

к.п. поляков • Конструирование РЭА

к.п. поляков

©
Конструирование
приборов
и устройств
радиоэлектронной
аппаратуры

К.П. ПОЛЯКОВ



Конструирование
приборов
и устройств
радиоэлектронной
аппаратуры

МОСКВА
«РАДИО И СВЯЗЬ»
1982



Scan AAW

ББК 32.844
П49
УДК 621.37/39.001.66

Поляков К. П.

П49 **Конструирование приборов и устройств радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с., ил.**

В пер.: 1 р. 20 к.

Рассматриваются вопросы конструирования радиоэлектронной аппаратуры на элементной базе четырех поколений, обеспечения ремонтпригодности, долговечности, технологичности, виброизоляции, теплового режима. Большое внимание уделяется конструированию приборов информации и управления системами с учетом требований инженерной психологии и технической эстетики.

Книга предназначена конструкторам радиоэлектронной аппаратуры и может быть полезной студентам при выполнении курсовых и дипломных проектов.

П 2402020000-082
046(01)-82 80-82

ББК 32.844
6Ф2.1

РЕЦЕНЗЕНТ П. П. ГЕЛЛЬ

**Редакция литературы по конструированию
и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры**

ПОЛЯКОВ КИРИЛЛ ПЕТРОВИЧ

**КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ
И УСТРОЙСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Редактор Н. Н. Кузнецова

Переплет художника Л. Н. Наумова

Художественный редактор Г. Н. Кованов

Технический редактор Т. Н. Зыкина

Корректор Н. М. Давыдова

ИБ № 130

Сдано в набор 18.01.82 г.

Подписано в печать 6.04.82 г.

Т-06479 Формат 60×90^{1/16} Бумага кн.-журн. Гарнитура литературная Печать высокая

Усл. печ. л. 15,0 Усл. кр.-отт. 15,0 Уч.-изд. л. 17,13 Тираж 15 000 экз. Изд. № 19506

Зак. № 10 Цена 1 р. 20 к.

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь» Госкомиздата СССР
101000 Москва, ул. Кярова, д. 40

© Издательство «Радио и связь», 1982

ПРЕДИСЛОВИЕ

Фундаментальные исследования, выполненные в последнее время в области радиофизики, квантовой электроники, физики полупроводниковых материалов и тонких пленок, открыли широкую перспективу дальнейшего совершенствования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и увеличили реальную возможность решения с помощью радиоэлектроники многих технических задач. На базе вскрытых возможностей формулируются конкретные технические требования на разработку более совершенных конструкций.

В этой книге излагаются технические требования на разработку конструкций РЭА, методы конструирования, некоторые вопросы оптимизации конструирования с помощью автоматических систем, способы обеспечения ремонтпригодности, вибропрочности, ударостойкости и теплового режима. Большое внимание уделяется конструированию приборов информации и управления с учетом требований инженерной психологии и технической эстетики, а также разработке несущих конструкций. В соответствующих параграфах даны практические примеры расчета и справочные материалы. В книге не затрагиваются вопросы конструирования схемных или комплектующих элементов, в том числе и типовых интегральных микросхем, так как эти вопросы выходят за рамки рассматриваемой темы и достаточно широко освещены в литературе.

Книга предназначена конструкторам радиоэлектронной аппаратуры. Она может быть полезна студентам при выполнении дипломных проектов по курсу конструирования РЭА.

Из-за ограниченного объема книги не все вопросы в ней могли быть рассмотрены с исчерпывающей полнотой, поэтому в список литературы внесены и те источники, в которых читатель найдет в более подробном изложении сведения по специальным вопросам.

Все замечания и пожелания просьба направлять по адресу: 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 693.

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ И УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

По функциональному назначению РЭА делится следующим образом:

радиолокационная (обнаружение и определение дальности, координат места, определение пути и скорости);

телевизионная (передача и прием видимого изображения);

радиосвязи (передача и прием электромагнитных волн, несущих информацию связи);

проводной связи (передача информации и двухсторонняя связь по проводам с использованием промежуточной усилительной аппаратуры);

телеграфная (передача по проводам на дальние расстояния информации азбукой Морзе);

звукозаписывающая (магнитная запись и воспроизведение музыки, речи и различной информации в диапазоне звуковых частот);

вычислительная (выполнение многообразных счетно-аналитических работ);

телемеханики (управление приборами, машинами, устройствами на расстоянии);

автоматического регулирования и управления (управление производственными и технологическими процессами);

гидролокационная (направленная передача и прием отраженных сигналов в водной среде, определение глубины и рельефа дна, дальности и местонахождения препятствий и плавающих объектов);

навигационная (автоматическое и полуавтоматическое вождение подвижных объектов, определение собственной скорости, направления и местонахождения);

электротехническая (получение, преобразование и коммутация электроэнергии);

контрольно-измерительная (измерение электрических и неэлектрических параметров);

ультразвуковая — создание ультразвуковых колебаний для технического использования их в промышленности и др.

По условиям эксплуатации радиоэлектронная аппаратура делится на наземную, корабельную и авиационную, в том числе и космическую.

Наземная аппаратура в свою очередь согласно ГОСТ 16019-78 подразделяется на: (1) стационарную, работающую в наземных и подземных отапливаемых и вентилируемых помещениях; (2) стационарную, работающую на открытом воздухе и в неотапливаемых помещениях или укрытиях; (3) возимую в кузовах и кабинах автомобилей различного назначения и работающую на ходу; (4) возимую на речных судах с установкой во внутренних помещениях и работающую на ходу; (5) возимую в подвижном железнодорожном транспорте и работающую на ходу; (6) носимую и портативную, предназначенную для длительной переноски людьми на открытом воздухе или в неотапливаемых помещениях, работающую и не работающую на ходу.

Корабельная аппаратура (морская и прибрежная) по условиям эксплуатации подразделяется на размещаемую: (1) на открытом воздухе на морском берегу или на открытых надстройках корабля; (2) в затопляемых помещениях или отсеках корабля и работающая в воде под гидравлическим давлением; (3) в закрытых помещениях, отсеках, рубках и каютах, отапливаемых и вентилируемых; (4) в закрытых помещениях быстроходных судов, подверженных значительным механическим воздействиям; (5) на открытых палубах, мостиках и надстройках быстроходных судов.

Самолетная аппаратура (бортовая аппаратура) по эксплуатационным признакам делится на размещаемую: (1) на амортизированных панелях и приборных досках, в кабинах или центральных отсеках на самолетах с поршневыми или турбовинтовыми двигателями; (2) в концевых отсеках крыльев таких самолетов, в хвостовом оперении или в месте расположения двигателей; (3) в центральных отсеках фюзеляжа или в кабинах пилотов на самолетах с реактивными двигателями; (4) в концевых отсеках крыльев этих самолетов, в хвостовом оперении или вблизи реактивных двигателей.

Эти основные группы, казалось бы, охватывают собой всю разновидность аппаратуры, работающей на земле, на воде и в воздухе. Однако с развитием беспилотной авиации и ракетной техники выделилась в самостоятельную группу аппаратура, используемая на беспилотных самолетах, управляемых ракетах, спутниках земли и межпланетных аппаратах.

Аппаратура ракетной техники по воздействию на нее внешних механических сил и атмосферных условий может быть разделена на подгруппы приборов, устанавливаемых: на беспилотных самолетах; в ракетах, управляемых на расстоянии; на пилотируемых ракетах.

Учитывая эксплуатационные требования, предъявляемые к каждой из рассмотренных групп аппаратуры, необходимо отметить, что приборы одной области применения с успехом могут быть использованы в других областях независимо от конструктивного исполнения, если оказавшаяся при этом избыточность тех или иных параметров будет экономически оправдана.

1.2. ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Проблемы конструирования современной РЭА объединены задачей повышения качества изделий и эффективности их производства. К ним относятся: снижение стоимости, в том числе материалоемкости и энергоемкости; снижение объема и массы; расширение области использования микроэлектронной базы, увеличение степени интеграции, микроминиатюризация межэлементных соединений и элементов несущей конструкции, обеспечение магнитной совместимости и интенсификация теплоотвода; обеспечение взаимосвязи оператора и аппаратуры; широкое внедрение методов оптимального конструирования; обеспечение высокой технологичности, однородности структуры; максимальное использование стандартизации.

Проблемы повышения качества и снижения стоимости. Качество указывает на степень пригодности изделия для эксплуатации в определенных условиях. Оно в полном объеме должно быть оговорено соответствующими нормами в технической документации на изготовление. К показателям качества относятся надежность, долговечность, точность и эксплуатационные свойства. Эти показатели, отнесенные к стоимости разового исполнения функции или к другим сравнительным параметрам изделия, определяют экономическую или эксплуатационную *эффективность*. Критериями эффективности могут служить также стоимость одной операции, одного сеанса связи и т. п.

Проблема качества заключается в более полной реализации всех функциональных и надежностных требований, она тесно связана с проблемой реализации всех мер, направленных на снижение стоимости изделия. Обе проблемы решаются в процессе разработки изделия совместно, и как только найдены пути решения первой, сразу же рассматривается вторая — какой ценой это обеспечивается. Таким образом, любое конструктивное решение оценивается не только использованными средствами, но и тем, насколько эти средства экономически целесообразны. Однако любые экономические мероприятия должны реализовываться без ущерба для качества. Как известно, общая стоимость изделия складывается из суммы затрат на его разработку, изготовление и эксплуатацию. Каждый из этих этапов характеризуется своими мерами, направленными на снижение стоимости изделия.

Стоимость разработки, например, во многом зависит от степени автоматизации конструирования. Так, для расчета оптимального варианта схемы на плате размерами 53×120 мм на 32 микро модуля ручным способом затрачивали 200 ч, в то время как при использовании цифровой ЭВМ «Минск-20» — всего 5 ч [28]. Немалое влияние на стоимость разработки оказывают степень стандартизации и организация конструкторских работ.

Стоимость изготовления может быть снижена за счет создания

конструкции РЭА с однородной структурой, разработки деталей и узлов высокой технологичности, использования наиболее совершенной технологии их изготовления. С целью снижения стоимости механическую обработку, где это возможно, следует заменить более прогрессивными химической, тепловой и электромагнитной. Стоимость изготовления можно существенно снизить также сокращением производственного цикла, интенсификацией испытаний и использованием неразрушающего контроля.

Стоимость эксплуатации может быть снижена за счет повышения надежности, ремонтпригодности, долговечности изделия, а также уменьшения энергоемкости, максимальной автоматизации управления и контроля исправности аппаратуры.

Стоимость разработки изделия в сравнении со стоимостью изготовления и эксплуатации весьма мала. Однако этот этап, реализуя большую часть из рассмотренных выше мероприятий, определяет стоимость последующих двух этапов. Поэтому при выполнении задач оптимального конструирования наблюдаемое увеличение стоимости разработки в десятки раз покрывается снижением стоимостей изготовления и эксплуатации.

И, наконец, в вопросах стоимости особо важную роль играет фактор времени. Учитывая это, следует всегда сочетать объем работ с минимально необходимыми сроками его исполнения, так как конструкция, реализующая своевременно возникшую и весьма ценную идею в процессе чрезмерно длительной ее разработки, неизбежно морально устаревает.

Проблема дальнейшего снижения объема и массы РЭА. Снижение объема и массы РЭА не является самоцелью, а служит лишь средством выполнения современных требований расширения области ее применения, снижения материалоемкости и улучшения эксплуатационных свойств.

Общий объем и масса радиоэлектронной системы определяются суммой объемов (массы) собственно аппаратуры, агрегатов охлаждения или подогрева, вспомогательного оборудования, запасных частей и источников питания, исчисляемых эквивалентом потребляемой мощности. Отсюда меры снижения объема и массы РЭА должны затрагивать все ее составляющие.

Габаритные размеры РЭА определяются в первую очередь характером применяемых элементов и плотностью их размещения. Плотность компоновки элементов ограничивается рабочими характеристиками. Так, в результате чрезмерной плотности ухудшается тепловой режим, сложнее становится обеспечить электромагнитную совместимость, ремонтпригодность и т. д. В этом случае приходится применять более мощные, сложные и дорогостоящие способы охлаждения, дополнительную экранировку и доступы к элементам. Таким образом, собственный объем (масса) агрегатов охлаждения, экранов и соединителей в отдельных случаях может оказаться большим, чем объем (масса), сэкономленный за счет высокой плотности компоновки элементов.

Под электромагнитной совместимостью понимают такое состояние, когда взаимные электромагнитные помехи при совместной работе нескольких радиоэлектронных устройств и паразитные связи в самой аппаратуре находятся на допустимом уровне. С увеличением плотности компоновки трудности обеспечения электромагнитной совместимости возрастают, особенно при разработке аппаратуры с высокой чувствительностью, с широким диапазоном частот и при размещении в тесных помещениях.

Использование полупроводниковых приборов, миниатюрных навесных элементов и печатного монтажа не ограничило возможности дальнейшего снижения объемов РЭА. Создание тонкопленочных и полупроводниковых микросхем открыло в этом направлении еще большие перспективы. Микроэлектроника способствует переходу не только к малым размерам и массе, но и к микротокам, а следовательно, и к небольшим тепловыделениям. Кроме того, снижение материалоемкости существенно отражается на экономии исходных материалов.

Успешное решение многих проблем в области микроэлектроники способствует все большему использованию РЭА, где базовыми элементами служат интегральные микросхемы (ИМ). Развитие ИМ в настоящее время происходит главным образом за счет расширения диапазона частот, увеличения мощности активных микроэлементов и микроминиатюризации промежуточных схемных элементов с большими номиналами. Дальнейшее снижение объема РЭА, повышение ее быстродействия, сокращение межсхемных соединений и миниатюризация элементов несущей конструкции до уровня, сопоставимого с микросхемами, стало возможным при переходе от интеграции микросхем к интеграции устройств. Благодаря значительной надежности больших интегральных микросхем (БИМ) конструирование РЭА с высокой степенью интеграции становится уже экономически целесообразно.

