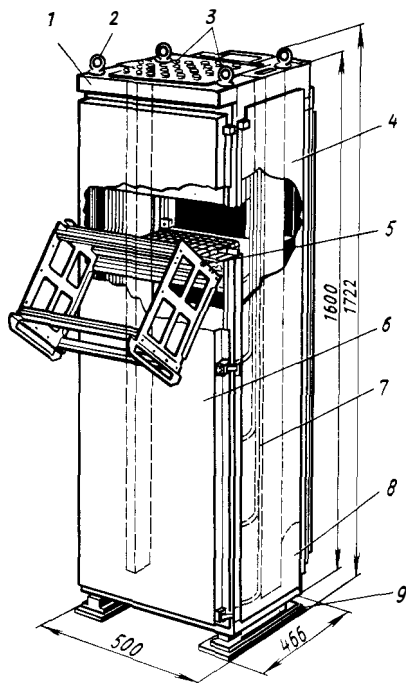


Рис. 8.43. Конструкция стойки транспортируемого РЭС шкафного исполнения:

1 — каркас; 2 — рым-болт; 3 — воздухо-
воды; 4 — боковая стенка; 5 — блок вы-
двигаемый и поворачиваемый; 6 —
крышка; 7 — жгуты внутрискоечных
электрических связей; 8 — место для со-
единителей внешних связей; 9 — аморти-
заторы

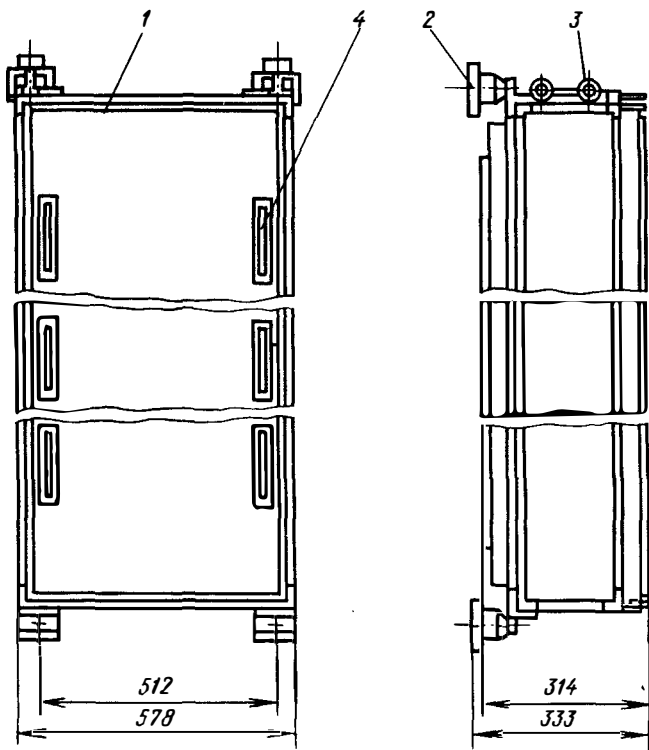


Рис. 8.44. Шкафная конструкция морского РЭС:
 1 — стойка; 2 — амортизаторы; 3 — рым-болты; 4 — разъемные соединители

(брызг, морского тумана) могут быть использованы эластичные уплотнители крышек, обволакивание плат лаком или компаундом, опайка блоков с бескорпусными компонентами и т. д. (см. гл. 4). Для исключения конденсации влаги внутри гермообъема можно поместить патрон с влагопоглотителем (например, цеолитом). С помощью резиновых колпачков уплотняются рычаги регуляторов и переключателей. Общий вид судового акустолокационного РЭС представлен на рис. 8.46. Все устройство размещено в литых корпусах, имеющих резиновые уплотнения крышек и мест ввода кабелей.

Особенно тщательно следует подходить к защите разъемных и неразъемных контактов, а также к защите от коррозии резьбовых соединений. Для этой цели паяные и сварные соединения покрывают лаком или компаундом, ответственные разъемные соединения (например, контакты переключателя диапазонов связанного морского приемника) золотят, а резьбовые соединения

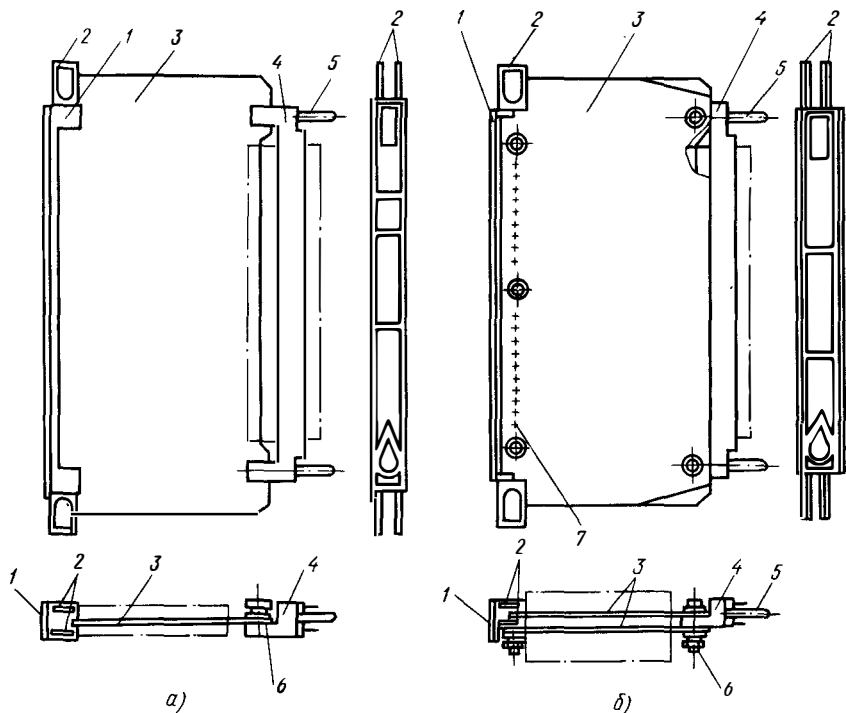


Рис. 8.45. Одноплатная (а) и двуплатная (б) конструкции ячейки транспортируемого РЭС:

1—передняя планка; 2—пружинные фиксирующие пластины; 3—плата; 4—вилка соединителя; 5—штыревой фиксатор соединителя; 6—винт крепления соединителя; 7—контакты для межплатных связей

покрывают слоем кадмия. Несущие конструкции из стали можно защищать гальваническими или лакокрасочными покрытиями, а из алюминиевых сплавов—анодировать.

Сложность конструкции транспортируемых РЭС, размещение их в нескольких конструктивно-функциональных модулях (шкафах, стойках, пультах, блоках, ячейках) приводит к необходимости выполнения межблочных электрических соединений. Для объединения шкафов и стоек эти соединения, выполненные кабелями, обычно располагаются сверху (рис. 8.42). Это обеспечивает легкость доступа к соединителям и в какой-то степени защищает межблочные соединения от вибраций и ударов, так как стойки устанавливаются на амортизаторах. Так как доступ к транспортируемым РЭС обычно осуществляется только с одной стороны, то для облегчения осмотра и ремонта блоков и ячеек используются различные способы выдвижения и поворота (см. рис. 8.43, 8.47—8.49).

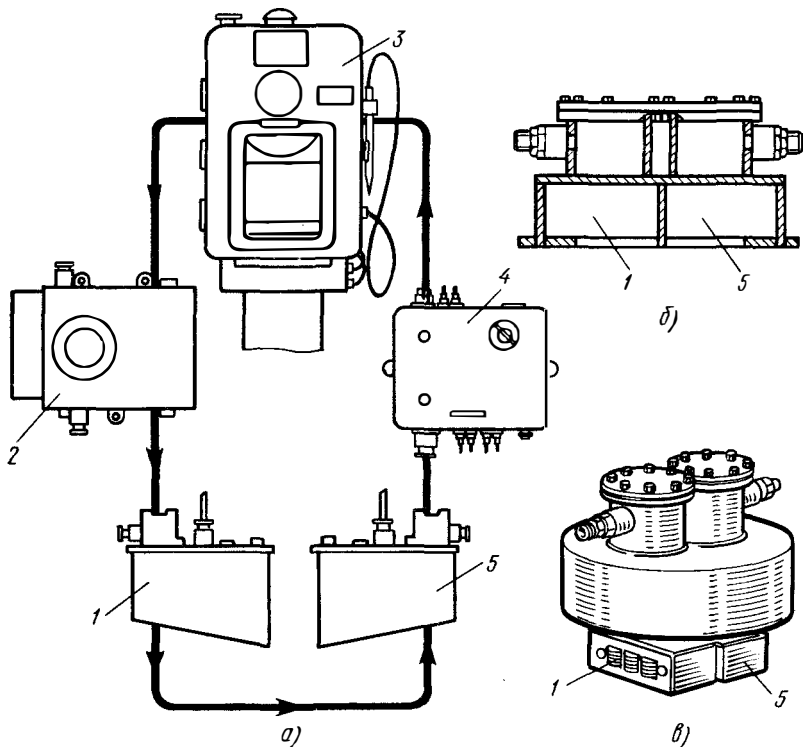


Рис. 8.46. РЭС золота:

а—схема связей; *б, в*—поперечное сечение и внешний вид вибраторов-преобразователей; *1*—вибратор-излучатель; *2*—генератор сигналов; *3*—пульта управления; *4*—приемник; *5*—вибратор-приемник

При разработке конструкции транспортируемых РЭС необходимо учитывать технологические факторы: использование типовых конструкций, преимуществом разрабатываемой конструкции от носителя изделий-аналогов; соответствие способов обработки и сборки типу производства; оптимальность выбранных допусков и шероховатости поверхности деталей; рациональность использования драгоценных металлов и дефицитных материалов; токсичность технологических процессов и т. д. Особое внимание должно быть уделено наличию и составу запасного комплекта для ремонта РЭС на месте эксплуатации, удобству регулировки, настройки, ремонта в производстве и при эксплуатации с учетом возможностей ремонтной базы, ее удаленности от основной базы снабжения, квалификации обслуживающего персонала (особенно судовых и корабельных РЭС).

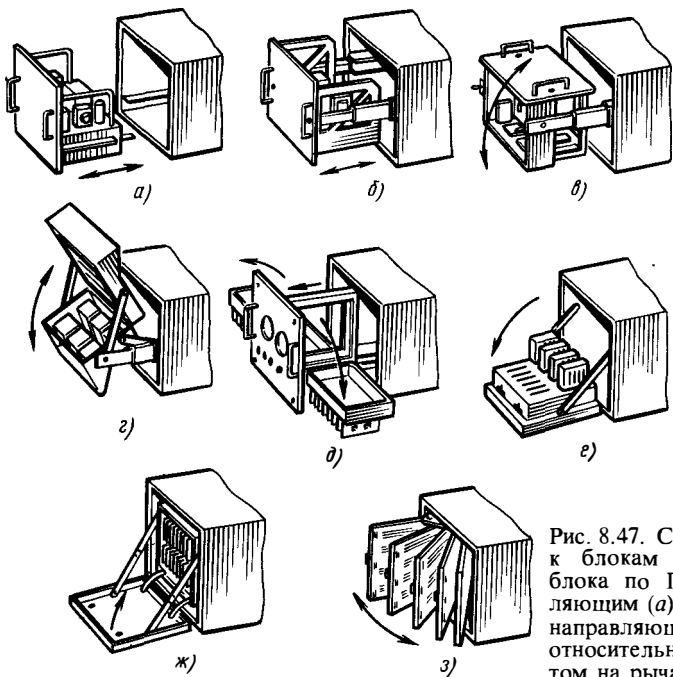


Рис. 8.47. Способы доступа к блокам РЭС выдвиганием блока по П-образным направляющим (а); на телескопических направляющих (б); с поворотом относительно оси (в); с поворотом на рычагах (г); выдвигание блока с поворотом узлов (д); поворот блока относительно корпуса (е); поворот крышки блока (ж); выдвигание блока и разворот плат (з)

поворот блока относительно корпуса (е); поворот крышки блока (ж); выдвигание блока и разворот плат (з)

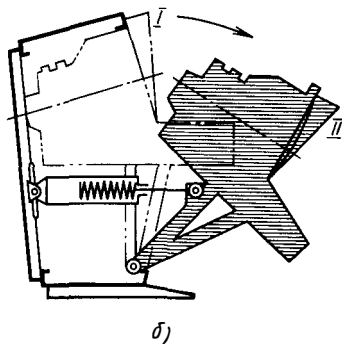
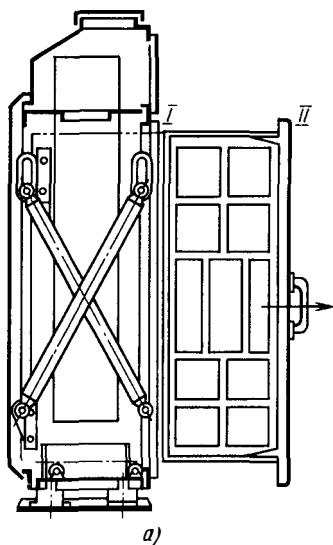


Рис. 8.48. Способы доступа к узлам стойки (а) и пульта (б)

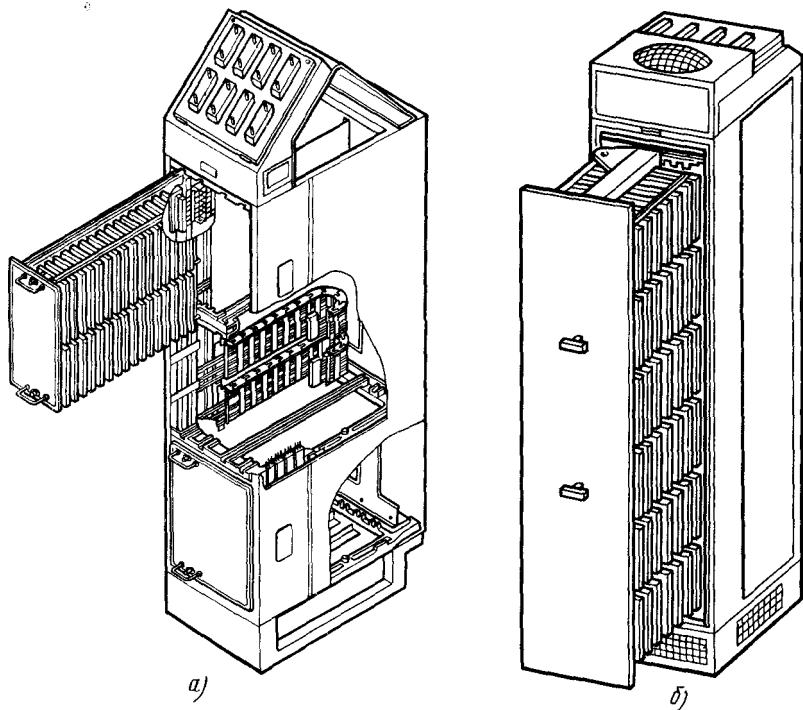


Рис. 8.49. Блочнo-шкафная (а) и ящечно-шкафная (б) конструкции транспортируемых РЭС

§ 8.4. Особенности конструкций наземных переносных РЭС

К переносным РЭС относят устройства массой до 30 кг, перемещаемые в неработающем состоянии одним-двумя операторами (женщинам разрешается поднимать не более 10 кг на высоту 1,5 м, при чередовании с другими работами — не более 15 кг). Ввиду все большей миниатюризации этот класс наземных РЭС непрерывно расширяется и в настоящее время представлен: видеозвуковоспроизводящими устройствами (радиоприемники, телевизоры, магнитофоны, передающие видеокамеры); настольными вычислителями (микроЭВМ, персональные ЭВМ); различными измерителями (осциллографы, генераторы, вольтметры, тахометры, измерители теплового поля, частотомеры); медицинской аппаратурой (электрокардиографы, дефибрилляторы); аппаратурой специального назначения (вычислители для управления артиллерийским огнем, устройства наведения тактических ракет, средства спутниковой системы спасения КАСПАС).

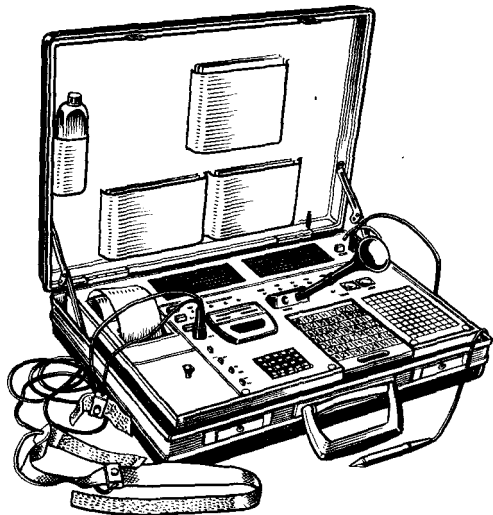


Рис. 8.50. Общий вид переносного портативного комплекса «Тонус»

тическим воздействиям (требования по механическим воздействиям более мягкие, так как носимые РЭС перевозятся в упакованном виде).

На конструкцию переносных РЭС оказывают влияние также такие факторы, как удобство переноски, способы миниатюризации, способы обеспечения устойчивости к климатическим и механическим воздействиям, защита от собственного тепловыделения, специфика базовой конструкции, обеспечение эстетичности и технологичности.

Несмотря на то что переносные РЭС значительно различаются по конструкции, некоторые их особенности являются общими для всей группы:

1) максимальная масса РЭС зависит от конструкции приспособлений для переноски и не должна превышать 15 кг при наличии одной ручки (лямки) для переноски. Если РЭС можно удержать руками (это позволяют его размеры и масса), то ручки можно не делать;

2) охлаждение, как правило, осуществляется с помощью воздушной конвекции (естественной или принудительной с использованием вентиляторов);

3) наличие защиты от климатических и механических воздействий для переносных РЭС специального назначения;

4) комплектация дополнительными деталями и узлами для замены вышедших из строя ИС, ЭРЭ и расширения выполняемых РЭС функций (кабели, переходники, делители напряжения и т. д.).

Примеры конструкции переносных РЭС. Переносной пор-

Переносные РЭС могут эксплуатироваться в помещении или вне его. Поэтому требование устойчивости к дестабилизирующим климатическим и механическим воздействиям для переносных РЭС являются промежуточными между требованиями, предъявляемыми к устойчивости стационарных и транспортируемых РЭС (см. табл. 8.1). Для бытовых РЭС они совпадают с требованиями к стационарным РЭС, работающим в отапливаемом помещении, а для РЭС специального назначения — с требованиями к транспортируемым РЭС по клима-

тативный комплекс «Тонус» (рис. 8.50), предназначенный для контроля психофизиологических параметров летчиков, водителей, космонавтов, спортсменов, собран либо в корпусе без ручек (переносится в сумке), либо в чемодане типа «дипломат». На верхней плоскости размещены панель блока вычислителя с индикатором на жидком кристалле, наборное поле с кнопками тестирования, печатающее устройство для фиксации результатов тестирования и соединители для подключения различных датчиков (фонендоскопа, пьезодатчиков, контактного зонда и т. д. Под передней панелью горизонтально расположены две печатные платы: микропроцессор и память. В крышке «дипломата» имеются карманы. Небольшая потребляемая мощность позволила обойтись охлаждением с помощью искусственной конвекции от корпуса, выполненного из алюминиевого сплава. Так как устройство предназначено для эксплуатации в отапливаемых помещениях, то защита от влаги сводится к использованию корпусированных компонентов, лакировке плат и установке резиновой герметизирующей прокладки под верхней панелью.