Однако, несмотря на большие возможности, у микросхем имеются и свои ограничения. В частности, эти ограничения накладываются использованием полупроводников при высоких температурах и в среде радиоактивных излучений.

Высокотемпературная электроника давно волнует умы многих разработчиков. Из газовой среды уже получены высокотемпературные пленки, а из арсенид-галлия — полупроводниковые материалы. Таким образом, создание более компактной РЭА, в которой отсутствует необходимость в громоздких радиаторах или в принудительном охлаждении, становится уже реальным фактором комплексной микроминиатюризации.

Одновременно, в результате научных поисков более эффективных методов построения микроэлектронной аппаратуры, наметились перспективные направления радиоэлектроники, к числу которых относятся:

техника однородных интегральных структур, состоящих из универсальных логических элементов в объеме полупроводника, позволяющая получить устройства с большей степенью интеграции:

нейристорная техника, в которой для получения импульсов определенной формы и амплитуды и прохождения сигнала только по одному заданному каналу используются активные линии задержки (нейристоры);

криогенная электроника, в которой работа схем основана на использовании при низкой температуре эффекта сверхпроводимости, управляемой в сильном магнитном поле;

ионика, позволяющая на основе ионных процессов создавать электрохимические элементы высокой точности и чувствительности при потреблении энергии в 100—1000 раз меньшей, чем в полупроводниках;

оптоэлектроника, основанная на преобразовании оптических сигналов в электрические и наоборот с большим усилением.

Взаимосвязь оператора с системой управления. Технический прогресс в области автоматизации управления ставит перед конструкторами РЭА в числе основных задач и такие, которые ранее были прикладными. Одной из них является разработка конструкции с учетом психофизиологических требований, вытекающих из рассмотрения взаимосвязи операторов с аппаратурой в системе управления.

От конструктора требуется создание таких радиоэлектронных устройств управления, которые облегчали бы оператору выполнение его сложных функций: с удобной формой приборов, целесообразным размещением на них органов управления и информации, рациональным освещением и т. д. Вместе с этим стало обязательным создание обстановки, максимально удобной для продуктивной деятельности оператора, снижающей нервное напряжение и быструю утомляемость. Этими вопросами занимается техническая эстетика. Производственный интерьер помещения, форма, пропорции, цвет аппаратуры и освещение являются наиболее важными предметами художественного конструирования. В приборостроении техническая эстетика призвана также обеспечить группу требований, относящихся к эксплуатационной надежности.

Основная проблема взаимосвязи состоит в том, что красивые и удобные в эксплуатации приборы создаются отнюдь не за счет каких-либо дополнительных предметов, эффектов или украшений, а путем образования технически осмысленной конструкции, лаконичной по форме и отвечающей практическому назначению и психофизиологическим требованиям.

Внедрение методов оптимального конструирования. Задача оптимизации конструкции РЭА обычно сводится к нахождению из множества просмотренных вариантов единственного, обеспечивающего выполнение поставленной задачи с максимальной эффективностью при минимуме материальных затрат. Поиск оптимальных вариантов увеличивает объем работ высокой квалификации в такой степени, что ручной труд становится уже малоэффективным. В создавшихся условиях самым радикальным средством увеличения эффективности труда является оптимизация процессов разработки с привлечением графоаналитических устройств и ЭВМ.

Машинное проектирование изменяет некоторые этапы работ и требует перестройки традиционно сложившихся взаимоотношений между проектировщиками, конструкторами и работниками техни-

ческого архива. Широкое внедрение машинного способа конструирования требует также совершенствования форм конструкторских документов и создания таких технических архивов, где вместо картотеки хранятся перфокарты на чертежи и другие сведения на машинных носителях.

Масштабы использования систем ЭВМ определяются степенью алгоритмизации процессов конструирования, временем, необходимым для обработки результатов моделирования или корректировки машинной документации, а также формой общения конструктора с системой ЭВМ. Последнее условие является весьма важным, так как наиболее оперативная форма обмена информацией — непосредственный диалог конструктора с ЭВМ — значительно расширяет возможности автоматизации и оптимизации конструирования.

Метод оптимального конструирования основан на строго научном подходе. Он должен способствовать расширению области алгоритмизации процессов конструирования и созданию единой системы тепловых, электрических, прочностных и надежностных расчетов.

Максимальное использование методов стандартизации. Методы стандартизации совершенствуют процессы конструирования, организуют структуру РЭА и способствуют достижению высокой технологичности и эксплуатационного качества. В радиоэлектронном приборостроении наиболее широкий охват стандартизацией получили принципы функционально-узловой и функционально-модульной постройки аппаратуры. Благодаря однородности структуры РЭА этот принцип позволил осуществить унификацию ее составляющих по типоразмерам.

В состав комплексов РЭА в большом количестве входят сложные механические, электромеханические и коммутационные устройства, устройства сигнализации. Это снижает однородность аппаратуры и усложняет технологию изготовления и эксплуатацию комплексов. Поэтому при разработке РЭА стремятся электромеханический метод решения функций заменить электронным.

Примером при создании надежной, однородной аппаратуры с большим коэффициентом стандартизации могут служить многоканальные системы РЭА. Благодаря одновременной и параллельной работе в них большого числа одинаковых каналов повышается общая надежность системы, так как выход из строя до 10% каналов почти не снижает основных ее характеристик. Кроме того, структура такой аппаратуры становится более простой, а топология ее электрических соединений ортогональной.

1.3. ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Первичными документами любого проектируемого устройства РЭА являются: техническое задание (ТЗ), которое в конкретной форме оговаривает функциональные задачи, параметры, объем и последовательность работ; технические условия (ТУ), которые обу-

словливают качество выпускаемого изделия и в равной степени обязательны как для изготовителя, так и для заказчика.

С расширением областей использования РЭА значительно возрастают и ужесточаются требования, предъявляемые к разрабатываемой аппаратуре. Технические требования на разработку состоят из общих и специальных.

К общим техническим требованиям относятся такие, которые не зависят от специфики назначения или эксплуатации. Такие требования являются установившимися для любой РЭА данного класса и поэтому обычно оговариваются в различных руководящих технических материалах, ведомственных нормалях, частных инструкциях на разработку конструкции и т. п.

К специальным техническим требованиям относятся такие, которые оговаривают особенности функциональных требований или условий эксплуатации. Эти требования обязательно указываются в ТЗ на разработку в то время как общие технические требования оговариваются ссылкой на определенный руководящий технический материал (РТМ).

Общие технические требования в свою очередь делятся на эксплуатационные и конструктивно-технологические.

Эксплуатационные требования. Исключительно важное значение, особенно для сложной РЭА, приобрел комплекс требований, объединенных понятием *надежность*. Эти требования оговаривают обеспечение стабильности параметров изделия с заданной точностью и безотказность работы в течение определенного времени.

Основными эксплуатационными требованиями, которые должны учитываться при разработке аппаратуры, являются:

1. Оперативность обслуживания — возможность быстрого осмотра и ремонта аппаратуры, минимальные затраты времени на подготовку прибора к запуску, быстрый запуск в работу, возможность эксплуатации с минимальным числом обслуживающего персонала; автоматизированный контроль важнейших функций и самоконтроль приборов с помощью индикаторов, централизация управления и считывания информации.

2. Удобство обслуживания — хороший доступ к блокам и регулируемым элементам, наличие встроенного контроля или мест включения контрольно-измерительных приборов, обеспечение защиты схемы при нарушении последовательности включения, нормальное освещение рабочих поверхностей панелей, комплектовка запасными частями и принадлежностями для ремонта.

3. Безопасность обслуживания — отсутствие на приборах острых выступающих частей, наличие предостерегающих надписей, блокирующих и заземляющих устройств, соблюдение противопожарных требований, защита от случайных прикосновений обслуживающего персонала к элементам, находящимся под напряжением; наличие световой сигнализации при включении источников высокого напряжения; ограничение шумности механизмов; ограничение СВЧ-излучения.

4. Длительность срока службы и сохранности аппаратуры между плановыми ремонтами, хорошая доступность мест смазки и эффективность действия смазочных материалов.

5. Механическая прочность и жесткость конструкции — надежность работы элементов несущей конструкции, надежность крепления блоков, узлов, радио- и электроэлементов, обеспечение приборов средствами защиты от воздействия вибрации и ударов.

6. Приспособленность к длительному хранению — простота консервации, использование несложной тары и непритязательность к условиям хранения.

7. Устойчивость параметров аппаратуры и сохранность ее при воздействии влажности, температуры, давления; надежная защищенность от пыли, дождя, росы, вредных газов, влаги с наличием растворенных вредных солей, обледенений, радиации и т. п.

8. Нормальный тепловой режим в приборах — охлаждение или подогрев, осуществляемые наиболее экономичным способом: обеспечение эффективной вентиляции и других способов охлаждения.

9. Внешний вид аппаратуры, учитывающий правила технической эстетики, простоту и строгость формы, сочетание цветов окраски, отсутствие излишней декоративности.

10. Минимальные габаритные размеры и масса, удобная переноска и перевозка обычными транспортными средствами, возможность транспортирования через стандартные двери, проемы, люки; минимальная занимаемая площадь.

Конструктивно-технологические требования. Основными конструктивно-технологическими требованиями, которые должны учитываться при разработке конструкции аппаратуры, являются:

взаимозаменяемость блоков и электрических элементов, отдельных узлов и деталей несущей конструкции;

максимальная типизация и унификация приборов, блоков и узлов, использование типовых конструкций, типовое оформление приборов в виде стоек, шкафов, кожухов и плоских блоков и узлов, унификация элементов аппаратуры и размеров приборов, узлов, блоков и модулей;

максимальное сокращение номенклатуры электрических элементов, материалов, полуфабрикатов и крепежных элементов;

минимальная материалоемкость, удобство сборки, максимальная возможность механизации и автоматизации производственного процесса при изготовлении;

рациональный выбор материалов, обладающих достаточной прочностью, малой плотностью, антикоррозионной стойкостью, малой стоимостью при соблюдении соответствия условиям эксплуатации;

рациональный выбор антикоррозионных покрытий и отделок, защитных и декоративных окрасок при минимальной номенклатуре их в изделии;

простота выполнения электрического монтажа, возможность механизации электромонтажа;

возможность изготовления деталей при малой серии на унифицированном оборудовании;

- простота изготовления, сборки и регулировки;
- минимальное число подгоночных и регулировочных операций;
- создание конструкций, способствующих организации непрерывного технологического процесса производства;
- создание конструкции, предусматривающей использование технологического процесса высшего класса, куда входят штамповка, вырубка, гибка, опрессовка, литье под давлением, точное литье, заливка эпоксидными смолами и компаундами, использование клеящих материалов и т. д.;
- минимальные затраты труда на изготовление, капиталовложения на переоборудование производства, на производственные площади и минимальный ассортимент средств изготовления.

Специальные требования. Специальные требования определяют качество конструкции и диктуются родом аппаратуры, областью ее применения и условиями эксплуатации. Такие требования чаще всего указываются в ТЗ на разработку изделия.

1.4. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И ОБЪЕМ РАБОТ КОНСТРУКТОРА

Известно, что положительный результат исследования какой-либо научно-технической темы (или изобретения), как правило, нуждается в практической подтверждении ее эффективности и целесообразности. Исследователь не может быть уверен в возможности экономически обоснованного осуществления разработанной им темы, если технологическая возможность изготовления и стоимость изделия не выявлены конструкторской проработкой.

Конструктивные решения реализуются в производстве на основании конструкторской документации, в которой учтены все вопросы, относящиеся как к экспериментально обоснованному функционированию изделия, так и к технологическому исполнению его. Материалы конструкторской проработки в первом приближении определяют стоимость изготовления и эксплуатации изделия. Анализ этой стоимости дает представление об экономической целесообразности производства. И, наконец, наличие полного комплекта конструкторской документации обеспечивает в организационном производстве неоднократное повторение изделия или его массовое изготовление.

Отсюда следует вывод, что исследование, разработку и обоснование темы необходимо вести одновременно с поиском принципиальных конструктивных решений. Лишь своевременное привлечение конструкторов к работе над темой может обеспечить успех. Новые разработки предполагают подчас настолько сложное конструкторско-технологическое воплощение, что второстепенное участие в них конструкторов обрекает их на неудачу.

Таким образом, конструктор, с одной стороны, должен быть тесно связан с исследователем-проектировщиком, с другой — с техно-

логической службой и производством. Этим определяются место конструктора в процессе проектирования изделия и его связующая роль в цепи «наука — производство».

Чем значительней вклад ученых и исследователей в развитие радиоэлектронной техники, тем выше и ответственнее становится роль конструктора. Самые оригинальные научные открытия или практические идеи в этой области техники становятся полезными лишь в том случае, когда они реально осуществимы в изделиях и экономически выгодно используются в народном хозяйстве. Здесь надо учитывать, что практическая реализация научных открытий или технических идей как бы она ни была трудна, всегда остается за конструкторами.

Работа конструктора состоит из двух частей. Первая часть — творческая — заключается в поисках принципа действия конструкции, обеспечивающего требования технического задания, вторая часть — в реализации этого принципа в конкретную форму в виде комплекта конструкторской документации.

В процессе разработки изделия решение конструктивных вопросов производится, как правило, от общего к частному или от целого к его частям. Иначе говоря, в начале конструирования решаются главные вопросы, потом второстепенные и, наконец, детально существенные. Новая конструкция вначале формируется в сознании конструктора в виде мысленного образа, который отображается затем в графической форме как чертеж общего вида изделия. После реализации наиболее удачного образа в чертеже и его критического анализа производится подробная разработка частей и деталей.

Известно, что различные решения одной и той же задачи порождают варианты, анализ которых позволяет выбрать лучший по техническим и экономическим показателям. Кроме того, конструктор сравнивает новую конструкцию с использованными в предыдущих разработках. Объективно оценив таким образом новую конструкцию (объективность решения зависит от квалификации и опыта конструктора), конструктор определяет линию защиты ее в процессе обсуждения. Суметь защитить выбранное решение, привести исчерпывающие доказательства в его пользу — не менее трудная обязанность конструктора. Надо считать большим недостатком неспособность конструктора объективно оценить и защитить выбранный вариант.

Особенности деятельности конструктора. Являясь основным связующим звеном между работниками научно-технических отделов, технологической службы и производства, конструктор в силу своих обязанностей должен обладать способностью к быстрым и смелым техническим решениям. Риск должен быть основан не только на теоретических знаниях предмета, но и знаниях смежных областей техники, часто используемых в радиоэлектронном приборостроении.

Однако наличие только теоретических знаний предмета при разработке конструкции часто оказывается недостаточным. В дополнение к этому конструктор должен:

- а) иметь хорошо развитое пространственное представление;
- б) обладать зрительной памятью (уметь видеть и закреплять в памяти воображаемую форму);
- в) иметь хорошо развитое чувство пропорции и соотношения в размерах формы;
- г) обладать некоторым практическим опытом создания чертежей и выпуска конструкторской документации и уметь пользоваться нормами, стандартами, руководящим техническим материалом и производственными инструкциями;
- д) знать основные требования технической эстетики и инженерной психологии.

Здесь перечислены только основные специфические особенности, характерные для каждого конструктора.

При выполнении работ конструктор обязан проявлять возможно большую активность в поисках лучшего решения. Активно конструировать — значит создавать новое, постоянно анализируя существующие конструкции; а выбирая из существующих лучшее — уметь использовать все его качества в конкретном случае. Надо объективно оценивать различные конструктивные решения, не увлекаясь оригинальностью, всегда помнить об экономической целесообразности их реализации.

На всех этапах конструирования и производства изделия конструктор должен увязывать технические и экономические требования. Эти технические требования, как правило, противоречивы. Например, снижение объема или массы изделия противоречит повышению надежности за счет резервирования его элементов, увеличение прочности — снижению массы, создание простейшей конструкции — обеспечению оперативного доступа к ее элементам, повышение плотности компоновки элементов — улучшению условий охлаждения аппаратуры и т. д. Оказываясь постоянно в роли экспериментатора при определении уровня качества и стремясь найти наиболее точное соотношение между необходимым и возможным, конструктор все время рискует допустить ошибку. Знающий конструктор не внесет изменения в конструкцию до тех пор, пока не убедится, что качества, заложенные в конструкцию ранее, не ухудшатся.

Случается, что задачи оптимального сочетания качественных противоречий оказываются неразрешимыми. Настойчивый поиск их решения порождает принципиально новые направления, в которых оба противоречивых требования легко реализуются. Такие противоречия иногда называют внутренними качественными соотношениями, понимание которых способствует более качественному решению конструкции.

1.5. МЕТОДЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Известно, что из нескольких вариантов конструкции, решающей одинаковые функции, оптимальным может быть только один, который и должен быть принят к разработке. Он используется в последующих разработках до тех пор, пока не будет создан новый, более качественный вариант. Такой принцип положен в основу стандартизации и создает благоприятные условия для преемственности, повторяемости, типизации и унификации элементов конструкции.

Преемственность есть объем применения во вновь разработанном изделии ранее разработанных и освоенных производством деталей и узлов. Преемственность элементов конструкции снижает сроки разработки рабочих чертежей и стоимость подготовки производства за счет использования имеющегося инструмента.

Повторяемость характеризуется числом одинаковых узлов и деталей в изделии. При разработке конструкции требование сокраще-

ния номенклатуры деталей за счет увеличения повторяемости их в одном изделии приводит к упрощению конструкции и снижению стоимости ее изготовления.

Типизация есть процесс целесообразного сокращения многообразия конструкций за счет создания типовых широко применяемых деталей и узлов. Высшей формой типизации конструктивных составляющих является унификация изделий, узлов и деталей.

Унификация есть процесс сокращения многообразия типовых деталей и узлов или изделий путем объединения их в группы по определенным признакам и функциям. Унифицированные элементы конструкций предназначены для многократного применения в различных системах РЭА. Такие элементы имеют неоднократно проверенную технологию изготовления и единую номенклатуру приспособлений, режущего и контрольно-измерительного инструмента. Унифицированные элементы конструкции позволяют создавать различные приборы и устройства на базе исходных моделей с минимальными затратами времени. На базе унификации создаются производные блоков и приборов методом секционирования или агрегатирования, образующие серию радиоэлектронных устройств. Широкий охват элементов РЭА унификацией осуществляется при создании унифицированных рядов функциональных изделий, схожих по форме и отличающихся между собой параметрами (параметрические ряды) или при создании изделий, составленных из типовых деталей и отличающихся между собой только размерами (размерные ряды).

Параметрические ряды охватывают элементы с градацией параметров, используемых в РЭА. В таких рядах параметры могут быть представлены в виде мощности, емкости, сопротивления, силы тока, индукции, коэффициента усиления и т. д. Величина параметра обычно определяет и общие размеры элемента. По характеру образования параметрические ряды имеют три разновидности: размероподобные, однотипные и типоразмерные.

Размероподобные ряды представляют собой гамму или серию элементов одной функциональности, к такому ряду относятся, например, резисторы типа МЛТ, конденсаторы типа КМ и другие элементы, размеры которых изменяются подобно ряду их мощности, емкости и т. д.

Однотипные ряды охватывают диапазон однородных параметров ряда изделий, при создании которых используются одни и те же детали и узлы, унифицированные по размерам и форме. В качестве примера можно привести резисторы МЛТ одной мощности с градацией по сопротивлению.

Типоразмерные ряды охватывают изделия различных типов и параметров, но выполняющих однородные функции.

Размерные ряды охватывают геометрически подобные изделия. Их размеры могут изменяться произвольно или кратно какому-либо одному размеру, например шагу установки микросхем. Особенно широко применяют размерные ряды при унификации элементов и узлов несущей конструкции РЭА. Они выгодны при смежных

разработках систем с участием различных организаций, не связанных между собой единими нормами или руководящими техническими материалами.

Произвольно компоновочный ряд используется при конструировании аппаратуры, компонованной в унифицированных стойках, шкафах или контейнерах, размеры которых установлены сложившимися традициями предприятия, условиями размещения на объектах или специальными требованиями.

Кратно изменяющийся ряд размеров широко используют в аппаратуре при разработке блоков кассетного типа, субблоков и электронных ячеек. Такой ряд размеров обеспечивает простую компоновку взаимозаменяемых блоков, размещаемых в большом количестве по вертикальной площади приборной стойки.

Степень унификации оценивают коэффициентом, который представляет собой отношение количества унифицированных деталей N_y к общему количеству деталей в изделии N :

$$K_y = N_y / N. \quad (1.1)$$

Нормализация есть метод внедрения в пределах предприятия, объединения или ведомства норм, рационально ограничивающих разнообразие типоразмеров конструкции, материалов, полуфабрикатов, режущего и измерительного инструмента и других норм общей применимости. Документом, регламентирующим обязательное применение какой-либо из указанных норм, является нормаль. Нормалью определяется также ограничение норм общей применимости, указанных в ГОСТ.

Нормализация конструктивных элементов сокращает типоразмеры, ограничивает номенклатуру используемых в изделии деталей и узлов, размеров, покрытий, диаметров отверстий, резьб, крепежных изделий и т. д. Нормализация вносит определенный порядок в инструментальное хозяйство и регламентирует широкий круг вопросов при разработке и изготовлении изделия в производстве. Это не только ускоряет процесс разработки конструкции и ее рабочих чертежей, но и в значительной мере сокращает время изготовления, упрощает эксплуатацию изделия и, наконец, указывает пути наиболее экономичного решения конструкции. В разработанном изделии РЭА объем нормализации составляет от 50 до 85%, с учетом же нормализованного сортамента марок материалов, крепежных изделий, резьб, линейных размеров и других норм объем нормализации находится в пределах от 80 до 100%.

Нормаль должна отвечать всем требованиям, которые предъявляются к разрабатываемой аппаратуре. В противном случае она не найдет широкого применения. Устаревшая нормаль оказывает не только бесполезной, но и вредной, тормозящей развитие технического прогресса.

Стандартизация есть метод обеспечения единства качества параметров массовой промышленной продукции, снижения ее разнообразия и трудоемкости изготовления путем установления обязательных норм на параметры изделий или производственные про-

цессы. Документами, регламентирующими указанные нормы, являются государственные общесоюзные стандарты (ГОСТ), которые обязательны к применению наравне с установленными государством законами. В системе государственной стандартизации действуют также различные общесоюзные стандарты по отдельным ведомствам и отраслям (ОСТ), которые обязательны для отдельной отрасли промышленности. Наряду с ГОСТами имеются также стандарты международные, принятые при участии СССР, они становятся обязательными при разработке РЭА.

Стандартизация устраняет разнотипность изделий, определяет уровень норм и требований к физическим и размерным величинам, сырью, материалам и продукции массового изготовления. Она производится на основании общих мер единообразия понятий, качественной оценки и взаимозаменяемости. Главными в стандартизации являются общетехнические нормы, в том числе Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Исходным пунктом для стандартизации служат результаты достижений передовых предприятий, результаты научно-исследовательских и экспериментальных работ и использование опыта эксплуатации.

1.6. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ

Технологичность изделия есть степень пригодности его к промышленному изготовлению без существенных изменений и в определенном количестве с минимальной стоимостью. Способ изготовления зависит от уровня производства и количества выпускаемых изделий. Технологичность в отличие от технологического процесса есть качественное свойство, заложенное в изделие при его разработке. Это свойство предусматривает: возможность изготовления изделия с наименьшими затратами труда и материалов; законченный цикл производства для каждой сборочной единицы; несложность производственных циклов с наименьшим числом технологических операций; снижение затрат на дополнительное оборудование и производственные площади и т. п. (см. § 1.3).

Вопросы технологичности могут быть учтены со всей полнотой при одновременной разработке конструкции и технологии изготовления. При разработке конструкции следует предусматривать минимально необходимые точности изготовления, выбирать геометрию деталей, способствующую удобной установке при их обработке, или узла при сборке с использованием простых установочных приспособлений.

Допуски сборочного процесса δ_N должны устанавливаться возможно широкими, так как необоснованное уменьшение неизбежно усложняет изготовление и увеличивает стоимость. Рассматривая уравнение полной взаимозаменяемости $\delta_N = \sum_{i=1}^n \delta_{li}$, где δ_{li} — допуск составляющего размера размерной цепи, а n — количество составляющих размеров, можно сделать вывод, что при условии постоянства допуска на всю размерную цепь чем больше размер-

ных звеньев в размерной цепи, тем выше допуски на изготовление деталей, входящих в эту цепь.

Любое конструктивное решение по своей природе является одновременно и технологическим. Одну и ту же деталь можно изготовить из различных материалов разнообразными технологическими операциями: литьем, штамповкой, фрезеровкой и т. д. Признаки технологичности и являются теми критериями, на основании которых выбирается окончательный вариант.

Наиболее эффективными при изготовлении являются обработка деталей с минимальными отходами материала способами точного литья, прессовкой, холодной вытяжкой, штамповкой, использование стандартных профилей, тонколистового проката и автоматической сварки. При изготовлении деталей этими способами снижается расход материалов, резко сокращаются трудоемкость и производственный цикл изготовления.

Чтобы обеспечить высокое качество изделия с минимальной трудоемкостью, уже при разработке конструкции стремятся предусматривать использование автоматических методов изготовления и контроля. Для РЭА автоматизация изготовления и особенно процессов сборки и контроля является наиболее важной частью разработки технологических процессов и часто решает темпы наращивания производительности и увеличения качества РЭА.

В технологическом отношении особую группу в РЭА представляет микроэлектронная аппаратура (МЭА). Микроминиатюризация опирается прежде всего на высокий уровень технологии, а процесс ее развития предъясвляет более высокие требования к технологичности МЭА. Чем меньше размеры схемных элементов и сборочных узлов, тем выше роль технологичности и технологических процессов изготовления.

Автоматизация производственных процессов изготовления МЭА оправдывает себя лишь при условии максимальной унификации элементов, существенного снижения номенклатуры конструктивных составляющих и изготовления большими партиями. Отсюда одной из важных задач является создание технологичных элементов конструкции, имеющих самую широкую применимость с обеспечением возможности централизации производства при большом количестве технологичных функциональных узлов, блоков и элементов несущей конструкции.

Оценка технологичности производится по основным технологическим свойствам: применимости нормализованных узлов и деталей; преемственности ранее разработанных изделий; повторяемости деталей и узлов в разработанном изделии; однотипности материалов и сортамента; эффективности использования материала; отношению деталей штампованных, прессованных, литых к общему количеству деталей и т. д.; каждое свойство определяется в виде коэффициента.

Применение нормализованных деталей в разрабатываемой РЭА приводит к сокращению сроков и стоимости изготовления. Степень внедрения нормалей в новом изделии характеризуется *коэффици-*

коэффициентом нормализации K_n , представляющим собой отношение числа нормализованных деталей и узлов в изделии N_n к общему числу деталей и узлов в нем N ,

$$K_n = N_n/N. \quad (1.2)$$

Преимственность определяется отношением числа наименований примененных деталей и узлов $N_{пр}$ к общему числу наименований деталей и узлов, принятых в разработанном изделии, N . Это отношение называют коэффициентом преимственности

$$K_{пр} = N_{пр}/N. \quad (1.3)$$

Количественная оценка повторяемости (см. § 1.5) определяется коэффициентом повторяемости K_p , который представляет собой отношение количества одинаковых узлов и деталей N_p к общему количеству деталей и узлов, входящих в изделие, N :

$$K_p = N_p/N. \quad (1.4)$$

Эффективность использования материалов в значительной мере зависит от сокращения отходов при их обработке. Степень оптимального расходования материала определяется коэффициентом использования K_d , а именно отношением массы материала деталей, изготовленных для изделия, G_d к общей массе использованных заготовок G_m :

$$K_d = G_d/G_m. \quad (1.5)$$

Общий коэффициент технологичности K_t определяется среднеарифметическим значением суммы отдельных коэффициентов, рассмотренных выше:

$$K_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i. \quad (1.6)$$

1.7. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АППАРАТУРЫ

Известно, что надежность изделия бесконечно поддерживать ремонтами невозможно. В конце концов наступает момент, когда из-за полного физического износа дальнейшая эксплуатация изделия становится нецелесообразной или невозможной. Однако бывают и такие случаи, когда изделие действует нормально, но затраты на его эксплуатацию в сравнении с затратами на эксплуатацию новых усовершенствованных изделий настолько велики (или производительность так мала), что дальнейшее использование его становится невыгодным.