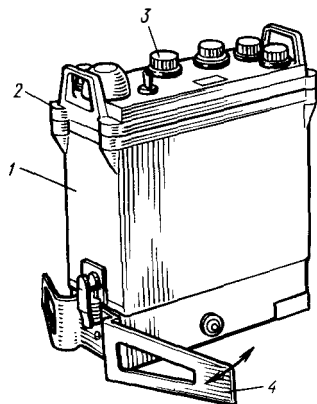


Рис. 8.51. Связная радиостанция, переносимая за спиной в упаковке:

1—корпус; 2—крышка с ручками для переноски; 3—элементы управления и индикации; 4—откидывающиеся опоры

Переносная связная радиостанция (рис. 8.51) предназначена для эксплуатации на открытом воздухе. Корпус выполнен литьем под давлением из алюминиевого сплава, крышка также литая. Герметизация крышки осуществляется с помощью резиновой прокладки, а элементы управления имеют уплотнения. Для устойчивости в стационарном состоянии предусмотрены откидывающиеся опоры. Переносить радиостанцию можно в специальном ранце за спиной или с помощью двух ручек, расположенных на крышке корпуса, одновременно являющейся панелью управления.

Электронный измеритель артериального давления ИАД-1 (рис. 8.52) выпускается серийно

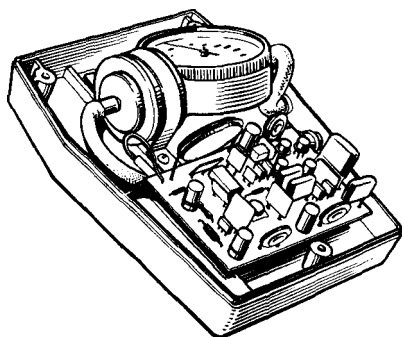


Рис. 8.52. Измеритель артериального давления типа ИАД-1

Электронный измеритель артериального давления ИАД-1 (рис. 8.52) выпускается серийно

и продается через торговую сеть, поэтому при разработке его конструкции учитывалось требование минимальной стоимости. Корпус прибора, состоящий из основания и крышки, выполнен прессованием (литьем) из ударопрочного полистирола, печатная плата — из стеклотекстолита с односторонним монтажом, не приняты меры по защите от механических воздействий (элементы крепятся к плате только пайкой выводов). Герметизирующие прокладки отсутствуют, однако элементы имеют индивидуальную корпусную или полимерную защиту. Кроме электронного блока в основании смонтированы манометр и гнезда для подключения к магистрали воздуха и выходу пьезодатчика. Батареи электропитания установлены в нише под платой со стороны дна измерителя и закрываются специальной выдвигающейся крышкой. Так как стоимость данного прибора определяется в основном стоимостью элементов, а не сборки, автоматизированная установка элементов в данной конструкции не предусмотрена.

К переносным РЭС относится и *измерительная аппаратура*. Основной задачей при разработке конструкции измерительных РЭС является обеспечение стабильности параметров от образца

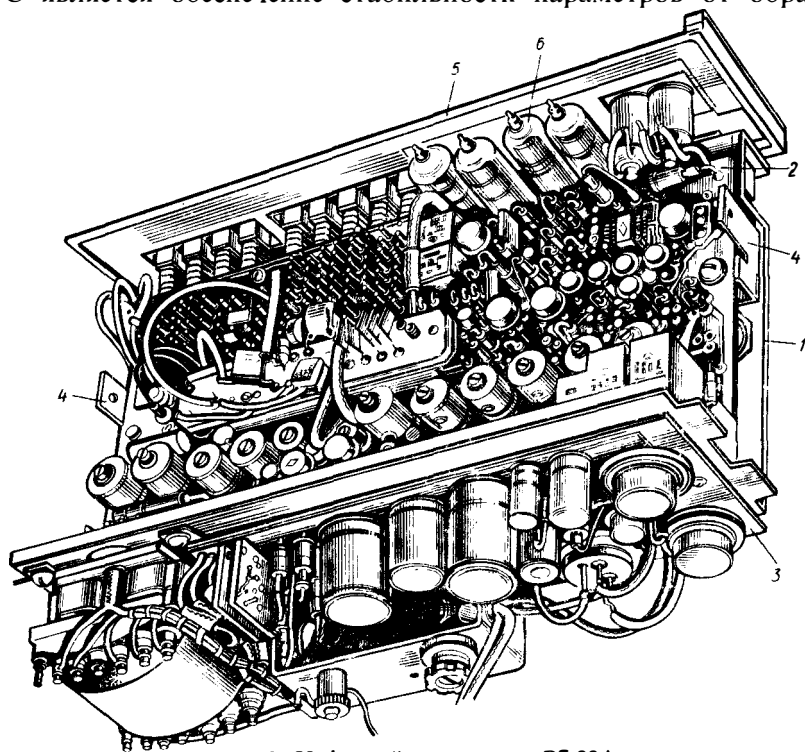


Рис. 8.53. Цифровой вольтметр В7-22А:

1—шасси; 2—плата управления; 3—плата питания; 4—кронштейны; 5—передняя панель; 6—цифровые индикаторы

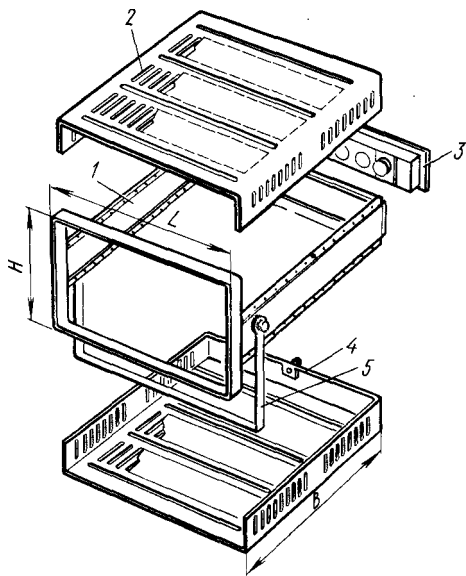


Рис. 8.54. Конструкция унифицированного корпуса настольного переносного измерительного прибора:

1—каркас; 2—верхняя крышка; 3—задняя стенка; 4—нижняя крышка; 5—откидная ручка-подставка

Поэтому размеры вольтметра В7-22 значительно меньше обычных и составляют $215 \times 65 \times 190$ мм. Масса прибора также невелика — 2,2 кг. Потребляемая мощность 10 В·А, что позволяет осуществить отвод выделяющейся теплоты естественной конвекцией. Расположение источника питания не только облегчает отвод теплоты, но и экранирует выделяющийся в нем тепловой поток от элементов схемы измерителя. Для увеличения четкости цифр (уменьшения

к образцу, а также при воздействии дестабилизирующих факторов. Конструкция цифрового вольтметра В7-22 со снятым кожухом представлена на рис. 8.53. Несущим основанием является штампованное шасси П-образного типа, к которому крепятся две горизонтальные платы (управления и аналогового преобразователя) одна под другой, плата питания с внешней стороны задней стенки шасси, передняя панель, две крышки корытообразного типа и ручка для переноски, которая устанавливается цапфами в кронштейны шасси.

Размеры на типовые корпуса измерительных приборов (рис. 8.54) приведены в табл. 8.4. Однако допускаются иные размеры, оговоренные в технических условиях на прибор.

Таблица 8.4

Размеры (мм) блоков измерительных приборов

Ширина L , мм	Высота H , мм	Глубина B , мм	Ширина L , мм	Высота H , мм	Глубина B , мм
225	140	360	300	180	420
	160	360		200	420
	180	360		160	360
260	160	360	360	200	420
				200	480

ореола) на передней панели имеется светофильтр темно-зеленого цвета. Передняя панель выполнена с учетом требований эргономики и технической эстетики. Цифровой индикатор расположен слева, а кнопки управления и гнезда — справа; число элементов управления минимально, расположены они горизонтально в ряд над гнездами для подключения измерительных цепей. Так как прибор не испытывает значительных механических перегрузок, то все навесные компоненты установлены на плате с помощью внешних выводов (без дополнительного крепления держателями, скобами, компаундами и т. д.). Для воспроизводимости параметров измерителя и снижения его стоимости большая часть электрических соединений выполнена с использованием печатного монтажа.

Широкое распространение нашел новый класс переносных РЭС: микроЭВМ, которые благодаря своим преимуществам (низкой стоимости, малым габаритам, довольно большим вычислительным возможностям) используются в качестве персональных компьютеров, а также вычислителей, расширяющих возможности различных РЭС (измерительной аппаратуры, систем управления технологическим оборудованием, систем управления аэропортов и т. д.). Появление микроЭВМ обусловлено достижениями полупроводниковой технологии, позволившей получить в одном кристалле комплект функциональных узлов ЭВМ, а также достижениями системотехники благодаря использованию принципов модульности, магистральности и конструктивной совместимости.

Принцип модульности заключается в том, что вся микроЭВМ делится на конструктивно-, функционально- и информационно-законченные устройства, которые могут самостоятельно решать задачи определенного класса: центральный процессор (ЦП), память (ОЗУ, ПЗУ), устройства ввода/вывода и др. (рис. 8.55).

Принцип магистральности заключается в том, что все модули связаны общими шинами и любой модуль может включаться в любом месте магистрали. Условно все линии связи, из которых состоит магистраль, делятся на группы определенного функционального назначения, называемые шинами. Так, шина данных (ШД) состоит из восьми линий связи, по которым одновременно может передаваться информация в один байт (восемь двоичных разрядов). Слово, состоящее из нескольких байтов, передается в этом случае за несколько тактов. Разрядность шины данных определяется разрядностью ЦП — при увеличении разрядности ЦП увеличивается и разрядность ШД. Иногда для ускорения работы шина данных распараллеливается для передачи данных А, данных В и результата С. Шина, по которой передаются адреса ячеек памяти, называется адресной шиной (ША) и имеет 16 линий, но при необходимости увеличения емкости адресуемой памяти

может включать до 32 линий. Шина управления (ШУ), по которой передаются команды режима работы (запись, чтение, ввод, вывод и т. д.), может иметь 4—8 линий.

Таким образом, магистраль в общем случае может содержать довольно большое число линий связи. Создание магистрали позволяет снизить число межмодульных связей, расширить возможности микроЭВМ путем подключения к ней дополнительных модулей, но одновременно снижает быстродействие ЭВМ, так как линии связи в каждый момент используются какой-либо одной группой модулей; кроме того, число линий часто меньше числа разрядов слова и информация передается по частям, что снижает быстродействие микроЭВМ. К недостаткам магистральной организации относится также необходимость увеличения общего объема аппаратуры микроЭВМ за счет устройств подключения к магистрали тех или иных модулей.

Конструктивная совместимость в микроЭВМ достигается с помощью следующих мер: 1) установления единой сетки размеров по всем трем осям конструкции; 2) использования модулей для габаритных размеров микроЭВМ и входящих в них узлов, а также минимизации числа типоразмеров плат и несущих конструкций; 3) стандартизации структур магистралей; 4) установления единой конструкции соединителей (магистральных и интерфейсных).

Микроминиатюризация основных функциональных узлов микроЭВМ обусловила специфику их конструкции, которые можно разделить по сложности на три группы: однокорпусные (одно- или многокристальные), одноплатные, многоплатные. На кристал-

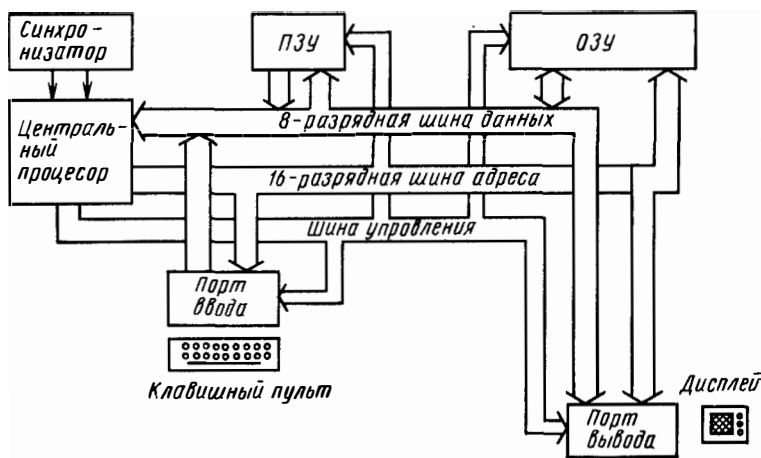


Рис. 8.55. Структурная схема микроЭВМ

ле формируются схемы центрального процессора, постоянной и оперативной памяти, интерфейсов, таймера и др. Первые микропроцессоры были 4-, 8- и 16-разрядными, в настоящее время в нашей стране и за рубежом разработаны микропроцессоры на 32 разряда. От числа разрядов процессора зависят быстродействие микроЭВМ и емкость адресуемой памяти. Конструктивно однокристалльные микроЭВМ (микропроцессоры) выполняются в корпусе с двумя рядами выводов. Корпуса могут иметь 18, 24, 28, 40, 48, 52, 64 вывода и более. В настоящее время наиболее распространенными являются 40-выводные корпуса (см. рис. 1.17).

Для расширения возможностей однокорпусных микроЭВМ используют дополнительные БИС: памяти, интерфейсы и т. д. В совокупности они образуют микропроцессорный комплект БИС. Для расширения функциональных возможностей отдельных БИС иногда их выполняют в виде многокристальной конструкции (рис. 8.56) или они имеют переходные контактные колодки для подключения сменных элементов (например, БИС ПЗУ микропрограмм; рис. 8.57).

Уже при 40 выводах корпуса с двумя рядами выводов его площадь в несколько раз превышает площадь расположенного в нем кристалла, поскольку при шаге выводов 2,5 мм длина корпуса с двухрядным расположением выводов получается очень большой. Кроме того, из-за значительной длины выводов получаются недопустимо боль-

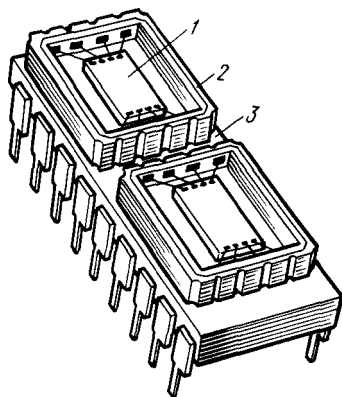


Рис. 8.56. Размещение двух микрокорпусов на общем керамическом основании:

1—кристалл полупроводниковой ИС; 2—микрокорпус; 3—общее керамическое основание

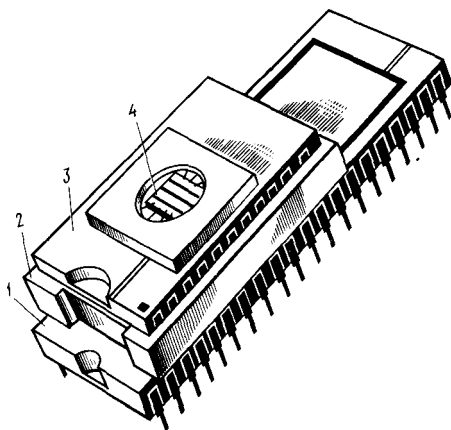


Рис. 8.57. Конструкция микропроцессора с переходной колодкой для подключения ПЗУ:

1—корпус микропроцессора; 2—переходная колодка с разъемными контактами; 3—БИС ПЗУ; 4—прозрачное окно для стирания информации

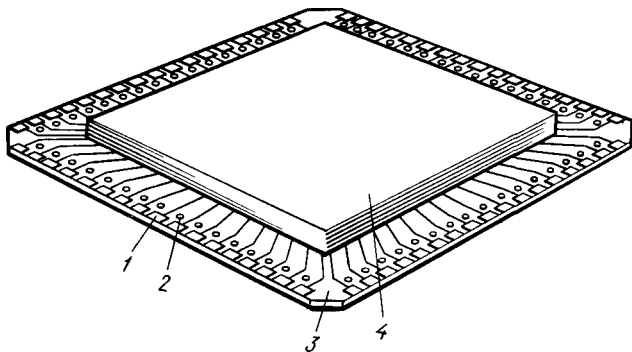


Рис. 8.58. Микрокорпус с двухрядными выводами и крышкой:
 1—первый ряд (контактные площадки); 2—второй ряд (контактные отверстия); 3—
 керамическая плата; 4—крышка

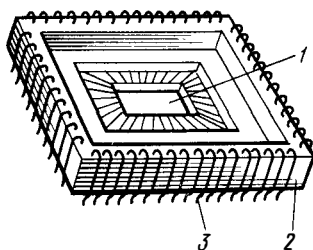


Рис. 8.59. Пластмассовый кристаллодержатель с запрессованными гибкими вы-
 водами:
 1—ниша для размещения полупроводниковой ИС; 2—пластмассовая рамка; 3—запрессован-
 ные гибкие выводы

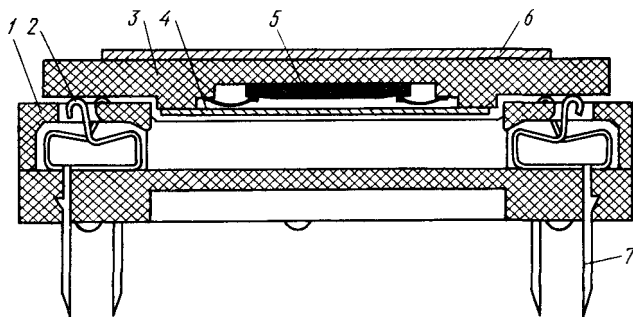


Рис. 8.60. Переходная колодка со сменным кристаллодержателем:
 1—переходная колодка; 2—упругие контакты; 3—микрокорпус; 4—крышка; 5—кристалл
 ИС; 6—пружинный прижим; 7—вывод, запаиваемый в печатную плату

шие (для быстродействующих схем) омическое сопротивление (более 0,5 Ом) и паразитная емкость (более 5 пФ). Так как число выводов корпуса имеет тенденцию к увеличению (до 68, 128, 256, 512 и более), то одним из выходов является использование герметичных керамических (рис. 8.58) или пластмассовых (рис. 8.59) микрокорпусов (кристаллодержателей). Керамические микрокорпуса совместимы по ТКЛР с кремниевыми кристаллами. Пластмассовые микрокорпуса имеют гибкие выводы, так как их ТКЛР отличается от ТКЛР печатных плат и кремниевых кристаллов. Благодаря использованию гибких выводов достигается термокомпенсация.

Иногда в микрокорпусе располагается несколько кристаллов с одной или двух сторон основания, а сам микрокорпус из керамики может устанавливаться с помощью прижима на переходную колодку (рис. 8.60), впаиваемую в плату. Для улучшения теплоотвода на керамическую плату микрокорпуса может быть установлен миниатюрный радиатор.

Наибольшего уменьшения габаритов можно добиться, используя пленочные носители бескорпусных кристаллов (см. рис. 1.20), имеющих малые массу и габариты (шаг выводов 0,625; 0,5; 0,32 мм). В этом случае одновременно осуществляется герметизация всех элементов блока. Использование пленочных носителей позволяет осуществить входной контроль бескорпусных БИС, их электротренировку, автоматизацию сборки и электромонтажа.

Однокристалльные микроЭВМ обычно дополняются такими компонентами, как кнопки управления, индикаторы, элементы электропитания. Поэтому в качестве конструктивного и монтажного основания микроЭВМ обычно выступает печатная плата, выполненная на основе стеклопластика, керамики, металла (алюминия, стали, инвара, титана), полиимидной пленки. В случае комплектования одноплатной микроЭВМ дополнительными модулями для увеличения разрядности процессора, емкости памяти или числа подключаемых периферийных устройств получается многоплатная микроЭВМ.

Размеры плат печатных микроЭВМ пропорциональны модулю в метрической (2,5; 1,25 или 0,5 мм) или дюймовой (2,54 или 1,27 мм) системе. Размер плат для двух рядов в дюймовой системе, отличающихся наличием или отсутствием дополнительной арматуры, для различных типоразмеров корпуса блока (выраженных числом модулей $U=1,75''=44,45$ мм) приведен в табл. 8.5. Максимальный размер блока по фронту (ширина) составляет 480 мм в метрической системе и 482,6 мм в дюймовой. Платы в блоке могут размещаться вертикально или горизонтально с шагом 20 мм в метрической системе и с шагом 17,2 мм в дюймовой.

На рис. 8.61 представлена конструкция микроЭВМ «Электроника-60М». В корпус могут быть установлены четыре

Размеры (мм) корпусов блоков и печатных плат микроЭВМ с модулем в дюймовой системе

Блок		Печатная плата		
		Высота $H_{-0,3}$, мм		Ширина $B_{-0,3}$, мм
типоразмер	высота, H , мм	ряд 1	ряд 2	
2U	88,1	55,55	67,31	100; 160; 220; 280
3U	132,5	100,00	111,76	
4U	177,0	144,45	156,20	
5U	221,5	188,90	200,70	
6U	265,8	233,35	245,10	
7U	310,3	277,80	289,55	
8U	354,8	322,25	334,00	
9U	399,2	366,70	378,45	
10U	443,7	411,15	422,90	
11U	488,1	455,60	467,35	
12U	532,6	500,05	511,80	

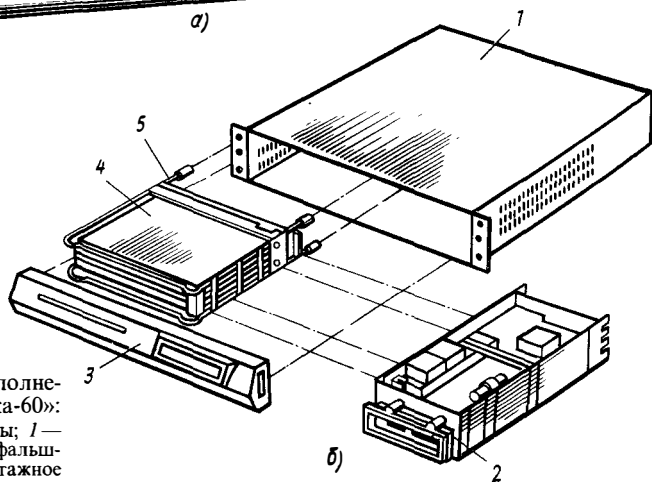
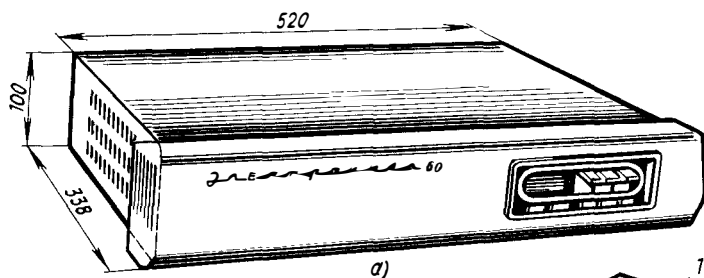


Рис. 8.61. Конструктивное исполнение микроЭВМ «Электроника-60»: а — общий вид; б — основные узлы; 1 — кожух; 2 — блок питания; 3 — фальшпанель; 4 — блок ячеек; 5 — монтажное основание с направляющими и соединителями

горизонтально расположенные платы большого размера или восемь плат половинного размера. Несущей основой («корзиной») являются две скобы из пруткового материала, к которым крепятся пластмассовые направляющие для плат, блок вентиляторов (не показаны на рисунке), блок питания, блок соединителей и кожух.

На рис. 8.62 представлена конструкция одноплатной микроЭВМ, являющейся основой многоплатной микроЭВМ «Электроника-60». В зависимости от структуры микроЭВМ, необходимой для решения конкретной задачи, она может комплектоваться платами различного назначения (ОЗУ, ПЗУ, интерфейсы и т. д.).

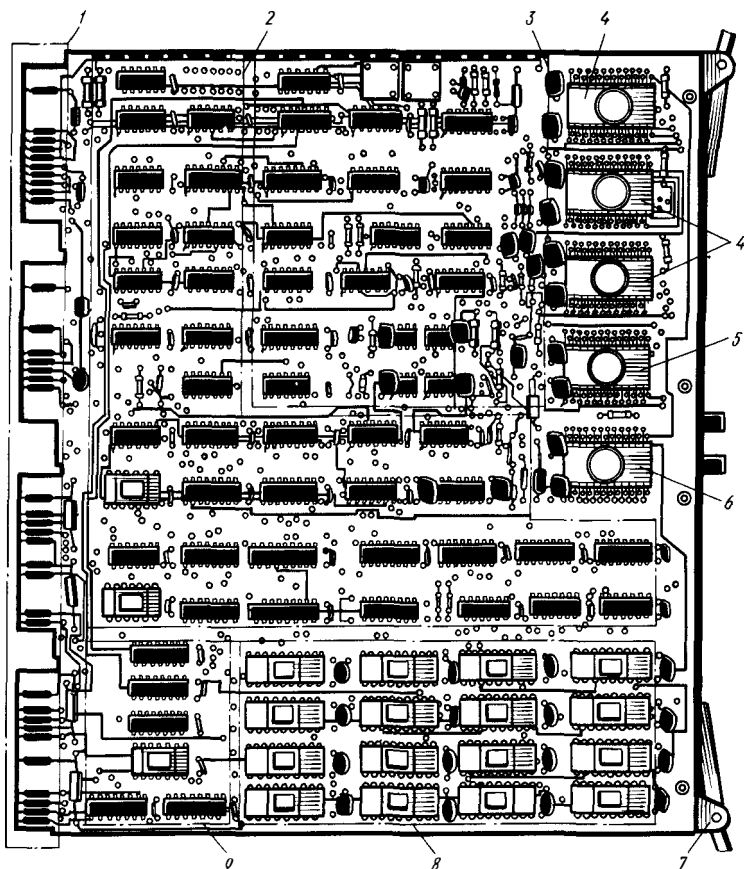


Рис. 8.62. Общий вид одноплатной микроЭВМ ЦП М2:

1—плоский разъемный соединитель для связи с каналом микроЭВМ; 2—логические схемы прямого доступа к памяти, прерывания и управления каналом; 3—генератор и преобразователь напряжения; 4—БИС ПЗУ; 5—БИС управления; 6—БИС регистра адреса логического устройства; 7—фиксирующее устройство; 8—ОЗУ емкостью 4К слов; 9—передатчик канала

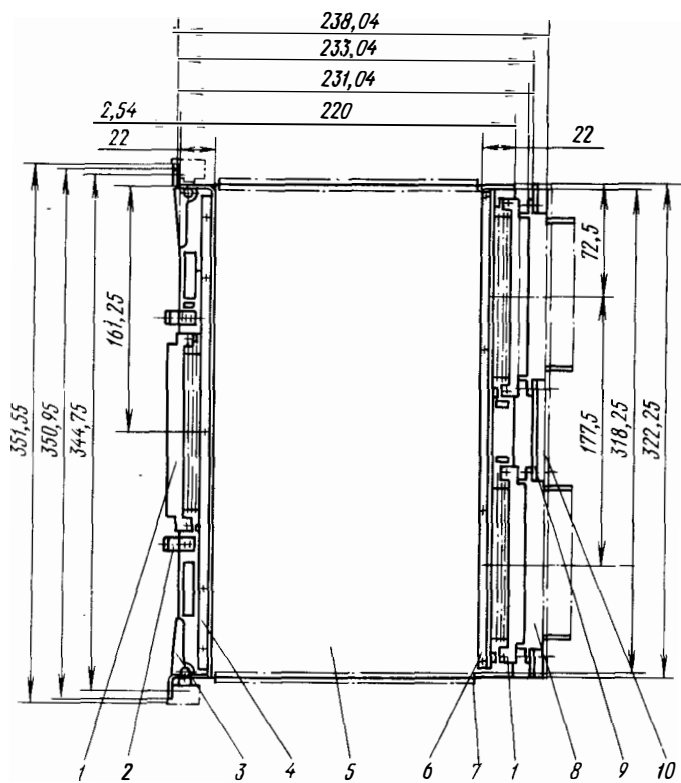


Рис. 8.63. Плата под корпус 8U:

1—соединитель (розетка) СНП34 135/132 9,4P-22; 2—ребро (уголок) для крепления корпуса вилки СНП 34 135/132 12,5В-21; 3—рычаг для выема ячейки из корпуса; 4—сменное ребро жесткости (при необходимости выполняющее роль теплоотвода); фланцы ребра служат для крепления ячейки в корпусе; 5—печатная плата; 6—постоянное ребро жесткости; 7—направляющая корпуса; 8—соединитель (вилка) СНП 34 135/132 12,5 В-21; 9—монтажная панель микроЭВМ; 10—кроссплата

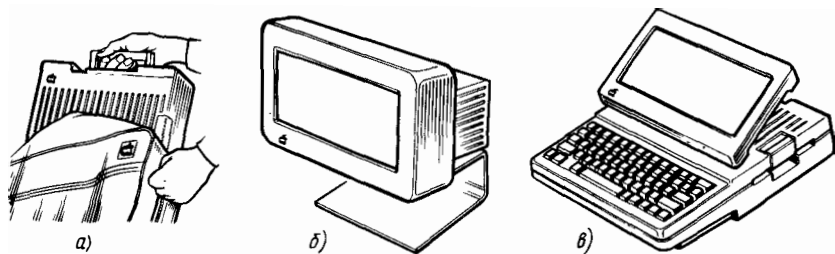


Рис. 8.64. Бытовой компьютер фирмы «Apple»:

а—упаковка с помощью сумки; б—дисплей на электроннолучевой трубке; в—компьютер с дисплеем на жидком кристалле

Конструкция вертикально вставляемых плат для микроЭВМ НЦ-031 с размером блока $8U$ представлена на рис. 8.63.

При разработке микроЭВМ бытового назначения (рис. 8.64) большое внимание уделяется внешнему оформлению: форме корпуса, расположению клавиш; размеру, форме и наклону экрана; цветовой гамме, нюансной отделке. При размещении микроЭВМ в технологическом оборудовании необходимо учитывать требования электробезопасности. При решении частных задач используются рекомендации, изложенные в гл. 3—6.

При обеспечении технологичности конструкции переносных РЭС необходимо учитывать объем производства. Для массового производства используются высокопроизводительные способы формообразования, сборки, контроля. Это предъявляет определенные требования к материалам, форме (в том числе наличие литейных уклонов, поднутрений и т. д.), характеру размещения компонентов (с учетом требований, предъявляемых при гибком автоматизированном производстве, при использовании средств механизации и автоматизации). Кроме того, необходимо учитывать преимственность конструкции, ее типизацию, удобство доступа к компонентам при изготовлении, ремонте, обслуживании. Особое внимание следует обращать на культуру производства и декоративные материалы, используемые для внешней отделки переносных РЭС.

§ 8.5. Особенности конструкций наземных носимых РЭС

Носимые РЭС обычно располагаются на теле человека или его одежде. Они функционируют в процессе переноски, а также при воздействии дестабилизирующих факторов. Носимые РЭС бывают бытового назначения (часы, телевизоры, радиоприемники, магнитофоны, микрокалькуляторы и т. д.) и специального назначения (связные приемопередатчики, телевизионные передающие камеры на приборах с зарядовой связью и т. д.).

На конструкцию носимых РЭС оказывает влияние большое число факторов: необходимость минимизации габаритов, массы, энергопотребления, стоимости; защита от влияния дестабилизирующих факторов; химическая совместимость материалов с телом человека (исключение раздражения кожи); ремонтпригодность и технологичность; эстетичность и эргономичность. Принято, что масса карманных РЭС не должна превышать 0,7 кг, носимых на ремне через плечо—3 кг, носимых за спиной—10 кг. Это обеспечивается использованием микроэлектронной маломощной элементной базы (например, на основе комплементарных МДП-структур), миниатюрных элементов связи (кнопок, наушников, индикаторов), ударопрочных пластмасс для несущих конструкций (например, ударопрочного полистирола). Габариты и масса

носимых РЭС в значительной степени зависят от габаритов и массы источников питания. Элементная база, как и у бортовой аппаратуры, имеет минимальное энергопотребление. Особое внимание уделяется минимизации размеров элементов управления и индикации, так как площадь передней панели носимых РЭС часто определяется площадью этих элементов. Для уменьшения габаритов антенн они могут выполняться в виде спиралей или пластин.

На носимые РЭС специального назначения могут воздействовать такие дестабилизирующие факторы, как удар при падении с высоты, погружение в воду и др. Во всяком случае, число воздействующих на носимые РЭС факторов внешней среды (группы 6, 7, см. табл. 8.1) больше, чем на транспортируемую (группы 3—5) или стационарную (группы 1 и 2). По интенсивности внешних воздействий носимая аппаратура специального назначения уступает транспортируемой только по фактору многократных ударов (10g вместо 25g). При выборе материалов для частей носимых РЭС, имеющих контакт с человеком (корпуса часов, слуховых аппаратов, наушников, кнопок и т. д.), необходимо учитывать кроме их химической нейтральности по отношению к телу человека также шероховатость поверхности.

Обычно носимые РЭС являются изделиями длительного пользования, поэтому при их конструировании должна быть предусмотрена возможность ремонта и замены электрохимических источников питания. Особое внимание при разработке конструкции носимых РЭС уделяется технологичности, так как от этого в значительной степени зависит их стоимость. Объемы производства этих РЭС, как правило, велики. Поэтому должна быть предусмотрена возможность использования высокопроизводительных методов при обработке и сборке деталей, колением, прессование пластмасс, штамповка, печатный монтаж, пайка волной припоя и т. д.). Особое внимание в конструкции должно быть уделено учету ограничений, которые определяются возможностями роботов и манипуляторов, входящих в состав ГПС.

Так как большинство носимых РЭС являются товарами бытового назначения, то особое внимание уделяется их эстетическому оформлению. Для этого, в частности, используются наиболее удачные ранее найденные конструктивные решения: корпус наручных часов для размещения цифрового индикатора электронных часов или экрана портативного телевизора; конструкция типа «портсигар» или «записная книжка» для компоновки карманного приемника, калькулятора, измерителя температуры, портативного телевизора; конструкция типа «шкатулка» для носимого радиоприемника или медицинского прибора (электр-

кардиографа, дефибриллятора); конструкция типа «очковая оправа» для компоновки слухового аппарата; конструкция типа «канистра» или «ранец» для оформления носимой за спиной радиостанции и т. д. Для транспортировки носимой аппаратуры находят также применение различные упаковки в виде «сумки».

Спецификой носимых РЭС является наличие в них цифровых и аналоговых узлов, портативных автономных источников питания, преобразователей напряжения (осуществляющих повышение напряжения или формирование нескольких различных номиналов). Это предъявляет определенные требования к электромагнитной совместимости компонентов и узлов. Отвод теплоты благодаря небольшой выделяемой мощности осуществляется за счет естественной воздушной конвекции.

Рассмотрим конструкции некоторых переносных РЭС. Пожалуй, самым распространенным носимым РЭС являются *электронные часы*, которые обладают такими преимуществами, как точность хода, отсутствие подзавода, возможность выполнения других функций — микрокалькулятора, программного сигнализатора, календаря, секундомера. В конструкции наручных часов «Электроника-5» (рис. 8.65) использована несколько измененная конструкция корпуса обычных наручных механических часов. Электронный блок представляет слоистую конструкцию цилиндрической формы. Основой является печатная плата из стеклотекстолита дисковой формы, на которой установлены дискретные компоненты (кварцевый резонатор, ИС пересчетного устройства, ИС преобразователя напряжения, лампочка подсветки индикатора и т. д.). Над платой располагается жидкокристаллический индикатор (ЖКИ), соединенный с платой с помощью эластомерных

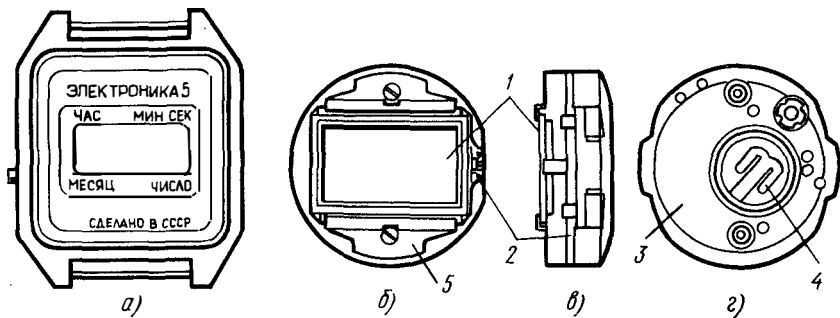


Рис. 8.65. Электронные наручные часы «Электроника-5»:

a — общий вид; *б* — вид на электронный блок со стороны индикатора; *в* — вид сбоку; *г* — вид со стороны гнезда под батарейку; 1 — жидкокристаллический индикатор; 2 — печатная плата; 3 — пластмассовый корпус блока питания; 4 — пружинный контакт для подключения батареи питания; 5 — скобы для прижима индикатора к эластомерному соединителю типа «зебра»

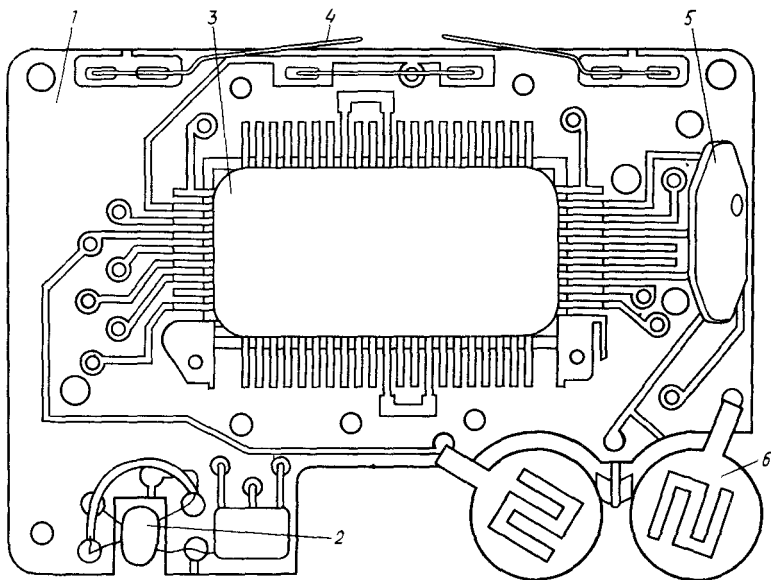


Рис. 8.66. Конструкция платы электронного будильника «Электроника 20-01» со стороны подключения цифрового индикатора:
 1 — печатная плата; 2 — ИС преобразователя напряжения; 3 — БИС; 4 — контакты включения звукового сигнала; 5 — кварцевый резонатор; 6 — пружинные контакты для подключения батарей питания

соединителей, а под платой (в специальной пластмассовой обойме с запрессованными контактами) — серебряно-цинковый элемент питания типа СЦ-21.

Конструкция электронного блока настольного (карманного) будильника «Электроника 20-01» представлена на рис. 8.66. Основой конструкции является печатная плата из стеклотекстолита, на которой крепятся все навесные компоненты (кварцевый резонатор, пересчетная схема, пьезо-

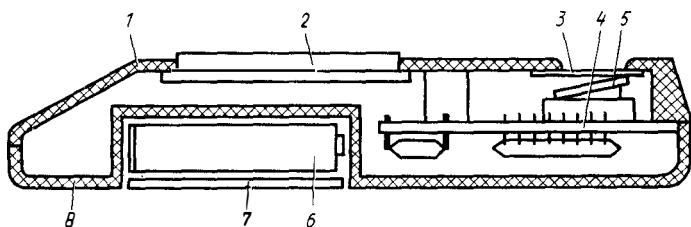


Рис. 8.67. Конструкция микрокалькулятора:

1 — крышка корпуса; 2 — панель управления с кнопками; 3 — светофильтр; 4 — печатная плата с навесными элементами; 5 — цифровой индикатор; 6 — элемент питания; 7 — крышка отсека питания; 8 — корпус (основание)

электрический источник звука и т. д.), а также контакты для подключения двух элементов питания типа СЦ-32. Увеличение мощности элементов питания по сравнению с мощностью элементов питания часов типа «Электроника-5» обусловлено необходимостью обеспечения звуковой сигнализации в режиме будильника. Соединение выводов БИС с жидкокристаллическим индикатором осуществляется с помощью двух эластомерных соединителей типа «зебра», представляющих слоистую конструкцию с чередующимися слоями проводящего и изолирующего полимера (см. гл. 2). Проводимость полимера обусловлена введением наполнителя.