Долговечность РЭА определяется общим временем ее работы при нормальном режиме и предусмотренных условиях эксплуатации с учетом всех восстановительных работ до полного физического или морального износа.

При разработке РЭА долговечность ее, как и надежность, должна быть обеспечена в том объеме, который требуется техническим заданием. Излишняя долговечность не только увеличивает стои-

мость изделия, но и способствует созданию условий для застоя технического уровня, достигнутого в этом направлении. Однако и недостаточная долговечность снижает эффективность изделия и в конечном счете приводит к увеличению его стоимости.

Ожидаемая долговечность изделия зависит от многих обстоятельств и в первую очередь от условий окружающей среды, квалификации обслуживающего персонала, качества материалов и своевременности профилактических ремонтов. Как видно, она не может быть определена точным отрезком времени, поэтому причины, определяющие ее, не могут быть выражены численным значением. При определении долговечности эта неопределенность заставляет прибегать к методам теории вероятности и математической статистики.

Количественная оценка вероятностной долговечности РЭА определяется сроком службы (работы) в часах. Для некоторых видов аппаратуры она может выражаться количеством включений — выключений, числом операций и т. д.

Физический износ — износ материальной части изделия до такого состояния, при котором дальнейшая эксплуатация его невозможна, а восстановление изношенных частей экономически нецелесообразно. Долговечность несущей конструкции рассчитывают исходя из среднего времени работы аппаратуры до капитального ремонта. Физический износ наступает вследствие потери размеров деталей, обгорания контактов, естественного старения материалов и т. д. Для РЭА особо характерными формами материального износа являются изменение физических и химических параметров электрорадиоэлементов. Типичными примерами естественного старения являются окисление, полимеризация, рекристаллизация материалов. Определенное воздействие на износ и старение оказывают температура, влажность и изменение давления. Размеры физического износа во многом предопределяются качеством комплектующих элементов, полуфабрикатов и материалов.

В результате механического износа увеличиваются зазоры, образуются недопустимые люфты, перекосы и заедания в направляющих, шарнирах, ограничителях и крышках. Уплотнения разбалтываются, нарушается герметичность аппаратуры, ухудшаются ее тепловой режим и амортизация. Особенно ощутимо переносится зрительное воздействие старения, когда нарушается поверхностная отделка, изнашиваются или отслаиваются гальванические покрытия или внешняя окраска.

В целях наиболее точного учета физического износа в аппаратуре устанавливают счетчики проработанного времени. Учет физического износа производят на основании фактически отработанного времени Φ и среднего срока службы C , установленного для данной РЭА. Степень материального износа в процентах определяется выражением $I = (\Phi/C) 100$ и предполагаемым остаточным сроком службы $P = C - \Phi$.

Долговечность аппаратуры зависит от прочности, жесткости и виброустойчивости конструкции, износоустойчивости деталей или

ремонтпригодности изношенных элементов, от материалов (мало поддающихся старению) и антикоррозионных (лакокрасочных) покрытий.

Аппаратура изнашивается не только в процессе эксплуатации, но и во время простоя или хранения. И в этом случае старение деталей и материалов вызывает необратимые изменения (потерю изоляционных свойств и т. п.). Не меньшую роль играет утрата прочностных параметров в результате износа мест трения или усталости материала. Массовым явлением старения является потеря упругих свойств пружин, демпферов, амортизаторов, уплотнительных прокладок, снижение емкости конденсаторов и т. д.

Моральный износ аппаратуры — широкое понятие. Оно включает в себя понятие полного, частичного или скрытого износа. *Полный моральный износ* характеризуется полной убыточностью использования аппаратуры по сравнению с вновь выпущенной. *Частичный моральный износ* предшествует полному и обуславливается невыгодностью применения аппаратуры по некоторым ее параметрам или отдельным операциям, в то время как по другим операциям она используется эффективно. Такая аппаратура нуждается в модернизации или применяется в условиях, когда отдельные менее важные функции не используются. *Скрытый моральный износ* наступает, когда проектные организации, руководствуясь техническим состоянием данной аппаратуры, приступают к разработке новой модели. Чем дальше продвигается разработка аналога, тем явственнее скрытый моральный износ. Нарастает угроза частичного или полного морального износа такой аппаратуры.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

2.1. МЕТОДЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

При разработке современной РЭА с большим числом взаимосвязанных элементов неизбежно возникают обстоятельства, требующие привлечения таких методов конструирования, которые способствовали бы решению широкого круга сложных и разнообразных задач. Как показал опыт, в этой области неоспоримыми преимуществами пользуются удачно сочетающиеся между собой методы геометрического, машиностроительного и топологического конструирования.

Геометрический метод конструирования, получивший свое развитие в процессе совершенствования метода конструирования приборов точной механики, широко используется при разработке РЭА. Принцип геометрического метода вытекает из основных положений геометрии. С помощью этого метода решают задачи обеспечения точных связей при взаимном расположении элементов без избыточной определенности. Малые нагрузки и незначительные удель-

ные давления в связях допускают применение точечных опорных площадок, шаровых опор, направляющих призм и других элементов связи.

Преимуществом геометрического метода является возможность сравнительно простыми средствами получить высокую точность связей и правильную геометрию размещения элементов конструкции. При этом следует учитывать, что характер взаимосвязи деталей почти не зависит от погрешности их изготовления.

Однако этот метод конструирования имеет ограниченные возможности и не решает всего круга вопросов, связанных с наличием больших нагрузок, деформаций и удельных давлений. Этот пробел восполняет метод конструирования, используемый в машиностроении и называемый машиностроительным.

Машиностроительный метод конструирования, используя основные положения геометрического метода, расширяет возможности оптимального решения ряда задач в нагруженных конструкциях с подвижными и неподвижными замкнутыми силовыми связями. Учитывая требования увеличения износоустойчивости поверхностей и уменьшения деформаций в элементах конструкции, машиностроительный метод допускает в связях избыточную определенность при установке на плоскости более трех опор, на линии — более двух опор и образование опорных плоскостей вместо опорных точек.

Машиностроительный метод конструирования широко использует допуски и посадки, соединения трением и запрессовкой, креплением зажимами, скобами и другими способами. Этот метод особенно широко используют при разработке элементов несущей конструкции РЭА, рассматриваемых в последующих главах.

Топологический метод конструирования есть графическое представление взаимного расположения элементов конструкции и соединяющих их электрических цепей с реализацией свойств, заложенных в принципиальной схеме. Топологический метод основан на соответствии элементов конструкции РЭА графу и эквивалентности графического построения фигур. В условиях разработки РЭА число неоднозначных вариантов может быть значительным, и без привлечения топологического метода конструктору подчас трудно отыскать оптимальный вариант. Использование основных положений топологии и, в частности, теории графов позволяет путем преобразования графа найти более удачную форму его изображения. При этом схему связи изображают взаимоднозначной фигурой — графом, вершины которого обозначают узлы связи или элементы схемы, а ребра, связывающие вершины между собой, — линии связи или проводники. Этот метод успешно используют при разбиении общей схемы на узлы, взаимном размещении базовых элементов на плате, трассировке электрических соединений и разработке структур микросхем.

Топологический метод позволяет решать задачи возможного сокращения количества проводников, их длины, числа паяных соединений, выводов на разъемы с учетом обеспечения параметров в соответствии с заданными свойствами конструкции.

2.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Использование систем ЭВМ при разработке РЭА. Задачи, решаемые в процессе разработки РЭА с помощью ЭВМ, можно разделить на три группы.

К первой группе относятся работы, связанные с выполнением сводных конструкторских документов и получением некоторых сведений, определяющих качество конструкции и технологичность изделия. Разработка таких документов обычным способом связана с пересмотром сотен и тысяч чертежей, извлечением необходимых данных и заполнением специальных карточек с последующим обобщением их и оформлением в виде технических документов.

Получение необходимых обобщенных данных и составление ведомостей с помощью ЭВМ в сотни раз снижает трудоемкость выполнения этих работ. Практически установлено, что для получения этой информации машинным способом преобладающее число сведений, необходимых для ввода в ЭВМ, находится в отделах хранения технической документации и накапливается там попутно, при составлении карточек учета и хранения в соответствии с требованиями ГОСТ 2.501.68 ЕСКД. Эти сведения наносятся на перфокарту и вводятся в память ЭВМ.

Ко второй группе относятся работы, связанные с выполнением контрольных расчетов развернутого типа. Сравнительно несложные по алгоритмизации эти расчеты отличаются трудоемкостью и связаны с длительными однотипными вычислительными операциями, в то время как предварительные или ориентировочные расчеты конструктор делает вручную.

К третьей группе относятся задачи оптимального конструирования РЭА с помощью ЭВМ. Эти задачи являются наиболее важными и имеют широкую перспективу развития. Однако масштабы возможности автоматизированных решений пока ограничиваются созданием удобных алгоритмов процессов проектирования и формализацией входных данных, точно описывающих эти процессы. В настоящее время в области автоматизации проектирования в некоторой степени накоплен опыт по созданию алгоритмов и библиотек стационарных программ, в том числе и относящихся к размещению структурных уровней аппаратуры и разработке ее электрического монтажа или кабельной связи.

Поиск оптимальной топологии в РЭА базируется на использовании теории графов. Поэтому представляется полезным кратко ознакомиться с ней.

Основные определения и свойства графов. Граф G представляет собой фигуру, состоящую из множества точек X (вершин) и множества ребер U (ветвей). Каждое ребро соединяет пару каких-либо вершин. Граф вида $G = (X, U)$ может быть выражен в аналитической, геометрической или матричной форме. Каждая пара вершин графа соединена ребром. Ребро называют *инцидентным* вершине, если оно соединяет ее с какой-либо другой верши-

ной. Любые две вершины, связанные между собой ребром, называют *смежными*.

Полный граф — это граф, у которого любая пара вершин соединена ребром, в отличие от *неполного графа*, между некоторыми парами вершин которого нет замыкающих ребер. Граф называют *плоским*, если он не имеет пересекающихся ребер, в отличие от *неплоского графа*, в котором таких пересечений избежать нельзя. Некоторые видимые в графе пересекающиеся ребра еще не есть перекрестные, если пересечения их можно избежать соединением инцидентных им вершин ребрами в виде дуг, огибающих остальные вершины. У графа можно изменить порядок следования вершин при условии сохранения того же порядка соединения их инцидентными ребрами. Преобразованный таким образом граф называют *изоморфным*, т. е. сходным по форме с начальным графом. Примеры геометрического построения и преобразования различного вида графов приведены на рис. 2.1.

Маршрутом S называют конечную последовательность неповторяемых ребер. Длина маршрута определяется числом ребер и их

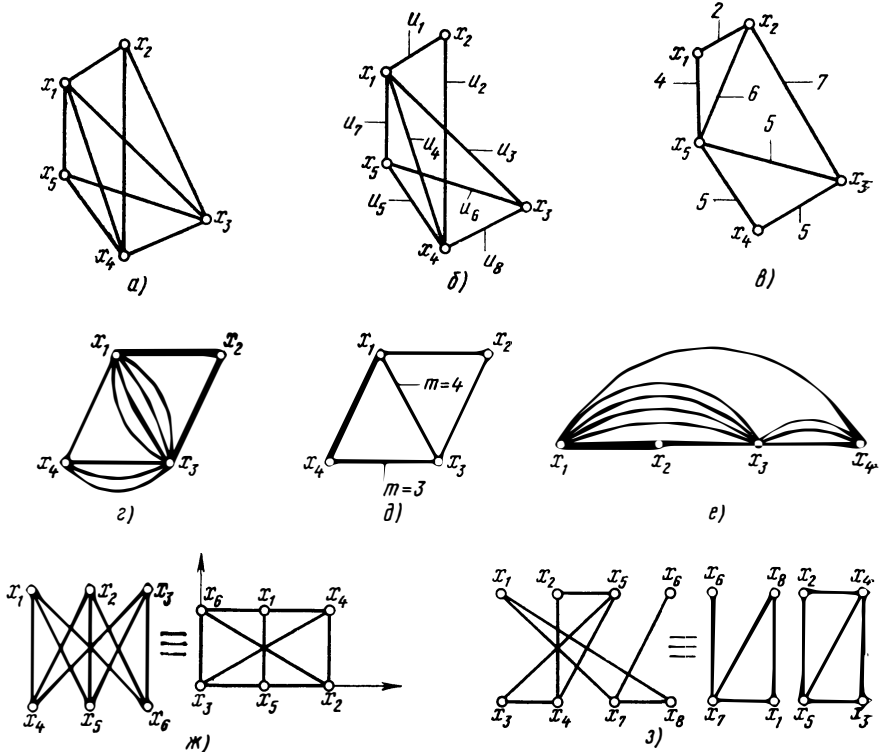


Рис. 2.1. Графическое представление графов

а — полный граф; *б* — неполный; *в* — плоский; *г* — мультиграф; *д* — скелет мультиграфа; *е* — граф в виде линейки; *ж* — преобразование графа в изоморфный; *з* — преобразование неплоского графа в плоский

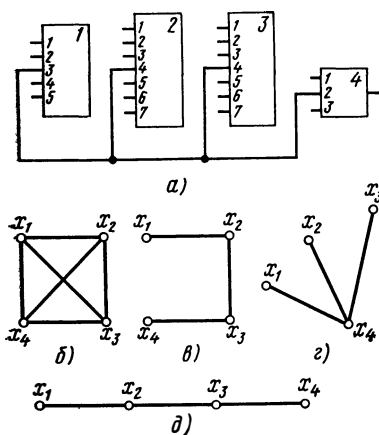
длиной. Цепь в графе образуется таким маршрутом, в котором нет повторяющихся ребер. Маршрут, в котором совпадают начальная и конечная вершины, называют циклом C_s . Например, на рис. 2.1, з имеется цикл $u_1(x_1, x_7)$, $u_2(x_7, x_8)$, $u_3(x_8, x_1)$.