Другой большой группой носимых РЭС являются микрокалькуляторы. Первые образцы микрокалькуляторов (см. рис. 6.29, 8.67) выполнялись в пластмассовом корпусе, который являлся несущей основой для платы с компонентами, индикатора, элементов питания, элементов управления (кнопок, переключателей),

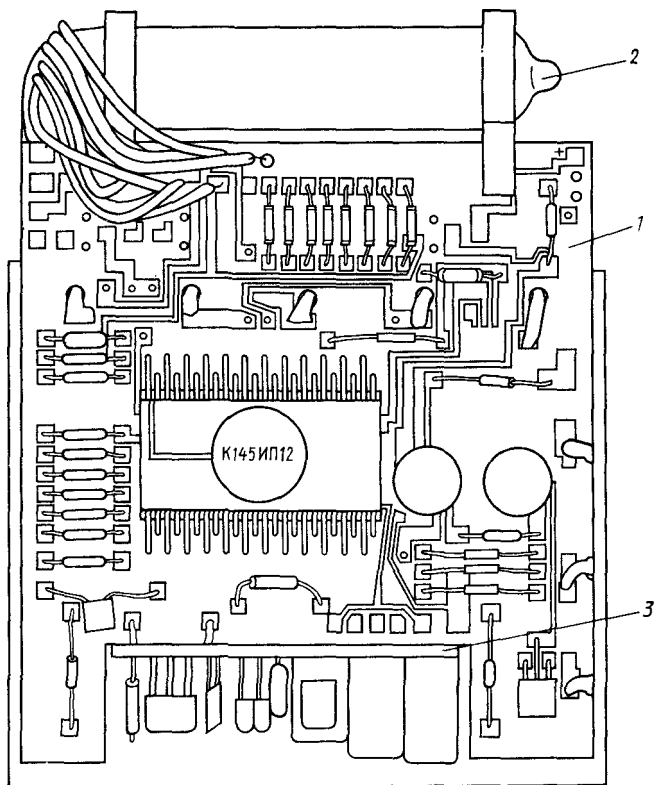


Рис. 8.68. Конструкция электронного блока микрокалькулятора БЗ-18М:
1—плата; 2—электролюминесцентный цифровой индикатор; 3—плата преобразователя напряжения

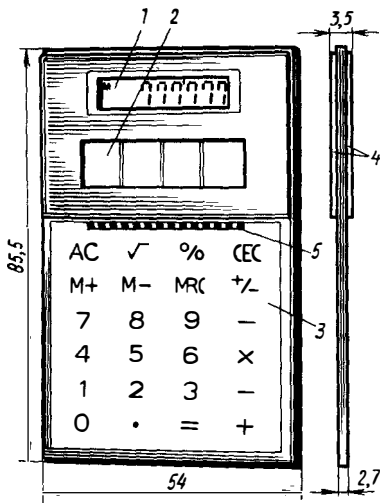


Рис. 8.69. Конструкция калькулятора SC-06:

1 — ЖКИ; 2 — солнечная батарея; 3 — прозрачная панель с сенсорным наборным полем; 4 — металлические крышки; 5 — гибкий печатный шлейф

ренную сторону цифрами и знаками с сенсорными элементами управления и проводниками из полупрозрачного материала (например, оксида олова). На основании установлены также полупроводниковые элементы (кристалл вычислителя, преобразователь напряжения, солнечная батарея), а также емкостный накопитель и жидкокристаллический индикатор. Все элементы закрыты металлическими крышками; со стороны, где расположены индикатор и солнечная батарея, крышка имеет вырезы под них. Соединение ИС с элементами управления осуществляется с помощью гибкого печатного шлейфа. Конструкция не имеет кнопок и переключателей механического типа, все соединения осуществляются с помощью клея. Этим обусловлены простота конструкции и возможность изготовления ее с использованием ГПС, низкая стоимость, высокая надежность.

Носимые приемники радиосигналов и телевизионного изображения, а также приемопередатчики оперативной связи являются еще одной группой носимых РЭС. Конструкции некоторых носимых приемников представлены на рис. 8.70. Особенностью конструкции приемника с цифровой настройкой (рис. 8.70, а) являются отсутствие ручек для плавной перестройки частоты, наличие кнопочного поля управления и цифрового индикатора. Приемник можно использовать в качестве калькулятора. Бытовой

соединителя для подключения внешнего источника питания. Конструкция платы микрокалькулятора БЗ-18 М представлена на рис. 8.68. На одной стороне стеклотекстолитовой платы крепятся люминесцентный цифровой индикатор, ригельные (движковые) переключатели и блок кнопок управления калькулятором. На другой стороне установлены электрорадиоэлементы в дискретном и интегральном исполнении. Все вычислительные функции выполняются БИС К145ИП12, имеющей полимерную защиту, нанесенную обволакиванием. Автоматизация сборки платы и пайки ЭРЭ не предусмотрена. Этого недостатка лишена конструкция микрокалькулятора SC-06 (рис. 8.69). Основанием служит прозрачная пластина из оргстекла, на нее установлена другая прозрачная пластина из оргстекла с нанесенными на ее внут-

носимый приемник «Россия» имеет конструкцию типа «шкатулка» и переносится с помощью ручки, надеваемой на цапфы корпуса. Управление приемником осуществляется с помощью дисковых регуляторов, выступающих за пределы корпуса. Касочный приемник (рис. 8.70, в) служит для оперативной связи. Он крепится на каске вблизи уха, а в ухо вставляется микротелефон (его конструкция аналогична используемой в слуховых аппаратах).

Конструкции приемопередатчиков для оперативной радиосвязи представлены на рис. 8.71 и 8.72. Приемопередатчик в модульном исполнении (рис. 8.71) имеет функциональные узлы в виде экранированных модулей

и малогабаритную антенну. Наличие модулей улучшает ремонтпригодность, обеспечивает экранирование узлов, защиту от климатических и механических воздействий. Малогабаритная антенна, которая конструктивно представляет собой излучатель в виде спирали (цилиндрической, конической, плоской) или в виде пластин, имеет также элементы подстройки в виде индуктивностей и емкостей. В качестве индуктивности часто выступает контур в виде витка, величину которого можно менять пайкой отвода. В качестве емкостей используются либо дискретные конденсаторы, распределенные по виткам спирали, либо миниатюрные конденсаторы переменной емкости. Динамический громкоговоритель и элементы управления располагаются в верхней части корпуса.

Конструкция приемопередатчика на дискретных ЭРЭ и ИС (см. рис. 8.72) отличается свободной компоновкой. Как и в предыдущей конструкции, применена малогабаритная антенна. Экранирована только часть узлов, что облегчает доступ к отдельным ЭРЭ. Для облегчения замены ИС и частотно-задающих Узлов (кварцевых резонаторов) предусмотрены розетки разъемных

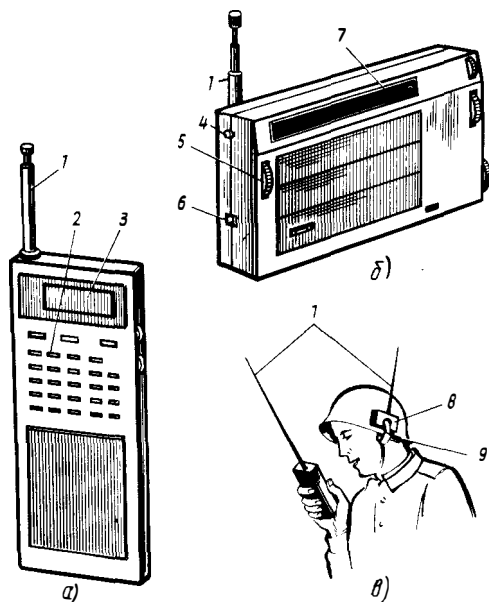


Рис. 8.70. Конструкции носимых приемников:

- а — карманного для оперативной связи; б — носимого бытового типа «Россия»; в — касочного; 1 — штыревая антенна; 2 — кнопки цифровой настройки; 3 — цифровой индикатор на ЖК; 4 — цапфа для ручки; 5 — элемент управления; 7 — шкала настройки приемника; 8 — касочный приемник; 9 — наушники

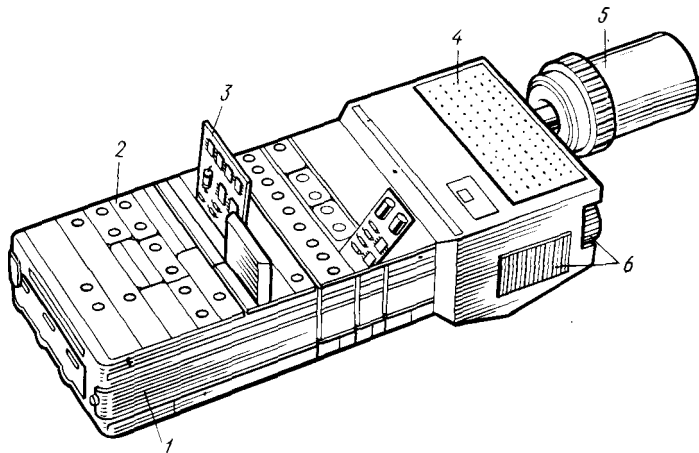


Рис. 8.71. Конструкция приемопередатчика модульной конструкции со снятой крышкой:

1—пластмассовый корпус; 2—экранированный модуль функционального узла; 3—плата функционального узла; 4—отсек для микрофона и динамика; 5—антенна; 6—элементы управления

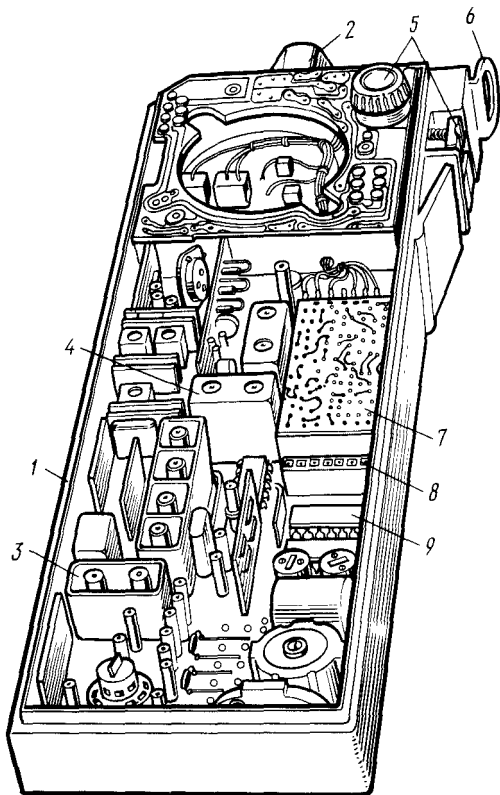


Рис. 8.72. Конструкция приемопередатчика со снятой крышкой и динамиком:

1—пластмассовый корпус; 2—антенна на элементах с сосредоточенными параметрами; 3—экран; 4—экранированный модуль; 5—элементы управления; 6—серьга для крепления лямки; 7—печатная плата функционального узла; 8—контактная колодка для сменного узла; 9—ИС

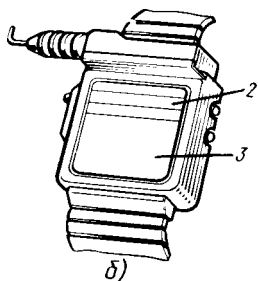
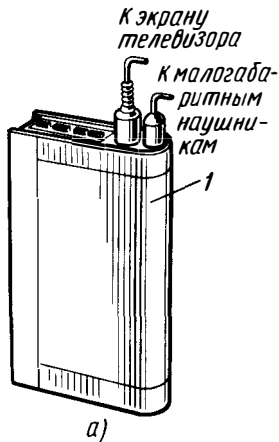


Рис. 8.73. Портативный телевизор с экраном на жидком кристалле, вмонтированном в корпус часов:

а — общий вид; б — конструкция экрана; 1 — электронный блок; 2 — индикатор часов; 3 — экран телевизора

соединителей. Оба рассмотренных приемопередатчика, как правило, помещаются в футляр из кожзаменителя и переносятся на ремне через плечо.

Внешний вид карманного цветного телевизора (Япония, фирма «Seiko») представлен на рис. 8.73. Особенностью конструкции является разделение всей конструкции на три узла: электронный блок, малогабаритные наушники и экран, размещенный в корпусе часов. Электронный блок с источником питания и встроенной антенной имеет вид записной книжки, помещается в кармане и соединяется с наушниками и экраном с помощью миниатюрных кабелей. Экран выполнен на жидком кристалле.

В телевизионном приемнике, приведенном на рис. 8.74 (Япония; фирма «Sony»), используется плоская электронно-лучевая трубка. Изоб-

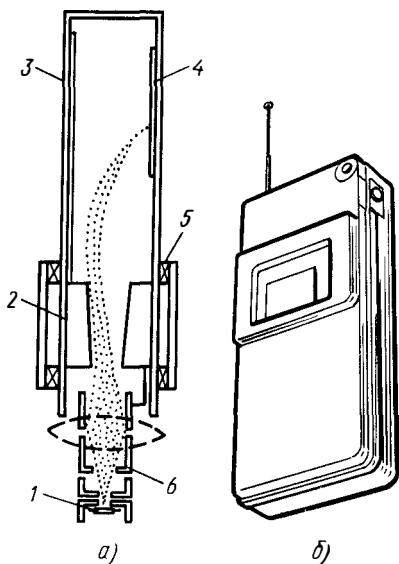


Рис. 8.74. Портативный телевизор с экраном на плоской электронно-лучевой трубке:

а — конструктивная схема; б — общий вид; 1 — катод; 2 — отклоняющий электрод; 3 — прозрачный проводящий электрод (окно); 4 — экран; 5 — строчная отклоняющая система; 6 — фокусирующие электроды электронного прожектора

ражение наблюдается через прозрачное окно, расположенное над экраном. К недостаткам конструкции следует отнести большую потребляемую мощность, необходимость герметизации корпуса, массу 540 г. Размеры телевизора 197×87×30 мм.

§ 8.6. Особенности конструкций бортовых РЭС

К бортовым относятся РЭС, устанавливаемые на воздушных шарах, дирижаблях, вертолетах, беспилотных летательных аппаратах, дозвуковых и сверхзвуковых самолетах, больших и малых ракетах, космических объектах (искусственных спутниках Земли, пилотируемых станциях, многоразовых транспортных космических кораблях, межпланетных автоматических станциях). На характер конструкции бортовых РЭС оказывают влияние различные ограничения: характер размещения РЭС на объекте установки, необходимость минимизации массы и габаритов, обеспечение заданной надежности при воздействии дестабилизирующих факторов, наличие типовых конструкций.

Размещение бортовых РЭС на объекте установки может быть централизованным и децентрализованным. Централизованно могут размещаться блоки РЛС (см. рис. 7.5), блоки вычислительной системы или системы управления каким-либо объектом (например, двигателем). Но и в этих случаях отдельные узлы могут быть вынесены (индикатор РЛС — на пульт перед летчиком, датчики и исполнительные механизмы — к управляемому агрегату). Централизованному расположению всех узлов бортовых РЭС мешают несущие конструкции объекта установки, отдельные агрегаты (двигатели, баки с горючим, различное оборудование), грузовые и другие отсеки, различные коммуникации (трубопроводы, кабели), а в ряде случаев (при модернизации объекта установки) размещение РЭС в подвесных контейнерах за пределами основного объекта.

Децентрализация размещения блоков по объекту установки требует организации дополнительных линий связи, использования соединителей и принятия мер по обеспечению электромагнитной совместимости (экранирование, согласование линий связи и т. д.). Пример децентрализованного размещения РЭС на самолете F-16 (США) приведен на рис. 8.75. Но даже и в этом случае блоки (1—3) размещены централизованно в хвостовой части самолета. Другим примером децентрализованного размещения РЭС является связной спутник «Молния-1» (рис. 8.76).

Минимизация массы бортовых РЭС обусловлена стремлением снизить транспортные расходы авиационных РЭС, а также стоимость запуска космических РЭС (стоимость вывода на орбиту Земли массы 1 кг для ракеты «Сатурн-5» составляет 10 000 долл., а для ракеты «Титан-3» — 20 000 долл., т. е. значительно дороже самих РЭС). Уменьшая массу самолетных и космических

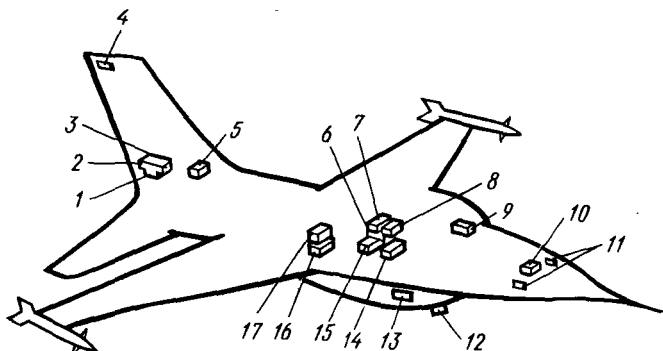


Рис. 8.75. Размещение системы «Rapport-3» на самолете F-16:

1—антенны передатчика помех в хвостовом отсеке; 2—усилитель мощности; 3—передатчик имитационных помех в хвостовом отсеке; 4, 11—антенны пеленгатора; 5, 10—приемники пеленгатора; 6—усилитель мощности; 7—задающий генератор; 8—передатчик имитационных помех в носовом отсеке; 9—блок управления и индикации; 12—антенна приемника диапазона частот 0,5...2 ГГц; 13—антенны передатчика помех в носовом отсеке; 14—приемник диапазона частот 0,5...2 ГГц; 15—процессор; 16—блок управления приемником диапазона частот 2...8 ГГц; 17—приемник диапазона частот 2...8 ГГц

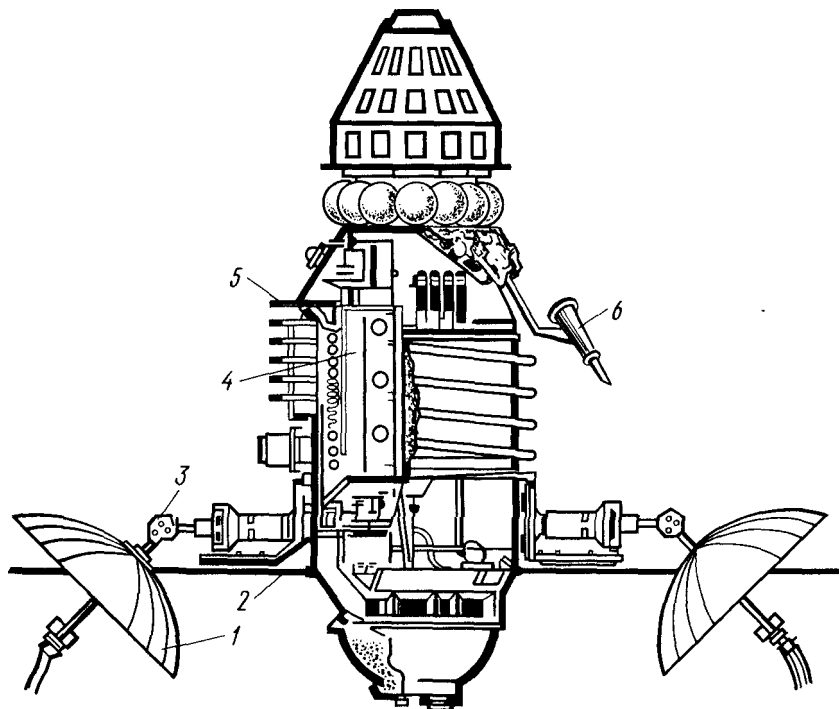


Рис. 8.76. Компоновка спутника «Молния-1»:

1—антенны ретранслятора; 2—солнечные батареи; 3—привод антенны; 4—блоки РЭС; 5—корпус; 6—телевизионная камера с системой самонаведения

РЭС, можно увеличить массу полезного груза, либо дальность полета при тех же затратах, либо снизить транспортные расходы.