Важным свойством графов является связность. *Граф называют связным*, если две его любые вершины связаны цепью. Множество вершин графа можно разбить на непересекающиеся компоненты связности, подграфы и суграфы. В связном графе перешейком называют ребро, после удаления которого граф распадается на две компоненты связности. Образование компонентов связности упрощает решение многих практических задач при исследовании подграфов.

Связный граф с числом вершин не менее двух, у которых соединение ребер не образует ни одного замкнутого контура, называют деревом G_d . Дерево имеет только одну компоненту связности. Несвязный граф, у которого отсутствуют циклы и содержится менее четырех вершин, составляет множество деревьев. Такой граф называют лесом G_d . Минимальный лес состоит из минимального числа деревьев.

Переход от электрических схем к графам и матрицам. При решении задач конструирования РЭА машинным способом используют абстрактные математические модели электрических схем и алгоритмы, легко поддающиеся программированию для реализации на ЭВМ. В наиболее приемлемом способе перехода от электрических схем к графам $G = (X, U)$ для решения задач конструирования элементы схемы принимаются за вершины $X = (x_i, x_j)$, а электрические цепи — за ребра $U = (u_i, u_j)$.

В процессе перехода от схем к графам необходимо учитывать специфику схемных элементов и предусматривать простую развязку узлов электрической цепи схемы. На рис. 2.2 показаны элементарная электрическая схема соединений из четырех элементов и возможные варианты отображения ее в граф. Как видно из рис. 2.2, б, вариант в виде полного графа имеет большое число избыточных ребер,



усложняющих решение задачи, поэтому стремятся использовать более простые варианты графов, показанные на рис. 2.2, в, г, д. Также с целью упрощения задачи цепи схемы, общие для всех элементов (цепи питания, земля), при переходе к графам не учитываются.

Принципиальные электрические схемы или схемы соединений отдельных составляющих РЭА не содержат замкнутых контуров и параллельных связей, поэтому они мо-

Рис. 2.2. Схема соединения (а) и ее полный граф (б), неполный граф (в), дерево графа (г), линейка графа (д)

гут быть выражены плоскими графами. Основой для прокладки монтажных проводников служит монтажная плоскость, обычно изображаемая в виде координатной сетки. Граф, нанесенный на плоскости сетки, образует множество узлов (вершин), представляющих собой схемные элементы. Вершины графа соединяются наиболее короткими ребрами в соответствии с электрической схемой. На рис. 2.3 показан пример перехода от электрической схемы к графу, выраженному в координатной сетке 1×1 .

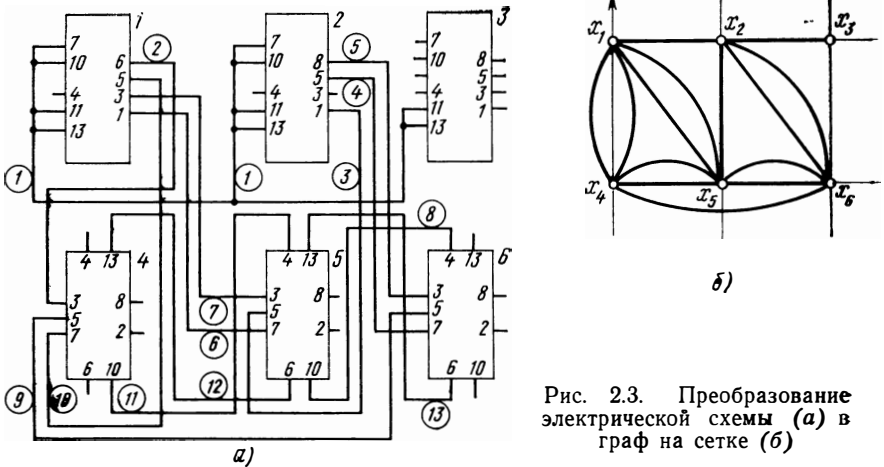


Рис. 2.3. Преобразование электрической схемы (а) в граф на сетке (б)

Задание графов и их формальное преобразование удобнее проводить с помощью матриц. Преобладающая часть известных алгоритмов конструирования работает с использованием матриц: смежности $R = \|r_{ij}\|_{n \times n}$; инцидентности $I = \|r_{ij}\|_{n \times r}$; расстояния $D = \|d_{ij}\|_n$; геометрии $L = \|d_{ij}\|_n$; цепей $T = \|r_{ij}\|_{n \times m}$. Здесь: r_{ij} — число ребер, инцидентных вершинам x_i и x_j ; n — число вершин графа; d_{ij} — расстояние между вершинами графа; t_{ij} — номер цепи в схеме, принадлежащий контактам узла (вершине); m — число контактов узла в схеме.

Например, матрица смежности графа, изображенного на рис. 2.1, д, будет иметь вид

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \rho(x_i) \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 4 & 1 & 6 \\ 1 & 3 & 1 & 0 & 5 \\ 4 & 1 & 1 & 3 & 9 \\ 1 & 0 & 3 & 2 & 6 \end{vmatrix} \end{matrix},$$

где 0 указывает на отсутствие соединения вершин x_i и x_j ребром, а остальные числа указывают на количество соединяющих ребер.

Матрица инцидентности для графа, изображенного на рис. 2.1,б, будет иметь вид

$$I = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 & u_7 & u_8 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right\| \end{matrix},$$

где 1 означает, что данная вершина x_i инцидентна ребру u_i , а 0 — что вершина неинцидентна указанному ребру.

Функцию расстояний между вершинами графа характеризует матрица расстояний, которая для графа, изображенного на рис. 2.1, в, напишется в следующем виде:

$$D = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{ccccc} 0 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right\| \end{matrix}.$$

Здесь число матрицы показывает количество связывающих вершины ребер наименьшей длины. Когда в графе задана длина ребер, то в матрице расстояний вместо количества ребер между рассматриваемыми вершинами удобнее указывать их суммарную длину. Например, для графа, приведенного на рис. 2.1, в, где у ребер указана длина, матрица расстояний напишется в виде

$$D_l = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{ccccc} 0 & 2 & 9 & 9 & 4 \\ 2 & 0 & 7 & 11 & 6 \\ 9 & 7 & 0 & 5 & 5 \\ 9 & 11 & 5 & 0 & 5 \\ 4 & 6 & 5 & 5 & 0 \end{array} \right\| \end{matrix}.$$

Для графа, преобразованного в решетку с заданными размерами ячейки (рис. 2.1, ж), матрица расстояний напишется в виде

$$D_r = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccccc} 0 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 3 \\ 2 & 2 & 0 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 1 & 2 & 2 & 0 \end{array} \right\| \end{matrix}.$$

Матрица геометрии L графа, отображенного в решетке G_r , позволяет подсчитать суммарную длину его ребер. Например, матри-

ца геометрии графа, отображенного в решетке (рис. 2.1, ж), имеет вид

$$\mathbf{L} = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & \rho(x_i) \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\| \begin{matrix} 3 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 3 \\ 5 \end{matrix} \end{matrix} \quad 0,5 \sum_{i=1}^k l_i = 26 / 2 = 13 \text{ ед.}$$

Матрица цепей \mathbf{T} используется, когда рассматриваемая электрическая схема имеет большое количество элементов и разветвленных узлов в цепях. Для построения такой матрицы каждой цепи и узлу предварительно присваивают определенный номер, тогда матрица цепей для схемы, приведенной на рис. 2.3, напишется в виде

$$\mathbf{T} = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccccccccccc} 6 & - & 7 & - & 10 & 2 & 1 & - & - & 1 & 1 & - & 1 \\ 3 & - & - & - & 4 & - & 1 & 5 & - & 1 & 1 & - & 1 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & 1 & - & 1 \\ - & - & 2 & - & 9 & - & 10 & - & - & 11 & - & - & 12 \\ - & - & 7 & 11 & 3 & 12 & 6 & - & - & 8 & - & - & 13 \\ - & - & 5 & 8 & 9 & 13 & 4 & - & - & - & - & - & - \end{array} \right\| \cdot
 \end{matrix}$$

Здесь сверху матрицы нанесены номера контактов, слева — номера элементов (вершин), а в матрице — номера цепей.

2.3. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Основные критерии размещения. Основным документом для решения топологии при компоновке элементов РЭА служат принципиальные электрические схемы, схемы соединения, геометрия монтажных площадок (панелей, плат, шасси), размеры и форма размещаемых элементов. На размещение элементов значительное влияние оказывают также принятые в каждом случае критерии оптимального конструирования.

В качестве основных критериев принимают минимальные значения: расстояния между элементами, имеющими наибольшее количество соединительных проводников; суммарной длины проводников; количества проводников; количества пересечений (для печатного монтажа); количества проводников, присоединяемых к одной монтажной точке; количества проводников, присоединяемых к контактам электрических соединителей, соединительных планок и других опорных точек.

С уменьшением расстояний между радиоэлектронными элементами или между проводниками появляется опасность превышения допустимых пределов паразитных связей, при этом можно ожидать и ухудшения теплового режима. Таким образом, к перечисленным

выше критериям прибавляются еще и критерии функционального качества, выражаемые электромагнитной совместимостью и тепловым градиентом.

Как видно, задача размещения схемных элементов РЭА относится к типу сложных, так как даже критерии оптимальности тесно связаны между собой и противоречат друг другу. Численное решение таких задач можно получить лишь методом машинного поиска с постепенным приближением к оптимальному варианту.

Размещение схемных элементов на монтажной площадке, выраженное в виде матриц или в математической форме, можно представить как задачу оптимизации графа. Эта задача решается различными методами, которые можно разбить на две группы.

К первой группе относятся методы механического подобия, в которых между размещаемыми элементами условно вводят механические связи, пропорциональные длинам проводников между этими элементами. Наименьшие связи соответствуют минимальной длине проводников. Введением условных сил трения системе сообщают устойчивое состояние. Ориентацию выводов от схемных элементов на контактные площадки создают условными моментами сил. И, наконец, введением сил, обратно пропорциональных расстоянию между элементами и границей монтажного поля (края платы), т. е. сил, отталкивающих точки друг от друга, ограничивают передвижение элементов пределами монтажной платы. Подобный метод позволяет свести задачу поиска оптимального варианта размещения элементов к составлению системы дифференциальных уравнений движения материальных точек и решению этих уравнений численным методом с помощью ЭВМ [28].

Ко второй группе относятся методы постепенного улучшения размещения, вначале с наибольшим числом присоединяемых проводников, транспортированием их на монтажной площадке, пока суммарная длина их не будет минимальной. Одновременно исползуют эквивалентность между перестановкой элемента на плате и соответствующих строк и столбцов в матрицах связей. Иногда такие задачи решают поэтапно, начиная с произвольного размещения элементов.

За математическую модель монтажной площадки принимают плоскость сетки с ячейками единичного размера. На сетке располагают схемные элементы с минимально допустимым расстоянием между ними. Эти расстояния выражаются в виде сумм $l + h\lambda$ и $l' + h\lambda$, где l и l' — унифицированные размеры элементов определенных структурных уровней, размещаемых на пластинках, платах, панелях и рамах; h — шаг модульной или координатной сетки монтажной платы и λ — принятый модуль 0, 1, 2, 3 и т. д.

Разбиение графа (электросхемы) на куски (узлы). Процесс образования конструктивных единиц РЭА высшего уровня из элементов более низкого уровня связан с поиском оптимальных вариантов компоновки. При этом одним из важных критериев компоновки надо считать минимум проводников междуузловых, меж-

блочных и межприборных связей или минимум внешних электрических контактов каждой сборочной единицы.

Формальное решение минимизации может быть выполнено при отображении электрической схемы в виде графа и разбиении его на заданное число подграфов (узлов), соединяемых между собой минимальным количеством ребер (проводников).

При разбиении графа на подграфы могут быть поставлены различные требования и ограничения, например получение подграфов с равным числом вершин или закрепление за определенными подграфами некоторых вершин, запрещенных для других подграфов по соображениям магнитной или тепловой совместимости.

Оптимальным числом разбиения графа может служить коэффициент разбиения ΔG , который представляется как отношение суммы ребер, заключенных во всех кусках, к числу ребер, соединяющих куски между собой:

$$\Delta G = \sum_{i=1}^l K_{ii} / \left(0,5 \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l K_{ij} \right) = \sum_{i=1}^l U_i / K_i, \quad (2.1)$$

где K_{ii} — число внутренних ребер в подграфе, $K_{ii} = U_i$; K_{ij} — число соединительных внешних ребер в подграфе, $K_{ij} = U_{ij}$; K_i — число ребер, соединяющих подграфы между собой, $K_i = 0,5 \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l K_{ij}$.

Поиск оптимального решения разбиения графа на подграфы связан с перебором большого числа вариантов. В процессе поиска стремятся к такому решению, при котором коэффициент разбиения ΔG оказывается максимальным или число соединительных ребер минимально.

Из известных методов поиска оптимальных вариантов разбиения графов на подграфы наибольшее применение нашли эвристические алгоритмы разбиения, которые позволяют за конечное число шагов получить результат, вполне достаточный для практики. Рассмотрим алгоритм последовательного разбиения. Идея метода состоит в разбиении графа на подграфы, каждый из которых будет составлен из максимального числа ребер, в результате чего получится минимальное число ребер, соединяющих эти подграфы.

Проследим порядок разбиения графа G на l подграфов G_1, G_2, G_3 с числом вершин в каждом n_1, n_2, \dots, n_l [27]. Вначале в графе G отыскивается вершина с наименьшей локальной степенью $\rho(x_i)_{\min}$, с нее начинается образование первого подграфа $G_1 = (X_1, U_1)$. При этом из ряда вершин с минимальной локальной степенью в матрице смежности предпочтение отдается той вершине, которая имеет большее число кратных ребер. В этот же подграф включают все смежные вершины x_i . Общее количество вершин в первом подграфе не должно превышать заданного n_1 . Если это число меньше, то из оставшегося графа $G^* = (X^*, U^*)$ выбирается вершина, удовлетворяющая условию $\sigma(x_j) = \rho(x_i) - r_j$,

где r_j — число ребер, соединяющих вершину x_j с вершинами оставшегося графа. После образования первого подграфа процесс образования для второго подграфа G_2 повторяется и т. д.

Пример 1. Общая схема, преобразованная в граф G (рис. 2.4,а), должна быть разбита на три подграфа G_1, G_2, G_3 , содержащих соответственно 3, 2 и 4 вершины и максимальное количество ребер. Вершина x_9 является запрещенной для вершин x_2 и x_7 .

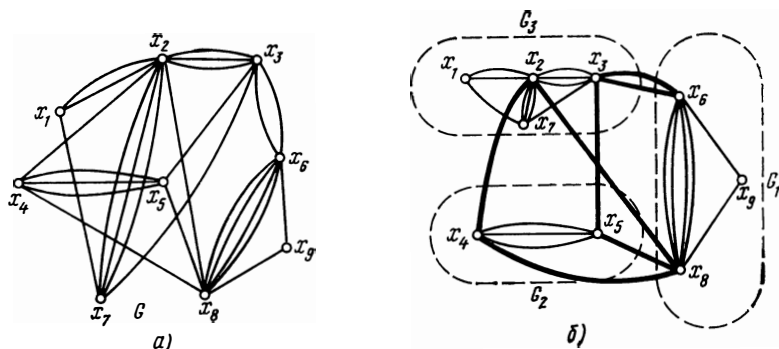


Рис. 2.4. Разбиение графа (а) на подграфы (б) с минимальным количеством соединительных ребер

Матрица смежности графа G имеет вид

$$\mathbf{R} = \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{array} \parallel \begin{array}{cccccccc}
 x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 \\
 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 0 & 3 & 1 & 0 \\
 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 \\
 1 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 4 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0
 \end{array} \parallel \begin{array}{c} \rho(x_i) \\ 3 \\ 10 \\ 7 \\ 5 \\ 5 \\ 7 \\ 5 \\ 7 \\ 2 \end{array}
 \end{array}$$

1. Из матрицы смежности графа $G=(X, U)$ выбираем вершину с минимальной локальной степенью $\rho(x_9)=2$ и относим ее в первый подграф G_1 .

2. Добавляем в этот подграф незапрещенные вершины, связанные с x_9 наибольшим числом ребер. Такими вершинами, как видно из матрицы, являются x_6 и x_8 . Первый подграф G_1 , состоящий из трех вершин $X_1=(x_6, x_8, x_9)$, считаем сформированным.

3. Удалим из графа G подграф G_1 , на оставшийся граф G^* составим новую матрицу смежности

$$\mathbf{R}' = \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_7 \end{array} \parallel \begin{array}{cccccc}
 x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_7 \\
 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 2 & 0 & 3 & 1 & 0 & 3 \\
 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 \\
 1 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \parallel \begin{array}{c} \rho(x_i) \\ 3 \\ 9 \\ 5 \\ 4 \\ 4 \\ 5 \end{array}
 \end{array}$$

4. Для второго подграфа выбираем из этой матрицы вершину x_1 , которая также имеет минимальную локальную степень $\rho(x_1)=3$. В этот подграф вклю-

чаем вершины с наибольшим числом ребер, инцидентных вершине x_1 . Как видно из матрицы, такими вершинами являются x_2 и x_7 . Одновременно x_2 имеет максимальное число инцидентных ребер с вершиной x_3 , которую также включаем в подграф. Таким образом считаем, что подграф G_2 , состоящий из четырех вершин, $X_2 = (x_1, x_2, x_3, x_7)$, сформирован.

5. В последний третий подграф G_3 входят две оставшиеся вершины $X_3 = (x_4, x_5)$.

Граф G , разбитый на подграфы G_1, G_2, G_3 , показан на рис. 2.4,б. Он имеет 9 вершин, 26 ребер, из них 7 ребер соединительные

$$\sum_{i=1}^l (U_i) = 26 - 7 = 19; K_i = (1/2) \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (U_{ij}) = 7.$$

Поэтому коэффициент разбиения для рассмотренного случая определится из формулы (2.1): $\Delta G = 19/7 = 2,72$.

При большем числе элементов в схеме со сложным разветвлением цепей разбиение графа на подграфы удобнее производить с помощью матрицы цепей [27].

Размещение вершин графа на плоскости с минимальной длиной ребер. Минимизация суммарной длины ребер произвольного графа $G = (X, U)$ производится в процессе машинного поиска оптимального варианта и сравнения искомого со стандартным графом $G_\Delta = (X_\Delta, U_\Delta)$. Как произвольный, так и стандартный графы отображаются в сетке с узлами (вершинами), образуемыми ячейками с шагом, равным единице. При построении стандартного графа узлы сетки соединяются единичными ребрами в соответствии с произвольным графом. Если у графа G ребер окажется больше уже размещенных единичных, то в стандартный граф вписывают последовательно более длинные ребра, кратные двум, трем и более ячейкам, доводя их количество до имеющегося в произвольном графе. Суммарная длина ребер стандартного графа является минимальной длиной, равной

$$L(G_\Delta) = \sum_{(x_i, x_j) \in X \times X} d(x_i, x_j) r(x_i, x_j),$$

где $d(x_i, x_j)$ — расстояние между вершинами x_i и x_j ; $r(x_i, x_j)$ — количество ребер, инцидентных этим вершинам.

Отношение суммарной длины $L(G)$ ребер произвольного графа G к суммарной длине $L(G_\Delta)$ ребер стандартного графа G_Δ называется *коэффициентом минимизации длин ребер*; $K_\Delta = L(G)/L(G_\Delta)$.

Из существующих методов минимизации длины проводников при размещении элементов схемы наиболее простым и точным (в нашем случае) является алгоритм последовательного действия. Процесс минимизации производится в следующем порядке.

Произвольный граф $G = (X, U)$, полученный в результате перехода от схемы, с помощью матрицы смежности отражается в решетку. Построение стандартного графа $G_\Delta = (X_\Delta, U_\Delta)$ производится по критерию максимальной связности. Для каждой строки матрицы смежности выписывается в отдельный столбец локальная степень $\rho(x_i)$. Из этого столбца выбирается минимальное значение локальной степени, соответствующее строке x_i . Эта вершина и составит первый узел. Обозначим ее x'_i . Далее в этой строке

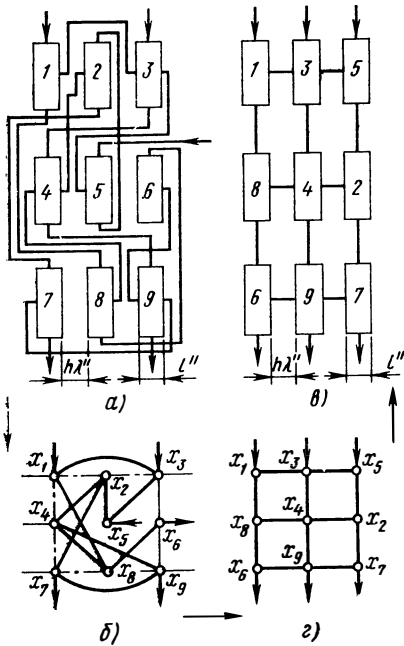
отыскиваем максимальное число связности m , которое по столбцу вверх соответствует вершине x_j . Эта вершина на сетке составит второй узел x'_2 . При переходе к следующей строке матрицы процесс повторяется до тех пор, пока все вершины произвольного графа не будут перенесены на сетку стандартного графа.

Пример 2. Имеется схема соединений блоков касетного типа, в которой предусмотрен порядок размещения их в приборной стойке (рис. 2.5,а). В соответствии с таким размещением составлен граф в сетке с ячейками размером 1×1 см (рис. 2.5,б). Следует отыскать минимальное значение суммарной длины ребер стандартного графа, определить оптимальное размещение блоков и коэффициент минимизации K_{Δ} . В целях снижения влияния выходных цепей на входные их необходимо максимально удалить друг от друга.

Составим матрицу смежности R для графа G и подсчитаем локальную степень для каждой строки:

$$R = \begin{array}{c} \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{array} \end{array} \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccccccc} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right. \end{array} \begin{array}{c} \rho(x_i) \\ 2 \\ 3 \\ 3 \\ 4 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \end{array}$$

Для первого узла сетки выбираем вершину x_1 (вход сигнала) в строке с минимальной локальной степенью $\rho(x_i)=2$. Максимальный элемент связности в этой строке соответствует вершине x_3 с входным сигналом. Эту вершину помещаем во второй узел сетки. Далее по тем же признакам выбираем строку



строку x_5 . Помещаем вершину x_5 в третий узел сетки, а вершину x_2 , относящуюся к элементу связности $m=1$ этой строки, в нижний соседний узел сетки. Переходим к следующей строке матрицы с минимальной локальной степенью. Здесь выбираем строку, относящуюся к вершине x_7 , в которую входит один оставшийся не размещенным элемент связности в столбце x_9 , и размещаем эти вершины последовательно в сетке в соседние узлы. Выбираем следующую строку матрицы с $\rho(x_6)=2$, относящуюся к вершине x_6 , с элементом связности в столбце x_8 . Эти вершины также размещаем последовательно в соседние, оставшиеся еще не заполненными, узлы сетки. Полученный стандартный граф приведен на рис. 2.5,г, а схема его соединения на рис. 2.5,в.

Рис. 2.5. Оптимизация взаимного размещения блоков в стойке а — произвольное размещение; б — его граф; в — оптимальное размещение; г — его изоморфный граф

Составим матрицы длин ребер для произвольного и стандартного графов и сравним длину проводников оптимального варианта и исходного.

Матрица L произвольного графа

$$L = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix} \quad \left. \begin{matrix} \rho(x_i) \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 10 \\ 3 \\ 3 \\ 5 \\ 7 \\ 6 \end{matrix} \right\| \quad \sum_{i=1}^n \rho(x_i) = 52/2 = 26.$$

Матрица L_{Δ} стандартного графа

$$L_{\Delta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix} \quad \left. \begin{matrix} \rho(x_i) \\ 2 \\ 3 \\ 3 \\ 4 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \end{matrix} \right\| \quad \sum_{i=1}^n \rho(x_i) = 24/2 = 12.$$

В результате перехода от графа G с суммарной длиной его ребер $L(X, U) = 26$ к стандартному графу G_{Δ} с суммарной длиной ребер $L_{\Delta}(X_{\Delta}, U_{\Delta}) = 12$ находим коэффициент минимизации перехода $K_{\Delta} = 26/12 = 2,16$, что составляет снижение длины монтажного провода примерно на 54%.

2.4. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ ТРАСС С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Кабельные связи систем. Разработка электромонтажа есть продолжение поиска конструктивной топологии элементов или приборов РЭА. В зависимости от характера электромонтажа (кабельное соединение, подвесной или печатный монтаж) и структурных уровней РЭА возникают и определенные задачи его топологии.

Трассировка проводников или кабеля определяется в первую очередь условием минимальной длины электрической связи $L = \sum_{i=1}^m l_i \rightarrow \min$ (где L — длина всех проводников, l_i — длина i -й цепи)

и) и допустимым уровнем паразитных связей $u_c = \sum_k \sum_{i=1}^m U_{ki} < U_m$ (где U_{ki} — уровень помех, наводимых k -й цепью в i -м звене, U_m — допустимый уровень паразитной связи).

Оптимальный вариант находится из множества вариантов размещения приборов и стоек системы в пределах площади, отведенной для их установки. За счет экономного расхода кабеля можно снизить объем монтажных работ, массу системы и ее стоимость. При использовании экранированного кабеля и приборных корпусов или стоек экранированной конструкции практически исключены вредные взаимовлияния проводной связи, а значит, отпадает требование магнитной совместимости.

Рассмотрим произвольный вариант схемы кабельного соединения приборных стоек системы и ее граф (рис. 2.6,а, б), используя алгоритм минимизации длины кабеля в зависимости от взаимного размещения стоек системы.

Методом последовательного приближения находим оптимальный вариант

$$t^{-1} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ x_3 & x_1 & x_5 & x_2 & x_4 & x_6 \end{pmatrix}.$$

Новый порядок размещения стоек, приведенный на рис. 2.6,в,г, можно считать оптимальным, так как в нем по сравнению с произвольным вариантом общая длина кабельных связей снижается примерно на 40%. Так же решается задача минимизации длины проводников при разработке межблочного монтажа в приборах системы. Сложность разработки электромонтажа приборных стоек существенным образом зависит от степени унификации конструкции блоков.