Минимизация габаритов обусловлена ограниченностью объема объектов авиационного и космического назначения. Минимизировать массу и габариты можно, увеличивая плотность компоновки конструкции и используя для несущих конструкций материалы с малой плотностью (алюминиевые, магниевые, титановые и другие сплавы, полимерные материалы и композиции).

На бортовые РЭС могут воздействовать различные климатические и механические факторы (см. рис. 3.2; § 4.1; табл. 5.1, 8.6). К климатическим факторам относятся влажность и температура. Диапазон изменения температур окружающей среды для бортовых РЭС шире, чем для наземных, так как зависит от высоты над поверхностью Земли. Высокие температуры могут иметь место в результате трения обшивки сверхзвуковых самолетов и ракет о плотные слои воздуха. Сам объект установки РЭС может являться источником высоких температур (двигатели) и низких температур (баки с охлажденным горючим). К повышению температуры может приводить и тепловыделение самих РЭС. Влажность окружающей среды может меняться в широких пределах — от минимальной (в салоне пассажирского самолета) до максимальной (РЭС, установленная вне герметизированной кабины). Для самолетных РЭС особое значение имеет изменение атмосферного давления (при разгерметизации кабины), что требует прочных гермокорпусов. Кроме того, понижение атмосферного давления приводит к уменьшению электрической прочности

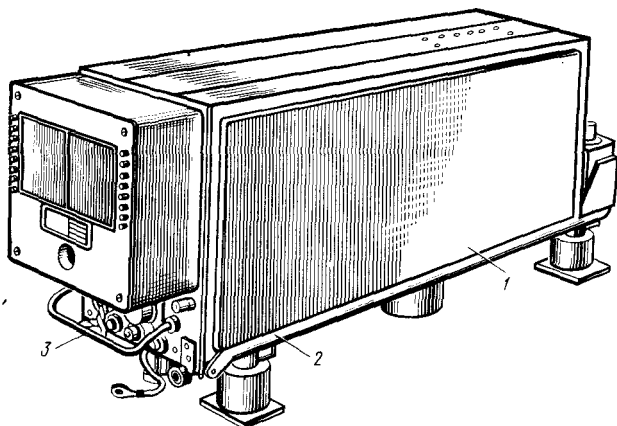


Рис. 8.77. Конструкция блока РЭС самолетов гражданской авиации:
1 — блок; 2 — амортизационная рама; 3 — ручка

Параметры дестабилизирующих факторов, воздействующих на авиационные, ракетные и космические РЭС
[2, 5, 6, 11, 13, 14, 16, 20]

Параметр	Самолеты, вертолеты	Аварийная аппаратура	Ракеты		Космические объекты
			большие	малые	
Вибрация:					
диапазон частот, Гц	5...2000	10...70	10...3000	50...5000	1,5...2500
перегрузка, м/с ²	---	19,6...34,3	До 400	До 300	4,9...58,9
амплитуда, мм	0,15...25	—	—	—	—
Удары:					
длительность, мс	15	—	10...12	10...12	—
число ударов	18	500	—	—	—
перегрузка, м/с ²	58,8...300	736	500	1000	—
Линейное ускорение, м/с ²	До 50	—	50...150	300...500	—
Диапазон частот акусти- ческих воздействий, Гц	50...10 000	—	50...10 000	50...10 000	—
Звуковое давление, дБ (Вт/м ²)	До 170(10 ⁵)	—	До 200(10 ⁸)	До 190(10 ⁷)	—
Диапазон температур, °С	-70... +295	-72... +33	-65... +164	-65... +164	—
Воздействие пониженного давления, Па	(2...101) · 10 ³	(2...101) · 10 ³	(0,13...101) · 10 ³	(0,13...101) · 10 ³	(0,13...101) · 10 ³
Повышенная влажность, % (при температуре, °С)	93...100 (+47...+57)	98 (+40)	100 —	100 —	—
Время выдержки, сут	4...7	—	—	—	—

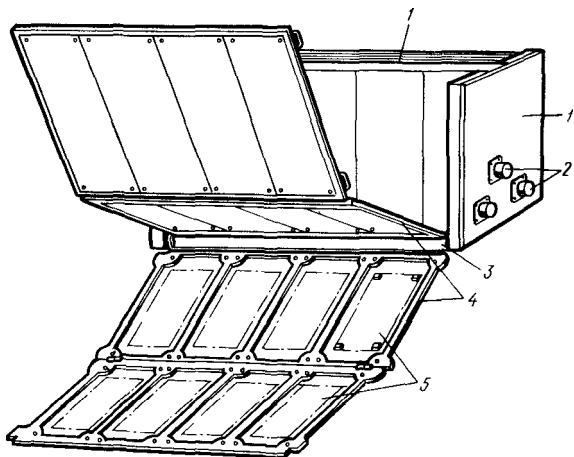


Рис. 8.78. Блок РЭС самолетов гражданской авиации с развернутыми ячейками: 1 — каркас; 2 — соединители; 3 — шарнир; 4 — рама ячейки; 5 — печатные платы

воздуха, минимум которой соответствует высоте 22 000...24 000 м. Возникающие при коронном разряде озон и азотистые соединения (при наличии влаги) могут вызвать коррозию. Коронный разряд может привести к сбою в работе РЭС. Существенным климатическим фактором для бортовых РЭС является возможность резких перепадов температуры (тепловых ударов), для самолетных РЭС: от -60 до $+150$ °С. Это накладывает определенные ограничения на ТКЛР соединяемых компонентов (см. гл. 4).

Механические динамические воздействия объекта установки обусловлены работой двигателя, перегрузками при маневрировании, аэродинамическим торможением при вхождении в плотные слои атмосферы. Большие ударные перегрузки могут возникнуть при старте малых ракет, выстреле управляемого снаряда из

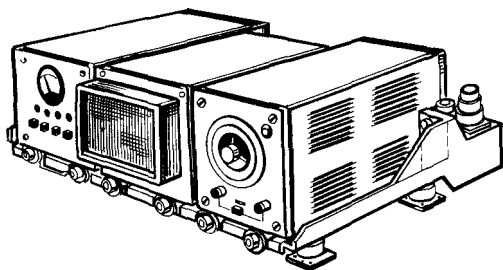


Рис. 8.79. Блоки самолетного РЭС на общей амортизационной раме

пушки, реакции материала при снятии перегрузки. Пренебречь механическими воздействиями можно лишь для РЭС, устанавливаемых на воздушных шарах и дирижаблях, имеющих малую скорость движения.

РЭС для ИСЗ и межпланетных космических станций должны отвечать дополнительным требо-

ваниям: безотказности (длительности службы без обслуживания и ремонта), работоспособности в условиях вакуума и больших циклических перепадов температуры, устойчивости к воздействию радиации. Ракетные РЭС обычно одноразового пользования (это позволяет выполнять их неремонтопригодными), приспособлены к кратковременной предстартовой проверке, в них предусмотрены возможность быстрой замены РЭС в случае неисправности, длительность срока хранения, устойчивость к механическим перегрузкам (при старте, торможении, маневрировании), они устойчивы к термоударам. Наибольший эффект при конструировании бортовых РЭС дает использование базовых конструкций, которые имеют специфику для РЭС гражданской авиации и РЭС специального назначения (космической, ракетной).

РЭС самолетов гражданской авиации (рис. 8.77, 8.78, 8.79), выполненные на дискретных электрорадиоэлементах и корпусированных ИС малой и средней степени интеграции, относятся к аппаратуре третьего поколения. Они имеют негерметичный корпус, в котором размещены платы с элементами. Размеры корпусов самолетных РЭС стандартизованы (табл. 8.7).

Для защиты от механических воздействий блоки устанавливают на амортизационной раме (см. рис. 5.21, 8.77, 8.79). Подключение блоков осуществляется с помощью врубного соединителя. Для быстрого закрепления используют накладные болты с гайками, установленные со стороны передней панели. Это облегчает замену блоков при выходе их из строя. К дополнительным мерам защиты от механических воздействий относится крепление плат винтами, увязка жгутов нитками, крепление жгутов скобами и т. д. (см. гл. 5). Особое внимание следует уделять правильной установке компонентов в соответствии с нормативной документацией. Это требует формовки выводов, установки компонентов на дополнительные упоры, использования приклейки, заливки (на-

Таблица 8.7

Параметры корпусов самолетных РЭС гражданской авиации

Типоразмер ширины корпуса	Ширина корпуса В, мм	Объем корпуса, дм ³ , при высоте H=194 мм (H=88 мм) в зависимости от типоразмера по длине			
		M (261,5)	K (320,5)	C (421,5)	D (498,5)
1	57	2,8(1,3)	3,5(1,6)	4,6	5,5
1,5	90,5	4,4(2,0)	5,6(2,5)	7,4	8,7
2	124	6,0(2,7)	7,7(3,5)	10,1	12,0
2,5	157	7,6	9,5	12,8	15,2
3	190,5	9,2	11,8	15,6	18,4
4	257,0	12,5	16,0	21,0	24,8
5	324,0	—	20,0	26,5	31,3
6	390,5	—	24,2	31,9	37,8

пример, пенокомпаундом) некоторых узлов и т. д. Места пайки проводников могут крепиться специальными захватами (наконечниками).

Для защиты от влаги платы и места паяк покрываются лаком, дискретные компоненты имеют корпусированную защиту или обволакиваются компаундами. Охлаждение осуществляется за счет естественной конвекции или принудительно с применением встроенных вентиляторов. Естественная конвекция усиливается при использовании радиаторов.

Для повышения ремонтпригодности находят применение конструкции типа «книжка-раскладушка» (рис. 8.78), что одновременно повышает надежность конструкции и способствует снижению массы и габаритов благодаря исключению соединителей в межплатных связях. Перспективным технологическим приемом является выполнение плат на основе полиимидной пленки (рис. 8.80). Иногда все коммутационные платы и соединяющие их шлейфы изготавливают в едином технологическом цикле. Это позволяет отказаться от использования межплатных шлейфов и их контактирования, что также повышает надежность РЭС. Обеспечение ремонтпригодности (доступности элементов) достигается благодаря использованию конструкций с «двойным»

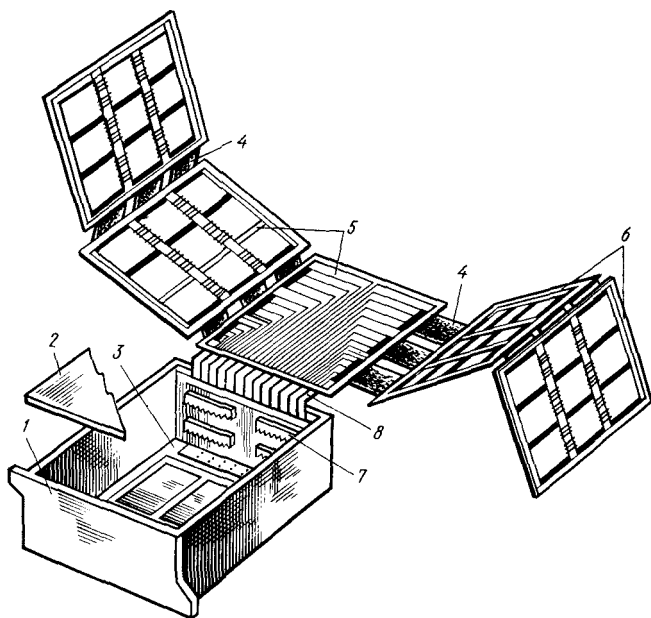


Рис. 8.80. Общий вид блока бортовой ЭВМ:

1—гермокорпус; 2—крышка; 3—плата вторичного источника электропитания; 4—печатный шлейф; 5—коммутационная плата на основе полиимидной пленки; 6—рамка ячейки; 7—соединитель для внешних связей; 8—плоский кабель

шарниром (рис. 8.81), в которых применяются платы с одинарным шарниром (рис. 8.82), а также «верные» блоки с угловым шарниром (рис. 8.83). Обе эти конструкции не имеют соединителей, а электрические соединения осуществляются пайкой жгутов объемных проводников, плоских кабелей или шлейфов. В конструкции рис. 8.81 связи работают на изгиб, а в конструкции рис. 8.83 — на кручение.

В обоих случаях после установки плат в рабочее положение они закрепляются в несущей конструкции винтами. Несмотря на то что в бортовых РЭС гражданской авиации используются миниатюрные эле-

ктрорадиоэлементы и корпусированные ИС малой и средней степени интеграции, а также отсутствуют соединители в межплатных связях, плотность компоновки таких блоков невелика ($1,5...2,5$ элем./см³).

Бортовые РЭС четвертого поколения (авиакосмические, ракетные) имеют значительно более высокую плотность компоновки (до 40 элем./см³) в результате: 1) отказа от индивидуальной герметизации ЭРЭ и ИС (перехода на бескорпусные ИС, резисторы, конденсаторы) и герметизации всего блока;

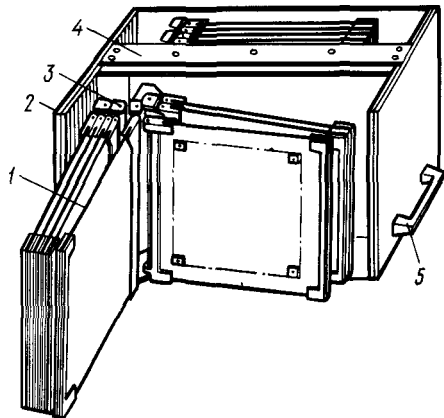


Рис. 8.81. Блок «книжной» конструкции бортового РЭС третьего поколения (на корпусированных ИС):

1 — набор ячеек, шарнирно соединенных между собой; 2 — задняя панель; 3 — двойной шарнир; 4 — блок питания; 5 — ручка

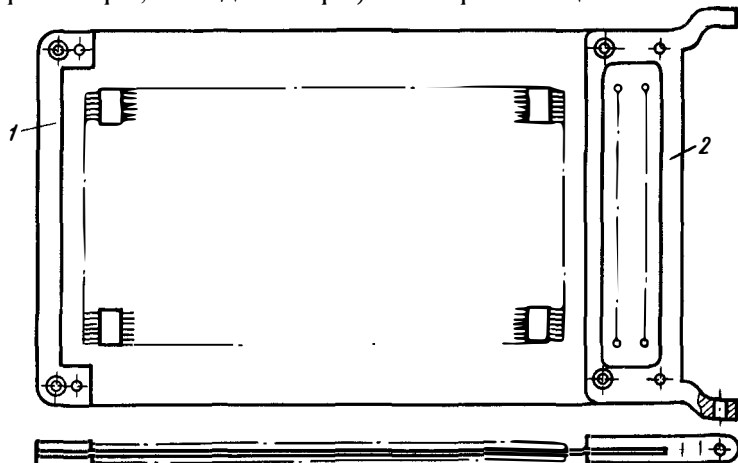
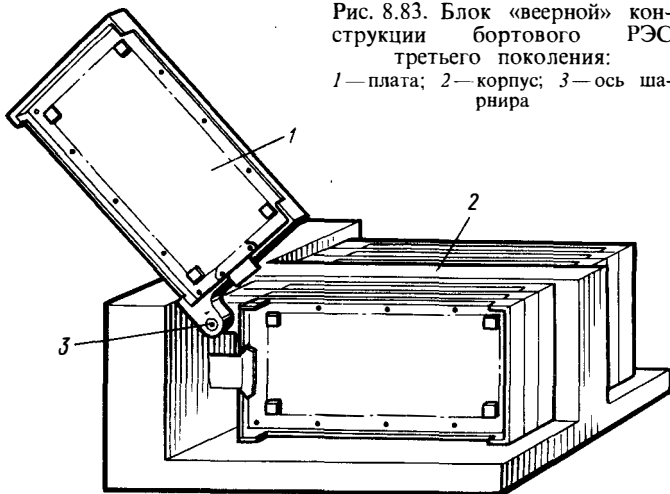


Рис. 8.82. Конструкция ячейки для бортового РЭС с шарнирами:

1 — накладка; 2 — накладка с шарнирами

Рис. 8.83. Блок «верной» конструкции бортового РЭС третьего поколения:

1—плата; 2—корпус; 3—ось шарнира



2) применения ИС повышенной степени интеграции; 3) увеличения плотности компоновки функциональных узлов в составе блока (см. рис. 7.10); 4) повышения плотности электромонтажа плат и межплатной коммутации; 5) использования конструкций, позволяющих интенсифицировать теплоотвод; 6) применения микромощной элементной базы (уменьшаются объем и масса системы охлаждения и системы питания).

В конструкциях бортовых РЭС специального назначения бескорпусные ИС и ЭРЭ могут устанавливаться на коммутирующие основания из ситалла, полиимидной пленки, керамики, анодированного алюминия (для источников питания). Полученные при этом микросборки устанавливаются на теплоотводящие шины, соединенные с рамкой ячейки.

Исторически первыми были использованы коммутирующие основания микросборок размером 24×30 мм из ситалла с напыленными на них проводниками. Конструкция ячейки, предназначенная для установки шести микросборок размером 24×30 мм, представлена на рис. 8.84. Ее габаритные размеры $78 \times 95 \times 5$ мм, а размер монтажного поля $64 \times 74,5$ мм. Под те-

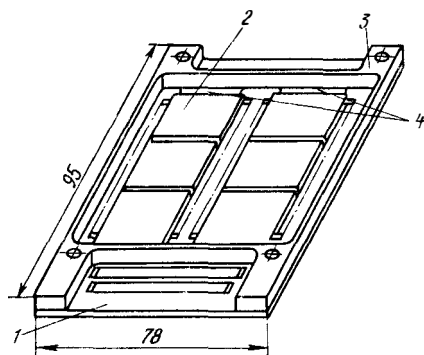


Рис. 8.84. Конструкция ячейки РЭС специального назначения:

1—печатная плата; 2—подложка микросборки с бескорпусными элементами; 3—теплоотводящая рамка; 4—теплоотводящие шины

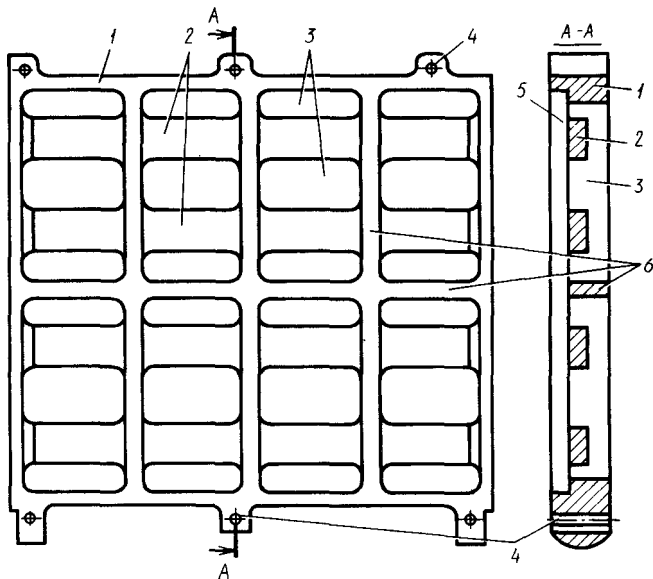


Рис. 8.85. Конструкция фрезерованной теплопроводящей рамки:

1 — рамка; 2 — теплопроводящие шины; 3 — вырезы для доступа к печатной плате; 4 — отверстие под болты крепления пакета ячеек; 5 — ниша для размещения печатной платы; 6 — ребро жесткости

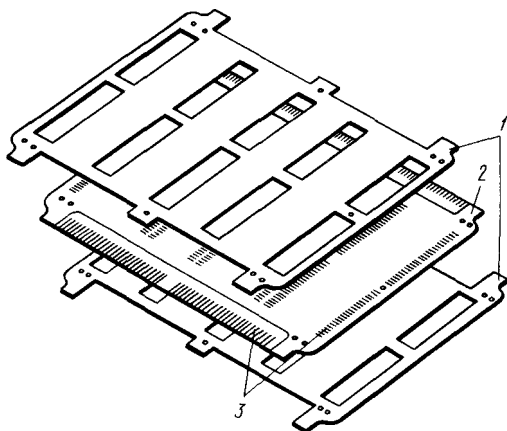


Рис. 8.86. Конструкция ячейки с теплопроводящими шинами, расположенными с двух сторон печатной платы:

1 — теплопроводящие шины из листа алюминиевого сплава; 2 — печатная плата; 3 — контактные площадки для внешних связей

пловыми шинами размещается печатная плата, на которой реализованы соединения между микросборками. Плата отделена

от рамки и тепловых шин изолирующей прокладкой. Соединение установленных на тепловые шины микросборок с печатной платой осуществляется пайкой объемных проводников без изоляции (диаметр 10 ... 40 мкм), подходящих к плате через окна между тепловыми шинами и окна в изолирующей прокладке. Конструкция рамки, выполненной вместе с теплоотводящими шинами фрезерованием, представлена на рис. 8.85. Теплоотводящие шины могут не иметь рамки (рис. 8.86), но жесткость и прочность конструкции в этом случае меньше.