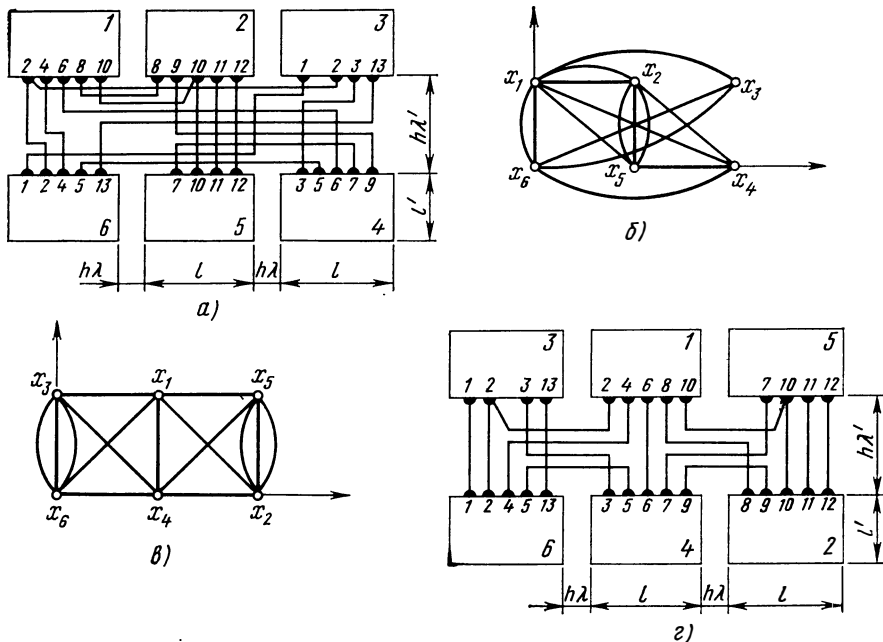


Рис. 2.6. Пример минимизации длины кабеля при размещении стоек
 а — произвольное размещение; б — его граф; в — стандартный граф; г — его преобразование в схему соединения

Трассировка печатных проводников. Высокая плотность элементов микроэлектронной аппаратуры и постоянное стремление к увеличению степени интеграции микросхем все более усложняют оптимизацию конструирования узлов с печатным монтажом.

Вначале при разработке печатного монтажа (§ 5.5 и 5.6) необходимо неплоский граф преобразовать в плоский, а если это невозможно, в граф с минимальным количеством пересечений. Построение минимального бесперекрестного леса с устранением пересечений ребер, принадлежащих к различным минимальным деревьям, является первым и необходимым этапом работ. В сложных случаях построения топологии печатного монтажа возникает

необходимость разделения множества ребер минимального леса на большое количество ребер, ориентированных вертикально и горизонтально с минимальным числом пересечений. Таким образом, на печатной плате в пределах одного слоя все ребра оказываются одинаково ориентированными. Этим не только упрощается трассировка проводников, но и облегчается задача их магнитной совместимости.

Как известно, ребра минимального дерева не пересекаются. Поэтому, перед тем как приступить к трассировке печатных проводников, необходимо решить задачу получения минимальных деревьев устранением возможных пересечений ребер минимального леса. При машинной реализации устранения пересечений применяют топологический и аналитический методы. Последний не связан с запоминанием сетки монтажной платы и поэтому реализуется с меньшим объемом памяти ЭВМ. Метод, наглядно иллюстрирующий способ устранения пересечений ребер минимального леса, приведен на рис. 2.7.

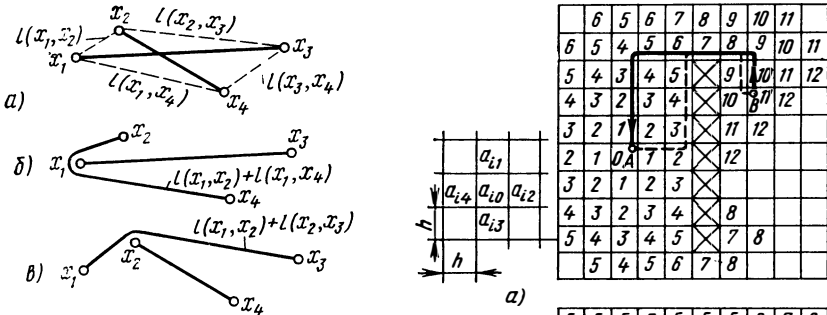


Рис. 2.7. Образование бесперекрестного леса при разводке проводников печатного монтажа с минимальной длиной

a — два пересекающихся минимальных дерева; *б* — бесперекрестный лес; *в* — его оптимальный вариант

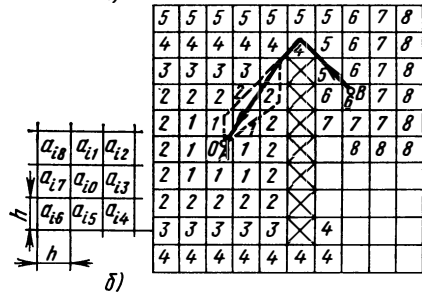
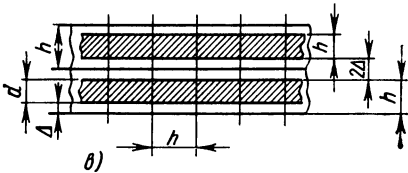


Рис. 2.8. Машинная трассировка печатного монтажа

a — сетка платы с трассой проводника от квадрата *A* до квадрата *B* при нормальной индексации соседних квадратов; *б* — то же при расширенной индексации соседних квадратов; *в* — размещение проводников в квадрате



Наиболее распространена трассировка печатных проводников методом динамического программирования, осуществляемым с помощью алгоритма Ли и его модификации [28].

Машинную трассировку печатных проводников, так же как и ручную, ведут на монтажной плоскости с координатной сеткой. Шаг координатной сетки h определяется минимальной шириной проводников b и зазоров Δ между ними.

Прокладка проводников кратчайшим путем из квадрата A (вершина x_i) в квадрат B (вершина x_j) производится в два этапа. Сначала на координатной сетке образуют поле индексов в следующем порядке: в квадрате A образуют индекс 0, а соседние с ним квадраты помечают индексом 1; на втором шаге опять определяют множество индексов и так далее, пока трасса достигнет квадрата B . Так образуется множество квадратов, помеченных индексами 0, 1, 2, 3... (рис. 2.8). Вторым этапом по квадратам в порядке их убывания от квадрата B до A прокладывается кратчайшая трасса проводников.

Трассы печатных проводников иногда должны обходить уже занятые квадраты. На такие участки принцип соседства квадратов не распространяется и индикация их не производится. И, наконец, если принятый нами ранее признак соседства квадратов распространить на все восемь квадратов, примыкающих к основному, то трассу можно проложить по взаимно перпендикулярным диагональным направлениям (рис. 2.8, б), сокращая длину проводников.

Использование системы ЭВМ, обеспечивающей вывод трассы проводников печатного монтажа на графопостроитель, позволяет получить топологию печатной платы в виде чертежа. В результате решения задач топологии машинным способом общая длина печатных проводников в сравнении с ручной трассировкой снижается до 35%, а скорость решения задачи увеличивается в 20 раз и более.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭСТЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

3.1. ИНЖЕНЕРНАЯ ПСИХОЛОГИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Задачей инженерной психологии в приборостроении является изучение особенностей работы человека-оператора при обслуживании комплекса РЭА, раскрытие средних способностей нормальной деятельности оператора при управлении, выяснение согласованности такой деятельности при одновременной работе нескольких операторов на один объект, установление разумных пределов быстроты реакции оператора в системе управления, определение пределов точности считывания информации и, наконец, выработка требований, способствующих созданию рациональной конструкции и оптимальных условий окружающей среды.

Характер процесса управления зависит не только от сложности управляемого комплекса и степени его автоматизации, но и

от психофизиологических возможностей человека, управляющего этим комплексом. Под термином «комплекс» необходимо в данном случае понимать любой объект, насыщенный управляющей РЭА, например корабль, самолет, технологический участок производства, диспетчерскую службу и т. д.

При быстром росте средств автоматизации количество автоматизированных систем неизбежно увеличивается, вместе с тем расширяется и необходимый объем информации, усложняются способы ее передачи, повышаются скорости обработки и т. д. В связи с этим изменяются и условия работы оператора. Растут требования увеличения объема и скорости приема оператором информации, переработки информации, суммирования и анализа ее результатов.

Физическое состояние оператора, интенсивность его трудовой деятельности, настроение и готовность к качественному выполнению своих функций во многом зависят от окружающей среды. Наибольшее влияние оказывают: шум, вибрация, загрязненность воздуха, его температура, давление и влажность. Например, оператор, работая на передаче данных при температуре окружающего воздуха 24—26° С, делает не более 20 ошибок/ч, а при повышении температуры на 10° число его ошибок удваивается [25]. При чрезмерной нагрузке оператора им мобилизуются все «внутренние резервы» мышления. В этот момент нервная система оператора напряжена до предела, а затем наступает «срыв» осмысленной работы и теряются все нити управления. Такое состояние у оператора называется стрессовым. Оно не только приводит к различным аварийным ситуациям на управляемом объекте, но и представляет серьезную опасность для здоровья самого оператора.

Надо отметить, что недостаточная нагрузка оператора оказывает также отрицательно на его состояние, как и перегрузка. В этом случае у оператора появляется вялость в работе, потеря внимания, замедление реакции и преждевременная усталость, т. е. как раз те симптомы, которые появляются при перегрузке.

Известно, что скорость считывания и переработки показаний приборов зависит не только от индивидуальных способностей оператора, но и от того, каким образом и в каком виде подана информация. Большое значение имеет также характер размещения органов управления на пульте и т. д.

Процесс деятельности оператора по времени обычно распадается на следующие операции:

- а) наблюдение за изменением показаний сигналов, поступающих от датчиков с управляемого объекта;
- б) осмысление значения принятой информации, переработка ее в код приказа и передача на чувствительные органы управляемого объекта (органы управления пульта);
- в) контроль за отработкой указанных действий управляемым объектом и количественными изменениями, происшедшими в результате этой отработки на информационных приборах пульта;

г) введение в пульт указаний об изменении режимов работы объекта и передача на командный пункт необходимых сведений.

Затраты времени на исполнение этих операций должны учитываться графиком загрузки оператора и отвечать психофизиологической возможности его нормальной трудовой деятельности.

3.2. ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И АНАТОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОНСТРУКЦИЮ ПРИБОРОВ

Физиология трудового процесса. Трудовой процесс оператора, как и любой другой трудовой процесс, состоит в основном из деятельности исполнительных органов (мускулы тела), органов чувств (зрение, слух, осязание) и управляющих органов (мозг, нервы). Деятельность этих органов ограничивается различными условиями и зависит:

а) от антропометрических размеров тела, мускульной силы, координации и скорости движений;

б) от разрешающей способности и порогов чувствительности зрения, слуха и осязания;

в) от воздействия фактора внешних раздражителей, числа информации в единицу времени, сложности информации и т. д.

Изучение особенностей рабочих органов оператора и влияния окружающей среды на его трудовую деятельность позволяет конструктору правильно выбрать целесообразные форму и размеры пульта управления, расположение на нем отсчетных и сигнальных устройств, метод освещения, обеспечить наиболее удобное рабочее положение для оператора.

При определении конфигурации и размеров элементов пульта управления необходимо учитывать средние размеры и координаты рабочих частей тела оператора на различных стадиях трудового процесса.

Размеры тела взрослого мужчины среднего роста приведены на рис. 3.1. Антропометрические данные этой фигуры могут быть использованы для определения формы и размеров рабочей зоны, линии зрения оператора, движения его рук относительно плечевого сустава, положение и высоту сидения. Средние антропологические размеры женщин на 6—7% меньше, чем мужчин (что необходимо учесть при разработке высоты кресла или специальной подставки под ноги в положении стоя). Используя приведенные антропологические размеры, в каждом случае необходимо учитывать увеличение размеров тела специальной одеждой, обувью, перчатками и другими видами одежды, которая по условиям работы требуется оператору.

Координация движений, скорость и мускульная сила. Координация движений у людей в основном протекает одинаково как во времени, так и в пространстве. Все движения взаимосвязаны и осуществляются по определенным, еще мало изученным законам. Однако неоднократно проверено на практике, что *работа оператора протекает с меньшей утомляемостью*, если конструкцией

предусмотрены элементы движений оператора: (а) удобные и экономичные; (б) кратковременные, простые и ритмичные; (в) пространственно ограниченные в соответствии с анатомической структурой тела; (г) совершающиеся в поле зрения в пределах нормального отклонения головы; (д) плавно связанные между собой;

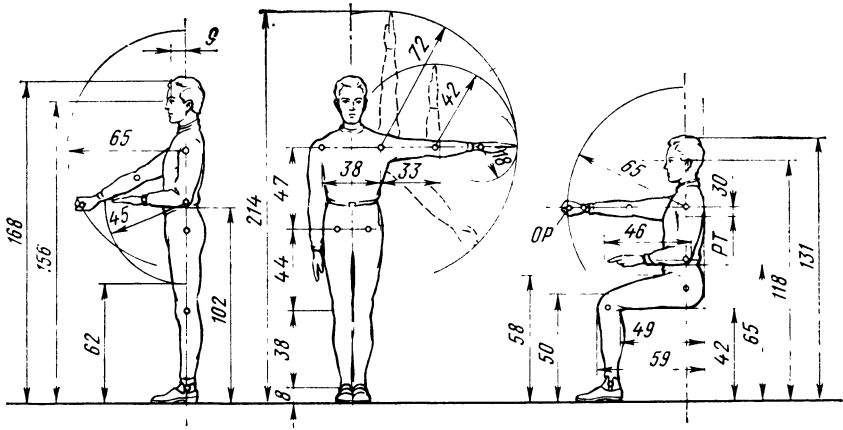


Рис. 3.1. Средние размеры тела взрослого мужчины, см
OP — охват рукоятки; *PT* — расслабление тела

(е) совершающиеся в направлении положительного действия силы; (ж) не нарушающие центра тяжести тела в рабочем положении; (з) не ограниченные одеждой и посторонними предметами; (и) заканчивающиеся положением, удобным для выполнения следующей операции; (к) не однообразные и не связанные с одним и тем же положением.

Количественная и качественная оценка движения должна учитываться при конструировании приборов управления и отсчетных устройств, а также при составлении графиков загрузки оператора. При этом исходными могут быть следующие правила и нормы:

- а) точность движений в положении сидя у операторов большая, чем в положении стоя;
- б) резко изменяющиеся направления движения требуют большей затраты времени и энергии, чем плавные, округленные;
- в) движение тела, направленное слева направо, производится медленнее, чем справа налево;
- г) движение тела, направленное вправо и влево, производится медленнее, чем вперед и назад;
- д) движение руки при сгибании и разгибании локтя может производиться до 80 раз/мин;
- е) вертикальное направление движения руки производится медленнее, чем горизонтальное;
- ж) вращательное движение правой рукой в горизонтальной плоскости лучше выполняется против часовой стрелки, а левой рукой — по часовой стрелке;
- з) движение руки, связанное с ограничением крайних положений рукоятки, производится быстрее, чем установка ее по визуальной отметке;

и) реакция на движение вытягивания на себя производится быстрее, чем на движение отталкивания от себя;

к) время, затраченное на выполнение движения, зависит от длины пути. а время, необходимое для начала движения или прекращения его, остается постоянным.