Теплоотводящие шины и рамка ячейки могут выполняться из алюминиевого, магниевое или титанового сплава. У алюминиевого и магниевое сплавов выше коэффициент теплопроводности и меньше плотность, а титановый сплав прочнее. В мелкосерийном производстве рамки с шинами выполняются фрезерованием на станках с ЧПУ, а в серийном — литьем под давлением из алюминиевого или магниевое сплава. Кроме рамок размером 78×95 мм используются рамки удвоенного 158×95 мм (рис. 8.87) и утроенного 238×95 мм (рис. 8.88) размера. Последний тип ячеек используется для создания конструкции РЭС с тройным резервированием. Могут использоваться и другие типоразмеры ячеек. Ячейка (см. рис. 8.88) имеет три конструктивных уровня электрических связей: подложка гибридной ИС, многослойная полиимидная плата канала, двусторонняя плата для реализации мажоритарных связей между каналами. Плата изолирована от рамки изоляционной прокладкой, в которой имеются окна для подключения проводников от полиимидных плат каналов. Для повышения вибростойкости печатная плата, многослойная полиимидная плата и микросборка крепятся с помощью вязкоупругого клея или компаунда (КВК-68, КТ-102 и др.).

Для соединения с внешними устройствами на печатных платах ячеек предусмотрены поля для размещения выполненных печатным способом контактных площадок под пайку размером $0,3 \times 2$ мм, расположенных в несколько рядов с шагом 1,25 мм. Кроме того, имеются металлизированные отверстия для подключения шин питания.

Выделяющаяся в микросборках теплота отводится через теплоотводящие шины на рамку, с которой через стяжные болты передается на корпус блока. При удельном тепловыделении $15 \dots 20$ Вт/дм³ блок охлаждается путем естественной конвекции. При большем удельном тепловыделении блок устанавливается на охлаждаемое жидкостью основание или теплота от корпуса отводится с использованием тепловых труб (см. рис. 7.29).

Дальнейшее увеличение плотности компоновки (см. табл. В.2) достигается благодаря использованию бескорпусных БИС и установке их на коммутирующие основания из многослойной поли-

имидной пленки (см. рис. 2.10) или многослойной керамики (см. рис. 2.11).

Полиимидная пленка (для обеспечения эффективного теплоотвода и жесткости конструкции) располагается на сплошном

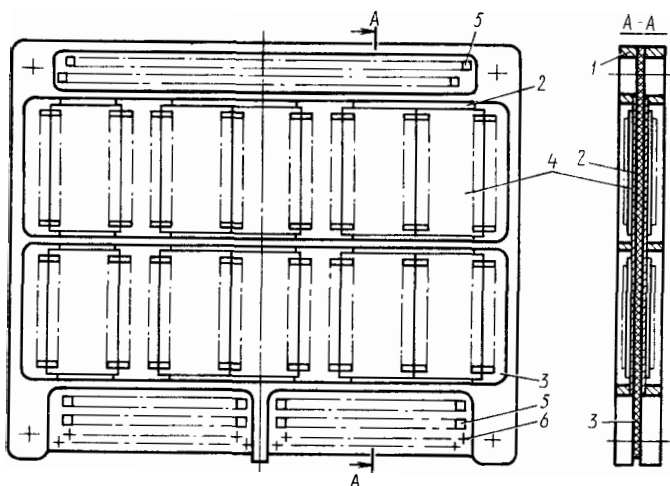


Рис. 8.87. Конструкция ячейки РЭС четвертого поколения с двусторонней установкой микросборок:

1—теплоотводящие рамки; 2—теплоотводящие шины; 3—печатная плата; 4—микросборка; 5—контактные площадки для внешних связей; 6—контактные отверстия для внешних связей

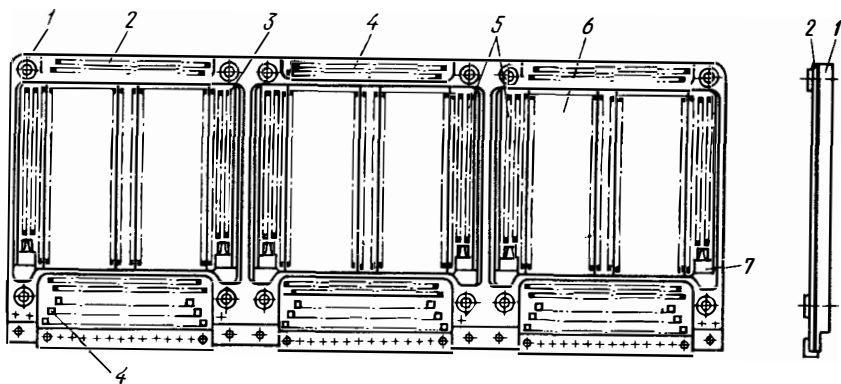


Рис. 8.88. Конструкция ячейки РЭС четвертого поколения размером 238×95 мм для размещения элементов логической схемы, выполненной по принципу утренно-го резервирования:

1—металлическая рамка; 2—печатная плата для реализации мажоритарных связей; 3—полиимидная плата для обеспечения электрических связей между микросборками; 4—контактное поле для внешних связей; 5—контактное поле для подключения полиимидной платы к микросборкам и к печатной плате с мажоритарными связями; 6—микросборка

основании из алюминиевого сплава. Устойчивость к термоударам обусловлена близостью ТКЛР полиимидной пленки и алюминиевого основания, эластичностью пленки, компенсирующей разницу ТКЛР пленки и кремниевого кристалла. Бескорпусные БИС монтируются непосредственно на полиимидную пленку и крепятся с помощью клея МК-400. Пример знакоместа на полиимидной плате для монтажа бескорпусных БИС на ленточном носителе (см. рис. 1.20) представлен на рис. 8.89, *а*. На знакоместо может быть установлена либо одна БИС (рис. 8.89, *б*) с 64 выводами (размером 11×11 мм при шаге выводов $0,625$ мм) либо несколько ЭРЭ меньшего размера (рис. 8.89, *в*).

Путем расчетов и конструкторской проработки установлено, что при установке бескорпусных 64-выводных БИС (кристалл размером 5×5 мм, пленочный носитель $7,6 \times 7,6$ мм) получается плотность компоновки ячейки такая же, как на кремниевой пластине диаметром 76 мм, имеющей набор аналогичных БИС размером 5×5 мм и вписывающейся в ячейку размером 78×95 мм (рис. 8.90).

Компоновка функциональных узлов, размещенных на керамическом основании, показана на рис. 8.91 и 8.92, на рис. 8.91 — компоновка аналого-цифрового преобразователя, в состав которого входят цифровые БИС и дискретные элементы, на рис. 8.92 — цифрового функционального узла. Отвод теплоты от подложки в зависимости от плотности теплового потока может быть выполнен конвекцией (естественной или принудительной, воздушной, жидкостной), а также за счет теплопроводности.

Бескорпусные БИС герметизируются в составе блока (см. рис. 4.18; 4.19), особое внимание уделяется герметизации внешних выводов и соединителей.

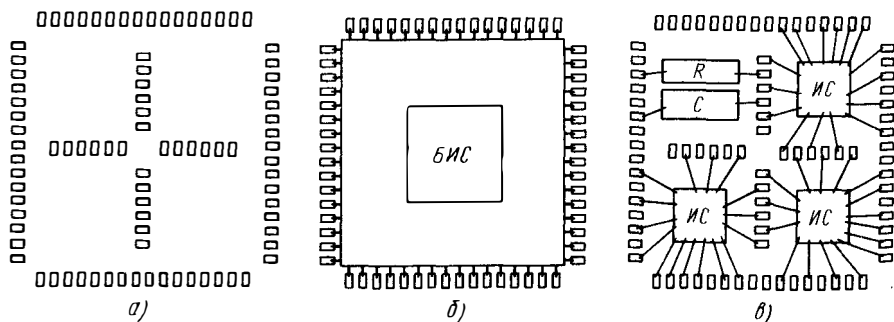


Рис. 8.89. Установка бескорпусных ЭРЭ на полиимидную печатную плату: *а* — знакоместо для установки разногабаритных ЭРЭ; *б* — знакоместо с установленной на нем БИС с 64 контактами на пленочном носителе; *в* — пример установки на знакоместо, на котором установлены ИС с гибкими выводами и дискретные электрорадиоэлементы

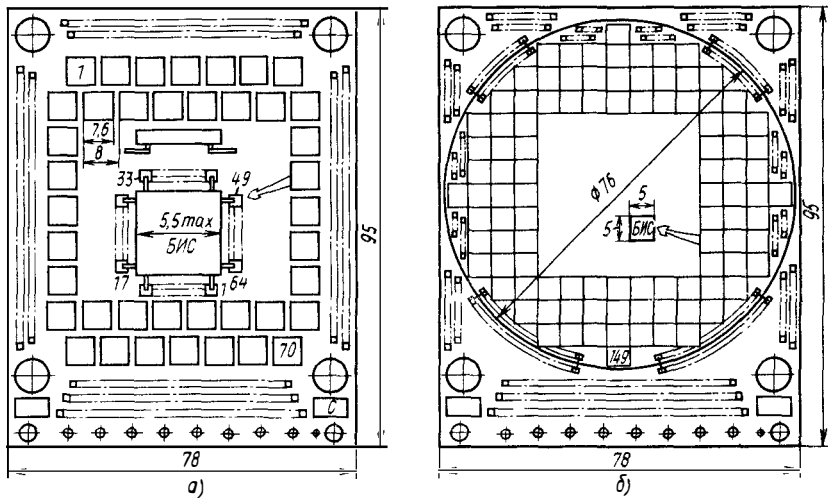


Рис. 8.90. Компоновка ячеек РЭС специального назначения одинаковой функциональной сложности на многослойной полиимидной пленке (а) и на полупроводниковой пластине (б)

Межплатные электрические соединения реализуются с помощью резиновой матрицы (см. рис. 2.14) либо гибкими печатными шлейфами на основе полиимидной пленки (см. рис. 8.80) и переходной многослойной платы (рис. 8.93; 8.94). Введение переходной платы (рис. 8.94) обусловлено тем, что гибкие печатные шлейфы имеют проводники, выполненные в виде параллельных линий на одной или двух сторонах шлейфа, а многослойная переходная печатная плата позволяет соединить проводники, расположенные на обеих сторонах нескольких печатных шлейфов.

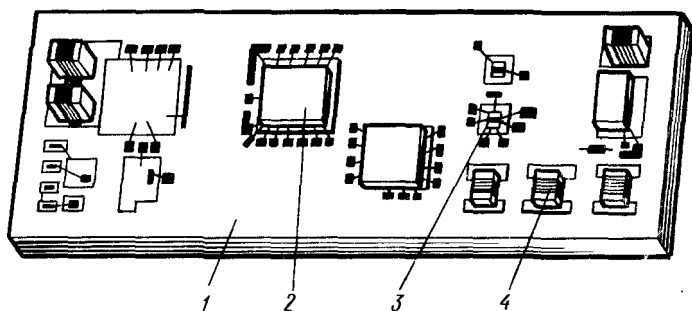


Рис. 8.91. Конструкция микросборки аналого-цифрового преобразователя на керамическом основании
1 — керамическое основание; 2 — БИС; 3 — ИС; 4 — ЭРЭ

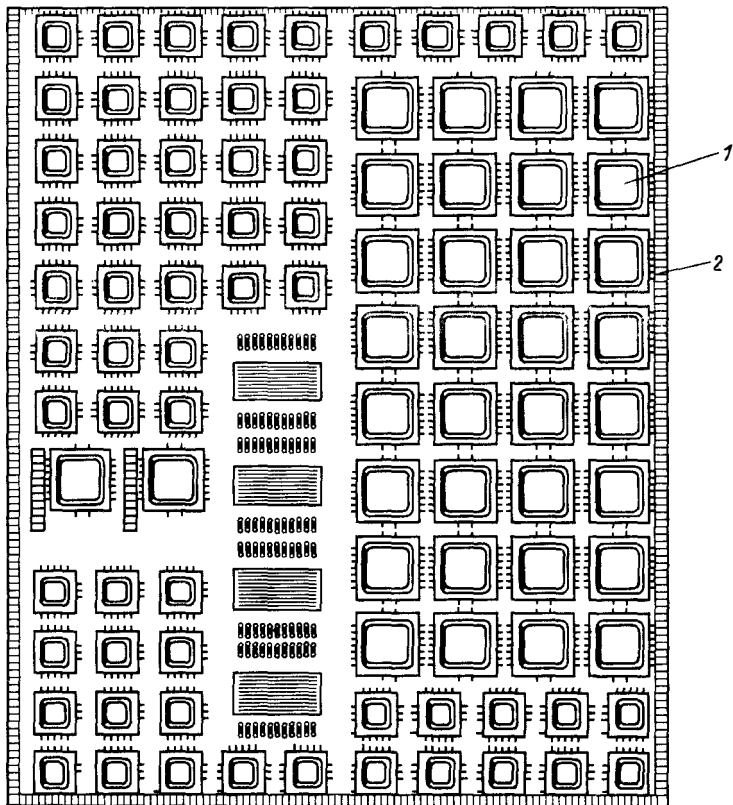


Рис. 8.92. Конструкция узла РЭС четвертого поколения на основе керамической платы размером 100×120 мм с установленными на ней микрокорпусами:
 1—БИС в микрокорпусе; 2—контактные площадки для подключения внешних электрических соединений

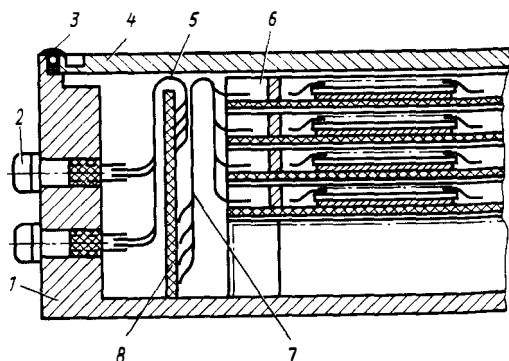


Рис. 8.93. Способы реализации межплатных электрических соединений ячейки в блоке РЭС четвертого поколения:

1—корпус; 2—низкочастотный соединитель (вид с торца); 3—паяный шов; 4—крышка; 5—гибкие печатные шлейфы от переходной платы к соединителям; 6—ячейка; 7—печатные шлейфы от ячеек к переходной плате; 8—переходная печатная плата

Контактирование гибкого печатного шлейфа с соединителем иллюстрирует рис. 8.95. Контакты на соединителе расположены в два ряда. Поэтому шлейф надрезается с краев и подрезанные части подпаиваются ко второму ряду контактов. К контактам соединителя шлейф подпаивается с помощью печатных контактных площадок, а к печатной плате — печатными проводниками, доступ к которым открыт через вытравленные в пленке шлейфа окна.

Сборка упрощается в результате отказа от пайки шлейфов и обеспечения непосредственного контактирования ячеек с помощью эластомерных соединителей (см. рис. 4.18, 8.96, 8.97). Для этого могут быть использованы эластомерные соединители типа «зебра», в которых чередуются проводящие и непроводящие слои резины (рис. 8.96), или с помощью гибких шлейфов, размещенных на эластичном основании (рис. 8.97). Однако при этом должны быть обеспечены такая начальная деформация эластомерных соединителей и такое усилие прижима плат к соединителю, чтобы контакт не нарушался при воздействии на блок вибраций и ударов.

На керамическую подложку или на полиимидную печатную плату БИС могут устанавливаться с помощью промежуточного микрокорпуса (см. рис. 1.16, 8.58—8.59, 8.92); при этом блок

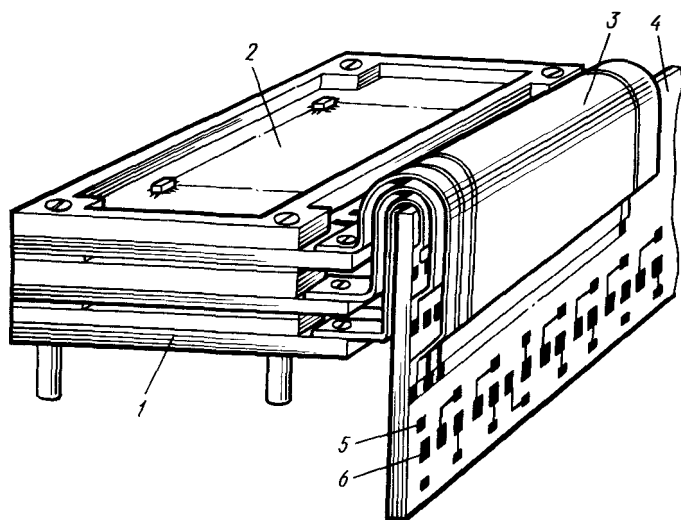


Рис. 8.94. Конструкция внутриблочного электромонтажа:

1 — многослойная печатная плата; 2 — микросборка; 3 — гибкий печатный шлейф на полиимидной пленке; 4 — многослойная переходная плата межшлейфовой коммутации; 5 — межслойные переходы; 6 — контактные площадки для внешних электрических соединений

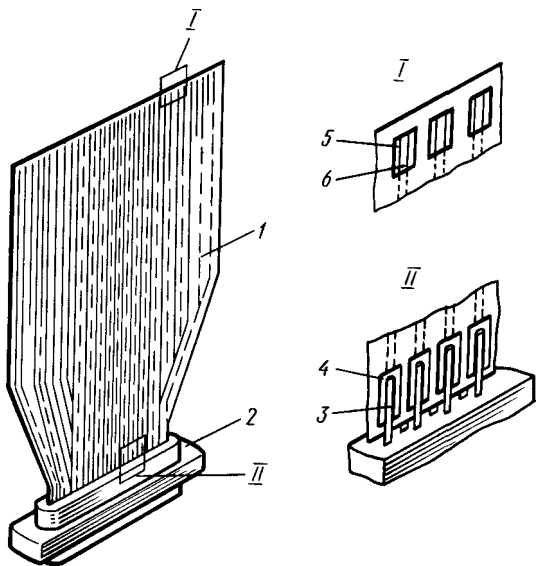


Рис. 8.95. Подсоединение гибкого печатного шлейфа к соединителю с двумя рядами контактов:
 1—гибкий печатный шлейф; 2—соединитель; 3—вывод соединителя; 4—контактная площадка на шлейфе; 5—окно для подсоединения печатного проводника к плате; 6—печатный проводник

может быть негерметичным (при условии защиты от влаги контактных соединений и электрических связей). Однако в этом случае масса и габариты блока в несколько раз больше, чем при использовании бескорпусных БИС. Тем не менее отпадают многие трудности манипулирования с бескорпусной элементной базой (не требуется обеспечения вакуумной гигиены на производственных участках сборки, достигается удобство контактирования при монтаже и установке на плату с помощью роботов и манипуляторов, снижаются требования к герметичности всего блока). При выборе материала микрокорпуса (керамика, пластмасса) необходимо учи-

тывать его теплопроводность и ТКЛР корпуса и платы (см. гл. 4).

Дополнительно повысить плотность компоновки можно, объединяя в блоке различные функциональные узлы. Повышение плотности компоновки в этом случае достигается благодаря исключению кабелей, соединителей и усилителей в межузловых связях.

Минимизация массы, габаритов и паразитных связей межплатного монтажа аналоговых блоков достигается путем размещения подложек микросборок в соответствии с последовательностью их размещения на функциональной схеме (см. рис. В.11, б). Связи между платами выполняются короткими перемычками из золотой фольги (иногда эластомерными соединителями с малым переходным сопротивлением).

Специфика несущих конструкций бортовых РЭС заключается в том, что кроме того, что они являются конструктивной основой, они являются герметизирующей оболочкой и с их помощью выполняется теплоотвод, являются основой для арматуры внешних выводов, откачного штенгеля,

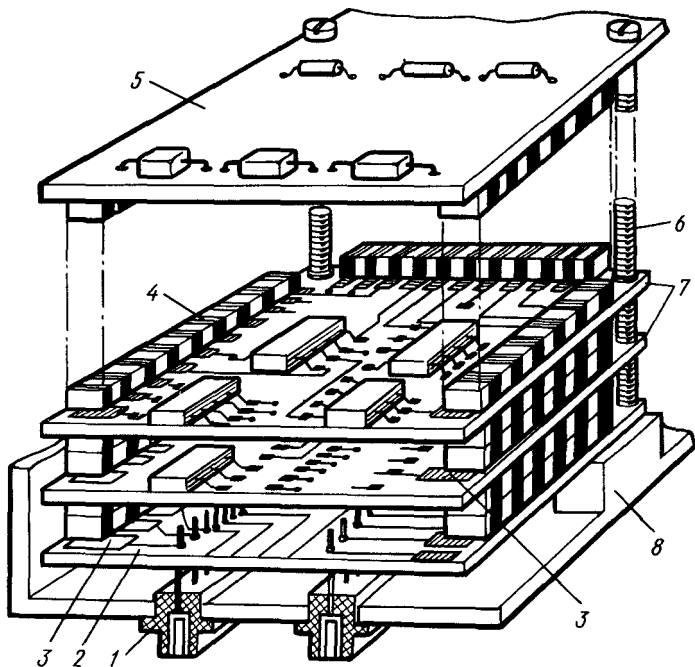


Рис. 8.96. Внутриблочная коммутация на эластичных соединителях:

1—соединитель блока для внешних связей; 2—коммутационная плата внешних соединителей; 3—контактная площадка на печатной плате; 4—эластомерный соединитель; 5—плата для соединения пакетов ячеек; 6—стяжной винт; 7—печатные платы ячеек; 8—корпус

элементов крепления к объекту установки. От массы несущей конструкции в значительной степени зависят масса и габариты бортовых РЭС, их надежность и стоимость. Обычно несущие конструкции бортовых РЭС состоят из корпуса коробчатой формы и крышки. Металлический корпус может выполняться в единичном производстве фрезерованием (рис. 8.98) из литой или ковanej заготовки на станке с ЧПУ, а в серийном производстве—прессованием (обратным выдавливанием), литьем под давлением, штамповкой. На рис. 8.99 представлена конструкция штампованного корпуса гермоблока. Штамповкой изготовлены кожух и ребра жесткости; их соединение выполнено сваркой. Штампованные корпуса имеют более тонкие стенки, и уменьшаются отходы при изготовлении.

В качестве материалов для корпусов бортовых РЭС используют алюминиевые (АМц, АМг, Д16, В95 и др.), магниевые

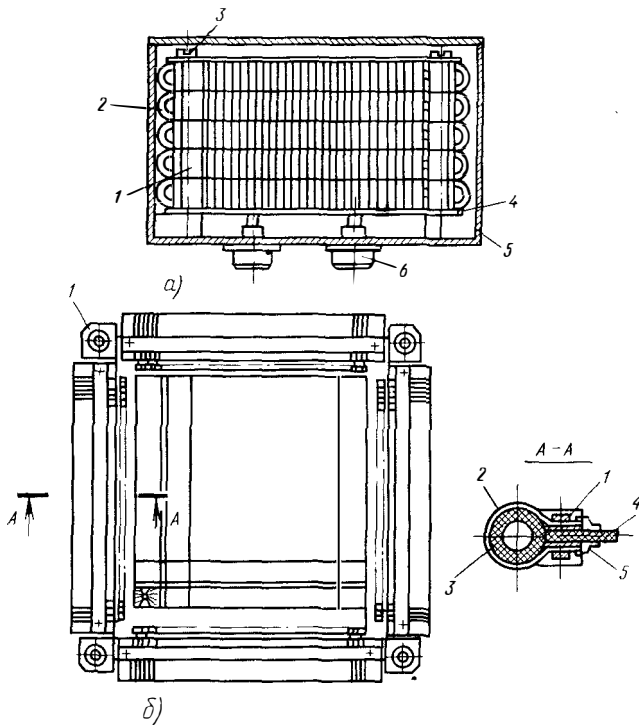


Рис. 8.97. Блок с эластичными межплатными соединителями:

a — конструкция блока: 1 — пакет ячеек; 2 — эластичный соединитель; 3 — винты для крепления пакета ячеек; 4 — коммутационная плата; 5 — корпус; 6 — гермосоединитель; 6 — конструкция ячейки: 1 — рамка; 2 — контактный шлейф; 3 — эластичное основание соединителя; 4 — печатная плата; 5 — проволочная перемычка

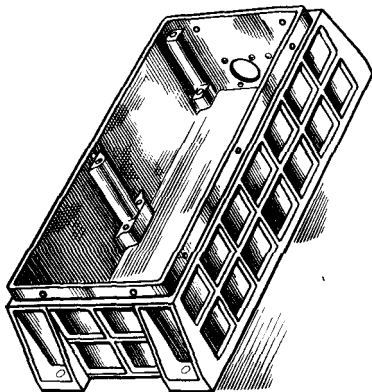


Рис. 8.98. Корпус бортового РЭС, фрезерованный из слитка (поковки)

(МА8 и др.) и титановые (ВТ1-10 и др.) сплавы. Алюминиевые сплавы хорошо проводят теплоту и поддаются формовке литьем, фрезерованием, штамповкой; элементы корпуса соединяются пайкой и сваркой. Для защиты от коррозии и облегчения пайки гермовводов корпуса из алюминиевых сплавов покрываются слоем Si-Ni-(Sn-Bi) .

Герметичное соединение крышки с корпусом достигается использованием паяного, сварного шва или прокладок из металла, резины, пластмас-

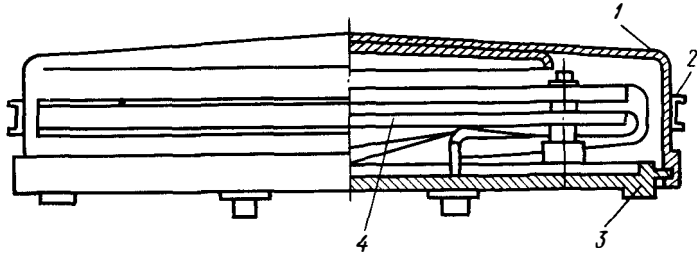


Рис. 8.99. Блок РЭС с кожухом штамповсварной конструкции:

1 — штампованный кожух; 2 — штампованные ребра жесткости; 3 — основание; 4 — пакет ячеек

сы, заливкой компаундами. Для блоков объемом до 5 дм³ чаще всего используют разъемный паяный шов (см. рис. 4.19, 8.93), что допускает разгерметизацию и повторную (до 3...5 раз) герметизацию. Это необходимо как на этапе производства (при настройке), так и при эксплуатации (ремонте). Во время пайки от корпуса осуществляется интенсивный теплоотвод во избежание перегрева элементов, находящихся внутри корпуса. При необходимости паяный шов может быть нарушен путем вытягивания проволоки за свободный конец. Сварной шов используется для неремонтопригодной аппаратуры. Иногда применяют кромки под сварку увеличенных размеров, в этом случае их можно разъединить фрезеровкой (если кромки были проварены не на всю длину) и после ремонта блока снова заварить.

Для блоков объемом более 5 дм³ чаще всего используют герметизирующие прокладки из силиконовой резины (см. рис. 4.26). Металлические прокладки (кроме индиевых) плохо работают при циклических изменениях температуры, а пластмассовые в ряде случаев имеют недостаточную упругость.

Так как любой герметизирующий шов имеет микropopы, то для исключения попадания влаги из внешней среды внутрь корпуса из него откачивается воздух и производится заполнение сухим азотом (аргоном, гелием) под избыточным давлением 0,3 МПа. Это позволяет обеспечить герметичность РЭС в течение 8...12 лет. Разъемные соединители чаще всего герметизируются путем заливки компаундом типа «Виксинт—Победа» или ПДИ-21 (см. рис. 4.24), а также опайкой. Неразъемные контакты реализуются с использованием гермовводов (см. рис. 4.22, 4.23). В тех случаях, когда не требуется влагостойкость в течение более чем 30...50 сут (РЭС, расположенные в жилом отсеке), гермокорпус может быть выполнен из полимерной композиции (например, АГ-4С). Однако при этом следует учитывать возможность выделения летучих компонентов из пластмассы внутрь гермо-

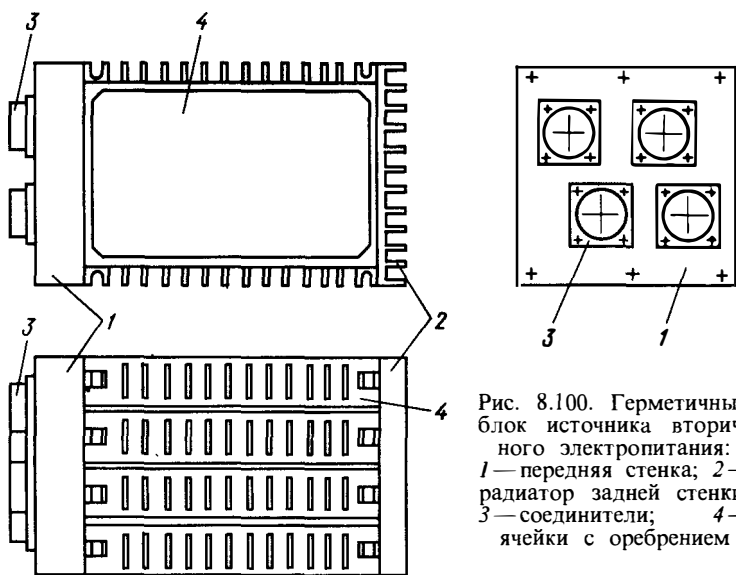


Рис. 8.100. Герметичный блок источника вторичного электропитания:
 1 — передняя стенка; 2 — радиатор задней стенки;
 3 — соединители; 4 — ячейки с оребрением

корпуса. Для исключения конденсации влаги при понижении температуры ниже точки росы, а также для поглощения агрессивных летучих веществ в гермоблоках располагают поглотители из цеолита, силикагеля, фосфорного ангидрида (рис. 4.25).

Бортовые РЭС имеют ряд особенностей обеспечения теплового режима узлов и блоков. Это обусловлено тем, что плотность их компоновки высока, а возможности теплоотвода и поглощения теплоты часто ограничены. Защита бортовых РЭС от тепловых воздействий достигается в результате принятия следующих мер: 1) уменьшения теплового сопротивления теплоотвода от источника теплоты до стока; 2) ограничения плотности компоновки компонентов и узлов с учетом возможности теплоотвода; 3) эффективной теплоизоляции от воздействия внешних источников теплоты; 4) использования элементов, потребляющих минимальную мощность, имеющих максимальный КПД, одинаковую для всех компонентов допустимую температуру. Конструкторские меры (1—3) подробно рассмотрены в гл. 3. Для интенсификации теплоотвода используют различные теплообменники.

Воздушный теплообменник (рис. 8.100) выполняется в виде оребренных стенок корпуса гермоблока. Воздушно-жидкостные теплообменники служат для отвода теплоты от гермоблока с помощью охладителя в виде плиты, охлаждаемой жидкостью. По воздушному тракту выделяющаяся теплота передается в окружающую среду. Пример конструкции воздушно-жидкостного теплообменника представлен на рис. 8.101. Жидкость и воздух подаются во взаимно ортогональные тракты, которые располо-

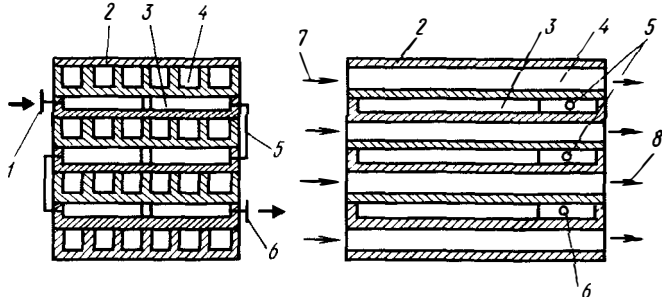


Рис. 8.101. Конструкция воздушно-жидкостного теплообменника:

1, 6—штуцера входа и выхода гидротракта; 2—крышка; 3, 4—гидротракт и воздушный тракт теплообменной ячейки; 5—соединительный трубопровод; 7, 8—вход и выход воздушного тракта

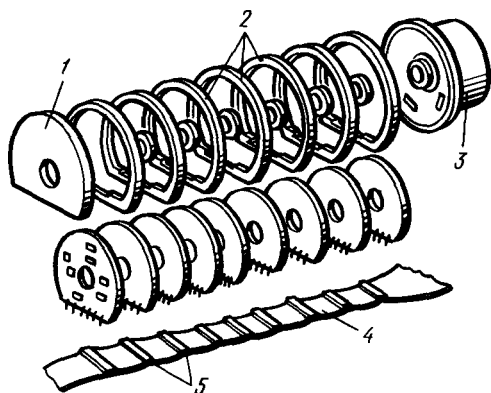


Рис. 8.102. Конструкция РЭС головки самонаведения снаряда 155-мм гаубицы (США):

1—верхняя крышка; 2—дистанционные кольца; 3—нижняя крышка; 4—соединительный шлейф, 5—ответные части соединителей

жены в соседних слоях теплообменника. Иногда для повышения эффективности в воздушном тракте перпендикулярно воздушному потоку размещают штырьки, соединяющие противоположные стенки тракта. Представленная на рис. 8.101 конструкция собрана из деталей путем их пайки (например, в солях).

Теплоизоляция бортовых РЭС от внешних источников тепла осуществляется прежде всего их разнесением, а также с помощью эффективной теплоизоляции (для космических РЭС экранно-вакуумная изоляция).

Методы обеспечения прочности и жесткости бортовых РЭС не отличаются от описанных в гл. 5. Конструкция блока управляемого снаряда (США), выстреливаемого из 155-мм га-

убицы, представлена на рис. 8.102. Блок должен выдерживать перегрузку +9000g при выстреле и -1500g при отдаче. Для увеличения жесткости плат введены дополнительно дистанционные кольца в центральной и периферийной зонах. Периферийные кольца центрируются корпусом снаряда, а центральные — полым стержнем в центре блока, через который проходит трубопровод охладителя. Межплатный монтаж осуществляется с помощью гибкого печатного шлейфа, прокладываемого с одной стороны всех плат. Это позволяет автоматизировать монтаж блока.

При разработке конструкции бортовых РЭС специального назначения широко используют унифицированные конструкторские решения, определенные отраслевыми стандартами. Так, блоки для цифро-аналоговых РЭС (см. рис. 8.99) имеют высоту от 80 до 140 мм, высота пакета ячеек составляет от 40 до 100 мм. Масса корпуса составляет примерно 30% массы блока. Длина и ширина корпуса выбираются в соответствии с размерами используемых ячеек (78 × 95, 158 × 95, 238 × 95 мм) и числа пакетов ячеек. Для ячеек первого типа размеры корпуса в плане составляют 95 × 125 мм, второго типа — 175 × 125 мм, третьего — 255 × 125 мм. Для размещения двух пакетов ячеек второго типа корпус должен иметь размеры 235 × 180 мм, для двух пакетов ячеек третьего типа — 260 × 235 мм.

При разработке конструкции бортовых РЭС необходимо учитывать следующие технологические факторы: выбирать по возможности типовые конструкции, освоенные в производстве и хорошо оснащенные; размещение компонентов, а также выбор формы, размеров, точности, шероховатости деталей производить с учетом объемов производства и возможностей имеющегося технологического оборудования и оснастки; избегать использования драгоценных, токсичных и дефицитных материалов; учитывать возможность поставки комплектующих изделий и выполнения некоторых работ по кооперации.

Вопросы для самоконтроля

1. В каких областях народного хозяйства используются РЭС?
2. Какие ограничения влияют на конструкцию РЭС?
3. От каких основных факторов зависит конструкция стационарных РПДУ?
4. Что является модулем при конструировании стационарных мини-ЭВМ?
5. Какие факторы влияют на специфику конструкции быстродействующих ЭВМ?
6. Чем отличается конструкция РЭС технологического оборудования?
7. Какие требования предъявляются к конструкции транспортируемых РЭС?

8. Какими методами достигается минимизация габаритов и массы конструкции переносных РЭС?

9. Какова конструкция антенн носимых РЭС?

10. На каких объектах устанавливаются бортовые РЭС?

11. Какие дестабилизирующие факторы должны учитываться для бортовых РЭС?

12. Какова специфика конструкций РЭС гражданской авиации?

13. Чем обусловлена специфика конструкций бортовых РЭС специального назначения?

Некоторые справочные данные, используемые при конструировании РЭС

Таблица П.1

Допустимые напряжения (В) между проводниками печатных плат

Расстояние между проводниками, мм	Гетинакс	Стеклотекстолит	Расстояние между проводниками, мм	Гетинакс	Стеклотекстолит
0,15	—	20	0,7	150	150
0,2	—	25	0,8	175	175
0,25	30	30	0,9	200	200
0,3	50	50	1,0	250	250
0,4	75	75	1,2	300	300
0,5	100	100	1,5	400	400
0,6	125	125	2,5	450	500

Примечания: 1. На внутренние слои МПП подавать напряжения более 250 В не рекомендуется.

2. Гетинакс в герметичных РЭС не используется.

Таблица П.2

Относительная диэлектрическая проницаемость некоторых материалов

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ
Фторопласт-4 (тефлон)	2...2,1	Стеклотекстолит	4...6
Полиэтилен	2,2...2,3	Анодное покрытие алю-	
Полистирол	2,55	миния	6...7
Полисульфон	3,1	Поликор (99,8% Al_2O_3)	9...10
Лавсан	3,1	Брокерит (99,7% Be_2O_4)	6,3...6,5
Винипласт (поливинилхлорид)	3,0...3,5	Керамика 22ХС (96% Al_2O_3)	8,5...9,5
Полиэфирсульфон	3,5	Ситалл СТ-50-1	6...8,5
Полиимид	3,5	Ситалл КП-10	10
Эпоксиды	3,5...4	Кремний	11,7
Силиконы	3,5...4,2	Арсенид галлия	13,3
Полиуретаны	3,5...4	Ферриты	9...14

Таблица П.3

Погонная емкость печатных проводников (нФ/см), расположенных друг под другом на соседних слоях, для диэлектрической проницаемости платы ($\epsilon_{пл} = 6 \pm 10\%$)

Ширина проводника, мм	ДПП толщиной 1,5 мм	МПП толщиной слоев, мм		
		0,15	0,25	0,5
0,2	0,54	1,4	1,05	0,75
0,3	0,6	1,86	1,35	0,78
0,5	0,72	2,55	1,86	1,2
1,0	0,96	—	2,76	1,86
2,0	1,6	—	—	2,76
5,0	2,6	—	—	—

Таблица П.4

Допустимая индуктивность (мкГн) шин заземления

Серия ИС	Импульсный скачок тока в земляной шине				
	200	160	120	90	60
115	0,33	0,55	—	—	—
130	—	—	0,04	0,54	—
133	—	—	0,04	0,54	—
155	0,10	0,15	0,25	0,40	—
187	—	—	—	—	0,08
217	—	—	—	0,10	0,25
230	—	—	—	0,30	0,60
231	—	—	0,35	0,60	—
240	—	0,08	0,32	—	—

Таблица П.5

Допустимый ток (А) печатных проводников

Метод изготовления	Толщина проводника фольги, мкм	Ширина проводника, мм				
		0,15	0,25	0,5	1,0	3,0
Химический (внутренние слои МПП)	20	0,05	0,08	0,15	0,30	0,90
	35	0,08	0,13	0,26	0,53	1,58
	50	0,11	0,19	0,37	0,75	2,25
Химический (наружные слои ОПП, ДПП)	20	0,06	0,10	0,20	0,40	1,2
	35	0,11	0,18	0,35	0,70	2,1
	50	0,15	0,25	0,50	1,00	3,0
Комбинированный позитивный (ДПП)	20	0,23	0,38	0,75	1,50	4,50
	35	0,24	0,40	0,80	1,60	4,80
	50	0,29	0,48	0,95	1,90	5,70
Электрохимический	35	0,11	0,18	0,35	0,70	2,10

Сопrotивление печатных проводников длиной 1 м

Метод изготовления	Толщина проводника, мкм	Сопrotивление, Ом, не более, при ширине проводника, мм				
		0,15	0,25	0,5	1,0	3,0
Химический	20	6,60	4,00	2,00	1,00	0,33
	35	3,80	4,29	1,10	0,57	0,29
	50	2,66	1,60	0,80	0,40	0,13
Комбинированный	20	4,10	2,46	1,20	0,60	0,18
	35	2,80	1,63	0,80	0,40	0,14
	50	2,14	1,28	0,60	0,32	0,10
Электрохимический	35	10,66	6,40	3,20	1,60	0,53

Таблица П.7

Поговые емкости (пФ/см) соседних печатных проводников, расположенных в одвом слое

Ширина проводника, мм	Зазор между проводниками, мм	ДПП		Внутренние слои МПП, $\epsilon_{\text{эф}} = 6$
		нелакированные, $\epsilon_{\text{эф}} = 3,5$	лакированные, $\epsilon_{\text{эф}} = 5$	
0,2	0,2	0,53	0,75	0,90
0,2	0,6	0,35	0,5	0,60
0,3	0,3	0,53	0,75	0,90
0,3	0,6	0,42	0,60	0,72
0,4	0,4	0,53	0,75	0,90
0,5	0,3	0,63	0,90	1,08
0,5	0,5	0,53	0,75	0,90
0,6	0,2	0,7	1,00	1,2
0,6	0,6	0,53	0,75	0,90

Примечания: 1. Для лаков УР-231 и ЭП-9114 $\epsilon_{\text{пл}} = 4$.

2. Внутренние слои МПП изготовлены методом металлизации сквозных отверстий, попарного прессования и комбинированным методом

Таблица П.8

Допустимые значения паразитной емкости электрических связей (пФ) при ложном срабатывании логических ИС

Серия ИС	114	130	133	155	187	217	230	231	240
C, пФ	25	35	50	60	45	20	50	50	40

Диапазон изменения электрических параметров электромонтажа

Элемент связи	Z , Ом	L , мкГн/м	C , пФ/м	$C_{\text{пар}}$, пФ/с	R , Ом	l , мм
Полосковая линия	$20 \dots 200 \pm (1 \dots 20)\%$	0,02...0,5	5...50	5...20	—	—
Межслойный переход печатной платы	140	0,2	1	—	$4 \cdot 10^{-4}$	1...3
Одиночный объемный проводник над экраном диаметром 0,1...2 мм; расстояние до экрана 1...100 мм	100...140	0,14...1,4	7...80	—	0,0056...1,1*	—
Перевитая пара проводников типа МГТФ	120...160	1...2	50...100	—	—	—
Контактная пара разъема	200	30 нГн	0,8 пФ	—	0,01...0,02	20...30
Коаксиальный кабель	$50 \dots 100 \pm (4 \dots 20)\%$	0,1...0,5	$0,64 \dots 0,15 \cdot 10^{-3}$	—	—	—
Экранированный провод	$30 \dots 40 \pm 20\%$	—	100...200	—	—	—

* Размерность ... Ом/м.

Предельно допустимые положительные температуры для некоторых изоляционных материалов

Материалы	Температура, °С
Непропитанные волокнистые (древесная бумага, картон, фибра, х/б волокно, натуральный шелк)	90
Волокнистые, пропитанные масляными, масляно-смоляными и другими лаками. Эмалевая и лаковая изоляция	105
Пластмассы из фенолформальдегидных и других смол с целлюлозными наполнителями (гетинакс, текстолит и др.)	120
Стекловолокнистые, пропитанные компаундами на основе высыхающих масел, шеллака, бакелита и т. д.	130
Из стекловолокна, асбеста, пропитанные:	
эпоксидными лаками (смолами)	155
кремнийорганическими составами	180
Неорганические непропитанные (слода, стекло, керамика, кварц, фторопласт-4)	Более 180

Таблица П.11

Эффективность различных способов конвективного теплоотвода при перегреве аппаратуры относительно окружающей среды до 30° С

Теплоотвод	Плотность теплового потока, Вт/см ²
Естественно-воздушный:	
в герметичном блоке	0,007...0,015
в негерметичном блоке	0,01...0,05
Принудительно-воздушный жидкостный:	
маслом	0,15...0,4
водой	0,5...31
Испарительным охлаждением:	
фторорганическими жидкостями (фреоны)	1,5...25
водой	1,5...150

Таблица П.12

Характеристики некоторых материалов герметизирующих прокладок

Материал прокладки	Допустимое давление, Н/см ²	Допустимая температура, °С (при ограниченном числе термоциклов)
Медь	4000	-183...+150 (до 600)
Алюминий	600	+150 (до 400)
Свинец	Без ограничений	+100
Индий	То же	+150
Резина	2500	-60...+250
Фторопласт-4	100...300	-195...+260
Фторопласт-3	100...150	-85...+200
Полиамиды	250...300	-40...+80

Значение поправочного коэффициента $K = \lambda / \lambda_0$ для элементов РЭС в зависимости от условий эксплуатации

Условия эксплуатации	Поправочный коэффициент
Лабораторные и благоустроенные помещения	1,0
Стационарные наземные устройства	10...20
Защитные отсеки кораблей	17...40
Автоприцеп	25...50
Железнодорожная платформа	40...60
Самолет	100...150
Управляемый снаряд	300...350
Ракета	700...1000

Примечание: λ — интенсивность отказов элемента при эксплуатации, 1/ч; λ_0 — интенсивность отказов элемента в лабораторных условиях, 1/ч.

1. Волков В. А. Сборка и герметизация микροэлектронных устройств. — М.: Радио и связь, 1982. — 144 с.
2. Гель П. П., Иванов-Есипович Н. К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 536 с.
3. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А. Монтаж микροэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1986. — 176 с.
4. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Высшая школа, 1984. — 247 с.
5. Ильинский В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от внешних воздействий. — М.: Радио и связь, 1982. — 296 с.
6. Карпушин В. Б. Виброшумы радиоаппаратуры. — М.: Сов. радио, 1977. — 320 с.
7. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. — М.: Сов. радио, 1976. — 216 с.
8. Мевис А. Ф., Несвижский В. В., Фефер А. И. Допуски и посадки деталей радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/Под ред. О. А. Луппова/ — М.: Радио и связь, 1984. — 152 с.
9. Невашев А. П., Коледов Л. А. Основы конструирования микροэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1981. — 304 с.
10. Пестряков В. Б. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1969. — 208 с.
11. Преснухий Л. Н., Шахивов В. А. Конструирование электронных вычислительных машин и систем. — М.: Высшая школа, 1986. — 512 с.
12. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: Справочное пособие/Э. Т. Романычева, А. К. Иванова, А. С. Куликов, Т. П. Новикова. — М.: Радио и связь, 1984. — 256 с.
13. Савельев А. Я., Овчинников В. А. Конструирование ЭВМ и систем. — М.: Высшая школа, 1984. — 248 с.
14. Токарев М. Ф., Талицкий Е. Н., Фролов В. А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры/Под ред. В. А. Фролова. — М.: Радио и связь, 1984. — 224 с.
15. Указания по составлению и подаче заявки на промышленный образец (временные)/Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий. — М.: ВНИИПИ, 1983. — 63 с.
16. Шеретнев В. В. Конструирование и микроминиатюризация ЭВА. — М.: Радио и связь, 1984. — 272 с.
17. Яшин А. А. Конструирование микроблоков с общей герметизацией. — М.: Радио и связь, 1985. — 100 с.
18. Применение интегральных микросхем в электронной вычислительной технике: Справочник/Р. В. Данилов, С. А. Ельцова, Ю. П. Иванов и др.; Под ред. Б. Н. Файзулаева, Б. В. Тарабрина. — М.: Радио и связь, 1986. — 384 с.
19. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник/Е. В. Авдеев, А. Т. Еремин, И. П. Норенков, М. И. Песков; Под ред. И. П. Норенкова. — М.: Радио и связь, 1986. — 386 с.
20. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с.
21. Технологическая подготовка гибких автоматизированных производств в приборостроении/Н. П. Меткин, М. С. Лапин, В. И. Гольц, П. И. Алексеев. — Л.: Машиностроение, 1986. — 192 с.
22. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры / Е. М. Парфенов, Э. Н. Камышная, В. П. Усачев. — М.: Радио и связь, 1989. — 272 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Алгоритм художественного конструирования 267, 268
- Амортизаторы
виды 230–233
схемы установки 238
- Анализ конструкции эргономической 293
— эстетический 293
— схемы электрической 152
- Антенны СВЧ 297, 300
- Взаимодействие человека и машины** 257, 258
- Виброизоляция
действующие силы 227
конструкция 244
методы 227, 241, 242
расчет 234
- Вибропрочность 226
- Виброустойчивость 226
- Влага
методы защиты 189
свойства 187
- Гармония 270, 272
- Герметизация
оболочками монолитными 190, 191
заливкой 193, 209
обволакиванием 195
опрессовкой 196
пропиткой 192
оболочками полыми 190, 199
паяным швом 208
сварным швом 208
контроль 214
- Демпфирование вибрационных воздействий 227, 240
- Дизайн 259
- Документация конструкторская 28
на машинных носителях 65, 68
нормоконтроль 75
текстовая 28, 67
технологический контроль 87
- Жесткость конструкции**
методы обеспечения 248
плат 248, 251
- Защита от влаги**
покрытиями металлическими 197
— неметаллическими 190, 199
полыми неразборными оболочками 199
— разборными оболочками 212
— частично разборными 207
- Иллюзии зрительные** 276
- Использование ЭВМ**
при конструировании 41, 65
при изготовлении 46, 74
- Компонент ИС 7**
- Конструирование**
бытовых РЭС 288
автоматизированное 41
методы 31, 35, 41, 280, 288
модулей СВЧ 301, 314, 323
ограничения 30, 268
оценка 11, 31, 78
печатных плат 127
профессиональных РЭС 280
системное 29, 31, 127
стадии 26
эргономическое 257, 280
эстетическое 267, 288
- Конструкции**
иерархия 8, 56, 84
модель системная 30
— функциональная 49
развитие 14
ряд параметрический 86, 275
- Конструкционная система** 56
- Коэффициент паразитной связи**
емкостной 120
индуктивной 120
кондуктивной 120
- Магистральность** 381
- Материалы**
вибропоглощающие 242
герметизирующие 192, 197, 201, 206, 215
конструкционные 246, 247
теплоизолирующие 159
теплопроводящие 175
теплопоглощающие 182
- Механические воздействия** 222
влияние на РЭС 223
интенсивность 223—225
методы защиты 226
- Миниатюризация** 10
- Микроминиатюризация** 10
Модуль 8, 58, 130, 285
- Нагрузка** нервно-психическая 266, 267
- Образец промышленный** 269
- Обтекатель антенны** 298, 299, 330
- Организация производства** 76
- Оформление внешнее РЭС**

- профессиональных 280
- бытовых 288
- Передача тепла**
 - излучением 177
 - конвекцией 163
 - тепловой трубой 171
 - теплопроводностью 173
 - термоэлементом 178
- Плотность компоновки конструкции**
10, 22, 23, 404
- Поглощение тепла**
 - при фазовых превращениях 182
 - термоаккумуляцией материалов конструкции 181
 - среды 181
- Показатели качества конструкции**
 - абсолютные 13
 - конструкторские 31, 79
 - надежности 12
 - относительные 13
 - технологические 80
 - эргономические 259
 - эстетические 270
- Помехи**
 - методы уменьшения 125, 135, 142
 - обусловленные неоднородностью волнового сопротивления 118
- Прочность**
 - механическая 226
 - электрическая 217
 - методы расчета 248
 - обеспечения 252
- Радиоэлектронные средства**
 - бортовые 398
 - классификация 11, 334, 339, 398
 - микрореле 7
 - носимые 389
 - переносные 376
 - поколения 15
 - СВЧ 296
 - состав 30, 296
 - стационарные 335, 339
 - транспортируемые 364
- Система**
 - автоматизированного конструкторского проектирования 41
 - производственная гибкая 46
 - большая конструкция 29
 - человек — машина 41, 258
- Совместимость электромагнитная**
 - цифровых узлов 116
 - аналоговых узлов 142
- Соединения электрические**
 - волновое сопротивление 117
 - выполненные автоматически 91, 108
 - классификация 91
 - контакты неразъемные 109
 - разъемные 112
 - требования 112
 - объемным проводом 103
 - печатным монтажом 90
 - электрически длинные 117
 - короткие 117
- Стандарты** 54, 55
- Степень интеграции** 13
- Структуры СВЧ**
 - пассивные 302
 - полупроводниковые 312
 - с сосредоточенными параметрами 309
- Тепловой отказ постепенный** 156
- — внезапный 157
- Тепловой режим**
 - нормальный 156
 - стационарный 156
 - системы обеспечения 157
- Теплоизоляция** 159
- Теплоотвод** 163
- Теплопроводность** 173
- Термостатирование** 158
- Термостойкость** 157
- Техническое задание** 25
- предложение 27
- Технические требования** 25
- Технологичность конструкции** 11, 78, 83, 87, 152, 183, 219, 254, 294
- Типизация** 85
- Тип производства** 76
- Унификация** 85
- Уровни разукрупнения РЭС** 8
- Чувствительность тактильная** 266
- Элементы**
 - интегральной схемы 7
 - бескорпусные 62
 - корпусированные 60
 - термостойкость 157
- Экранирование**
 - магнитостатическое 144
 - электромагнитное 145
 - электростатическое 143
 - эффективность 142
- Эргономика** 258
- Эргономические показатели человека**
259
- — конструкции 293
- Эстетика** 259
- Эстетические средства** 270
- способы 270
- категории 270
- критерии 270
- Этапы конструирования** 26

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Основы конструирования РЭС	25
§ 1.1. Организация процесса конструирования РЭС	25
1.2. Радиоэлектронное средство как большая система	29
1.3. Системный подход при конструировании РЭС	31
1.4. Использование ЭВМ при конструировании и производстве РЭС	41
1.5. Функциональная математическая модель конструкции РЭС	49
1.6. Стандартизация конструкций РЭС	52
1.7. Конструкционные системы РЭС	56
1.8. Специфика конструкторской документации, выполненной с помощью автоматизированных методов	65
1.9. Стандартизационный контроль конструкторской документации	75
1.10. Конструкция РЭС как объект производства	76
1.11. Техничко-экономический анализ конструкторской разработки	78
1.12. Методы обеспечения технологичности конструкции РЭС	83
Глава 2. Конструкция электрических соединений РЭС	89
§ 2.1. Влияние электрических соединений на параметры конструкции РЭС ...	89
2.2. Конструкции межконтактных электрических соединений на основе печатного монтажа	90
2.3. Конструкции межконтактных соединений из объемного провода	103
2.4. Конструкции контактных соединений	109
2.5. Электромагнитная совместимость цифровых узлов	116
2.6. Методы уменьшения помех в электрических соединениях цифровых узлов	125
2.7. Разработка конструкций электрических соединений на основе печатных плат	127
2.8. Электромагнитная совместимость аналоговых узлов	133
2.9. Электромагнитная совместимость усилительных схем	136
2.10. Обеспечение электромагнитной совместимости аналоговых узлов экранированием	142
2.11. Конструкторский анализ электрической схемы РЭС	152
Глава 3. Тепловой режим конструкций РЭС	154
§ 3.1. Влияние теплового режима на эффективность и качество конструкций РЭС	154
3.2. Системы обеспечения теплового режима РЭС	157
3.3. Теплоотвод конвекцией	163
3.4. Теплоотвод тепловыми трубами	171
3.5. Теплоотвод теплопроводностью	173
3.6. Теплоотвод излучением	177
3.7. Теплоотвод с использованием термоэлектрического эффекта	178
3.8. Способы поглощения теплоты. Технологичность конструкций СОТР	181
Глава 4. Защита конструкций РЭС от воздействия влаги	185
§ 4.1. Влияние влаги на эффективность и качество конструкций РЭС	185
4.2. Защита от влаги элементов и узлов РЭС монолитными оболочками ...	191
4.3. Защита от влаги элементов и узлов РЭС полыми оболочками	199

Глава 5. Защита конструкций РЭС от динамических механических воздействий	222
§ 5.1. Влияние динамических механических воздействий на надежность и качество РЭС	222
§ 5.2. Защита РЭС от механических воздействий с помощью виброизоляции	227
§ 5.3. Обеспечение прочности и жесткости элементов конструкции РЭС	244
Глава 6. Конструирование РЭС с учетом требований эргономики и технической эстетики	257
§ 6.1. Влияние требований эргономики и технической эстетики на эффективность и качество РЭС	257
§ 6.2. Художественное оформление конструкции РЭС. Основы композиции ...	267
§ 6.3. Особенности внешнего оформления профессиональных и бытовых РЭС	279
Глава 7. Особенности конструкции РЭС диапазона сверхвысоких частот	296
§ 7.1. Функциональные особенности РЭС СВЧ	296
§ 7.2. Конструкции пассивных структур СВЧ и полупроводниковых элементов	302
§ 7.3. Конструкции функциональных узлов, модулей и блоков СВЧ	314
Глава 8. Особенности конструкций наземных и бортовых РЭС диапазонов НЧ и ВЧ	334
§ 8.1. Факторы, влияющие на характер конструкций РЭС	334
§ 8.2. Особенности конструкций наземных стационарных РЭС	335
§ 8.3. Особенности конструкций наземных транспортируемых РЭС	364
§ 8.4. Особенности конструкций наземных переносных РЭС	376
§ 8.5. Особенности конструкций наземных носимых РЭС	389
§ 8.6. Особенности конструкций бортовых РЭС	398
Приложение. Некоторые справочные данные, используемые при конструировании РЭС	422
Список литературы	428
Предметный указатель	429

Учебное издание

Ненашев Александр Петрович

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Заведующий редакцией В. И. Трефилов. Редактор Е. В. Вязова. Младшие редакторы С. А. Пацева, В. В. Пашенкова. Художественный редактор Т. М. Скворцова. Обложка художника В. В. Гарбузова. Технический редактор Л. А. Муравьева. Корректор Г. И. Кострикова

ИБ № 7387

Изд. № ЭР-468. Сдано в набор 06.05.89. Подп. в печать 09.02.90. Т-06051. Формат 60×88/16. Бум. офс. № 2. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Объем 26,46 усл. печ. л. 26,46 усл. кр.-отт. 27,46 уч.-изд.-л. Тираж 20 000 экз. Зак. № 2254 Цена 1 р. 20 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14. Отпечатано с диапозитивов ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» Госкомпечати СССР. 113054, Москва, Валовая, 28 в Московской типографии № 4 Госкомпечати СССР 129041, Москва, Б. Переяславская, 46. **Зак. 320.**

А. П. Ненашев

КОНСТРУИРОВАНИЕ РАДИО- ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

scan by BAW