Мышечная сила зависит от возраста человека, пола, физического развития и чередования приложения силы с отдыхом. При разработке конструкции масса передвигаемых или переносимых частей устанавливается с учетом физических возможностей оператора при обслуживании аппаратуры. Прилагаемое усилие зависит от положения корпуса тела и направления движения. Мышечная сила женщин меньше, чем у мужчин, примерно на 30%. Ниже все предельные значения силы будут указываться только для мужчин среднего возраста.

Непрестанное усилие утомляет человека значительно быстрее, чем периодическая сила с чередованием напряжения мускул и с расслаблением их.

3.3. ФУНКЦИИ ОРГАНОВ ЧУВСТВ И РАБОЧИЕ ЗОНЫ ОПЕРАТОРА

Зрение. При конструировании пультов управления необходимо учитывать остроту зрения, размеры поля зрения, скорость восприятия, аккомодацию и адаптацию глаза и законы цветового воздействия на зрительный аппарат.

Острота зрения определяется наименьшим предметом, который способен видеть глаз с определенного расстояния. При дневном освещении относительная острота максимальна, а ночью она мала и в пределах этого угла почти постоянна. Острота зрения y_0 оценивается отношением наименьшего размера рассматриваемой детали D к расстоянию от нее до глаза L_y . За единицу остроты зрения принимается угол зрения, равный одной угловой минуте, т. е. $y_0 = D/L_y = 1'$.

Цветовое ощущение глаз также зависит от центрального зрения. Физиологическая способность глаз ощущать большое количество цветовых оттенков обеспечивает возможность различать цветные сигналы, цветную окраску помещений, приборов, природные цвета и способствует возникновению определенных эмоциональных (психологических) ощущений.

Поле зрения есть совокупность всех точек пространства, которые различает неподвижный глаз. Границы обзора изменяются при повороте головы, однако при этом поле зрения существенно не изменяется.

Адаптация есть способность глаз с течением времени приспосабливаться к различной яркости предмета.

Аккомодация — приспособляемость глаз к рассматриванию предметов на различных расстояниях. Условия аккомодации улучшаются с удалением рассматриваемого предмета. Оптимальным расстоянием, при котором глаз фиксирует на сетчатке практически параллельные лучи, идущие как бы из бесконечности, считается 5 м.

Слух. Особенностью слуха является способность весьма точно определять направление источника звука, а также оценивать частоту колебаний и силу его. Слуховой аппарат человека способен воспринимать звук в диапазоне частот 16—20 000 Гц. Направление и источник звука определяются точнее обоими ушами, чем одним, независимо от удаления источника.

Слышимость звука зависит от звукового давления, измеряемого в паскалях. Порог слышимости при частоте 800—2000 Гц составляет около 20 Па. Наилучшая слышимость обеспечивается при частоте звука 2000—4000 Гц. При увеличении или снижении частоты слышимость постепенно падает.

Уровень силы звука измеряется в децибелах (дБ)

$$L_{зв} = 20 \lg (p_{зв}/p_0),$$

где $p_{зв}$ — измеряемое звуковое давление; p_0 — звуковое давление на пороге слышимости в области средних частот.

Нарастание силы звука на 10 дБ от любого исходного уровня при слуховой оценке воспринимается как двукратное изменение громкости (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Значение силы звука и субъективная оценка его действия

Интенсивность звука, Вт/м ²	Звуковое давление, 10 ⁵ Па	Субъективная оценка действия шума на человека
10 ⁻⁴	2	Едва слышен
10 ⁻³	6,3	Отвлекает при разговоре
10 ⁻²	20	Мешает работе
10 ⁻¹	63	Разговор невозможен
1	200	Подавляет и раздражает
10	630	Оказывает болевые ощущения

Осязание. Осязание расширяет у человека способность собирать из внешней среды дополнительно элементы информации, определять их происхождение, отличать по форме и выяснять положение относительно других предметов в условиях недостаточной освещенности или когда явление происходит за пределами поля зрения глаз.

Наибольшей чувствительностью к тепловым, болевым и тактильным (сопровождающимся прикосновением) изменениям обладает поверхность кожи ладони рук и окончания пальцев. Чувствительная способность кожного покрова расширяет возможности работы оператора в различных условиях.

Зоны нормальной зрительной чувствительности. Размеры зрительной чувствительности глаза, рассматривающего приборную панель, определяются полем видимости, которое ограничивается оптимальным углом зрения и дистанцией наблюдения. На рис. 3.2 приведено оптимальное поле зрения оператора при дистанции на-

блюдения, равной 80 см. Поле зрения, образованное панелью с центральными осями, проходящими через точку *С*, можно разбить на три зоны, различающиеся между собой по зрительной чувствительности:

I — зона мгновенного зрения, ограниченная углом 18° ;

II — центральная зона (или периферического зрения), ограниченная углом 60° , в пределах которой оператор видит шкалы и указатели, не поворачивая головы;

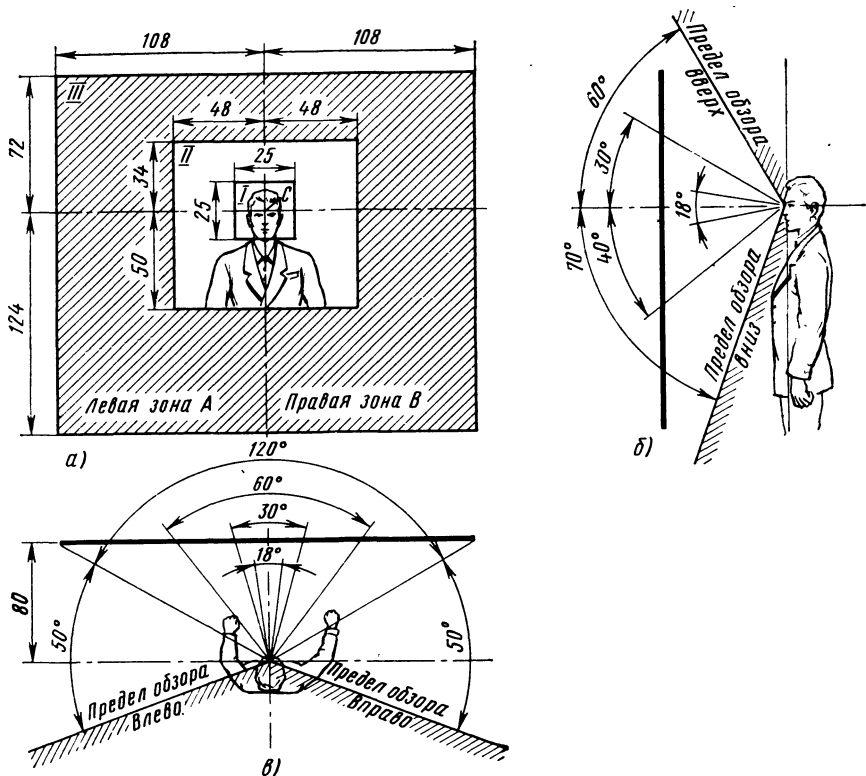


Рис. 3.2. Углы зрения и оптимальные размеры зоны видимости на расстоянии 80 см от глаз наблюдателя, см

a — поле зрения; *б, в* — углы видимости сбоку и в плане

III — оптимальная зона зрения (зона, расположенная вне области периферического зрения), ограниченная углами обзора в горизонтальной и вертикальной плоскостях в пределах 120° ; чтобы в этой зоне отыскать необходимый индикатор, требуется затратить дополнительное время на поисковое движение глаз.

Время, необходимое для безошибочного чтения показания индикаторов, расположенных в левой и правой частях панели, определяется расстоянием от центральной точки *С*.

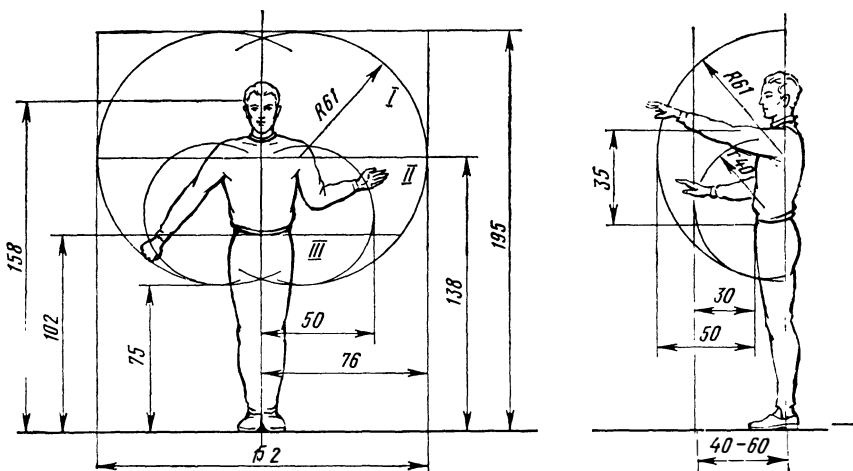


Рис. 3.3. Рабочая зона оператора, находящегося в положении стоя
 I — рабочее пространство; II — зона расположения органов управления; III — оптимальное пространство (размеры в сантиметрах)

При удалении индикаторов от центральной части панели влево или вправо время, необходимое для безошибочного чтения показания, увеличивается. Это объясняется свойством наших глаз хорошо различать форму предметов, находящихся лишь в сравнительно небольшой центральной зрительной зоне. В этой зоне и следует размещать наиболее важные указатели.

Зоны ручного управления. Рабочее положение стоя обеспечивает оператору большую свободу движений. В этом положении зона ручного управления образуется непосредственно контактом рук оператора с площадью панелей управления, расположенных перед ним. Зона ручного управления в зависимости от удобства использования разбивается на три области, форма и размеры которых приведены на рис. 3.3.

Положение сидя закрепляет за оператором определенные координаты рабоче-

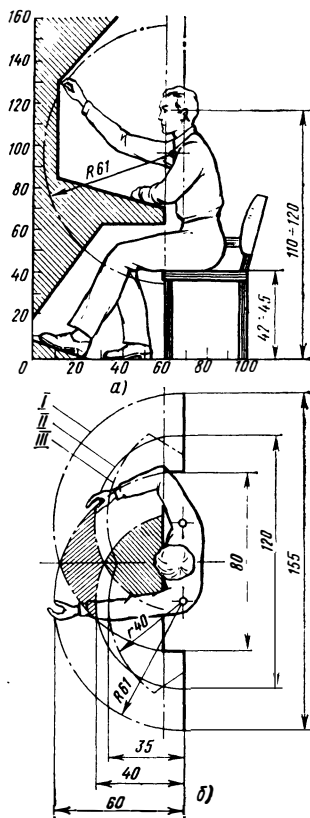


Рис. 3.4. Рабочая зона оператора в положении сидя (размеры в сантиметрах)

а — основная рабочая поза; б — горизонтальная плоскость; I — оптимальная зона; II — нормальная; III — максимальная

го места, образуя постоянную связь между рабочими плоскостями пульта и местом установки кресла. Основными рабочими положениями оператора, сидящего за пультом, считаются три положения: первое — при опоре оператора на спинку кресла (отклонение назад), второе — прямая посадка в кресле без опоры на ее спинку, третье — посадка в кресле с опорой локтями на горизонтальную панель пульта с наклоном вперед (рис. 3.4).

3.4. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭСТЕТИКА В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Качество оформления внешнего вида прибора. Качество внешнего оформления приборов зависит от того, насколько удачно средства обеспечения технических требований сочетаются со средствами обеспечения требований технической эстетики. Трудно дать готовые рецепты создания приборов, отвечающих всем требованиям эстетики. Нельзя стандартизировать приемы художественного оформления, пропорции или цвет окраски, как невозможно рекомендовать в качестве стандарта и определенный ансамбль или интерьер.

Создание законченной красоты технического решения разрабатываемого изделия не под силу одному конструктору, так как круг вопросов, относящихся к его технической компетенции, и без того значителен. Поэтому работу над композицией внешнего вида прибора необходимо проводить совместно с конструктором-художником.

Форма прибора должна быть прежде всего технически рациональной и экономически оправданной. Эти требования не только не противоречат технической эстетике, а, наоборот, свойственны ей. Внешний вид приборов разрабатывается с учетом требований заказчика и результатов исследований в области как инженерной психологии, так и технической эстетики.

Приборы будут отвечать своему назначению лишь тогда, когда их форма будет проста и выразительна, а отдельные части подчеркивать основное назначение (рис. 3.5). С прибором, выполненным по законам технической эстетики, легче работать. Он вызывает к себе бережное отношение со стороны обслуживающего персонала, и поэтому надежность такого прибора увеличивается.

Форма приборов часто определяется выбранным принципом компоновки. Так, например, большое разнообразие различных по размерам малых приборов, входящих в комплекс аппаратуры, при установке на объекте образует кажущуюся сложность и загроможденность помещения, а большое количество отступающих и выступающих плоскостей создает впечатление хаоса. Объединение отдельных мелких приборов в более крупные единицы исключает кажущуюся сложность и обеспечивает единый стиль оформления.

Во внешней отделке должны отсутствовать ничем не оправданные выступы и впадины, лишние изломы линий, случайные размеры, т. е. все то, что нарушает цельность формы. Петли, замки, транспортировочные детали, головки болтов и т. д. должны быть

скрыты внутри прибора или по своему конструктивному исполнению только подчеркивать эстетическое единство частного и общего.

Основные характеристики формы изделия. К ним относятся: геометрический вид, положение в пространстве, распределение объема изделия по координатным осям, фактура, светотень и цвет.

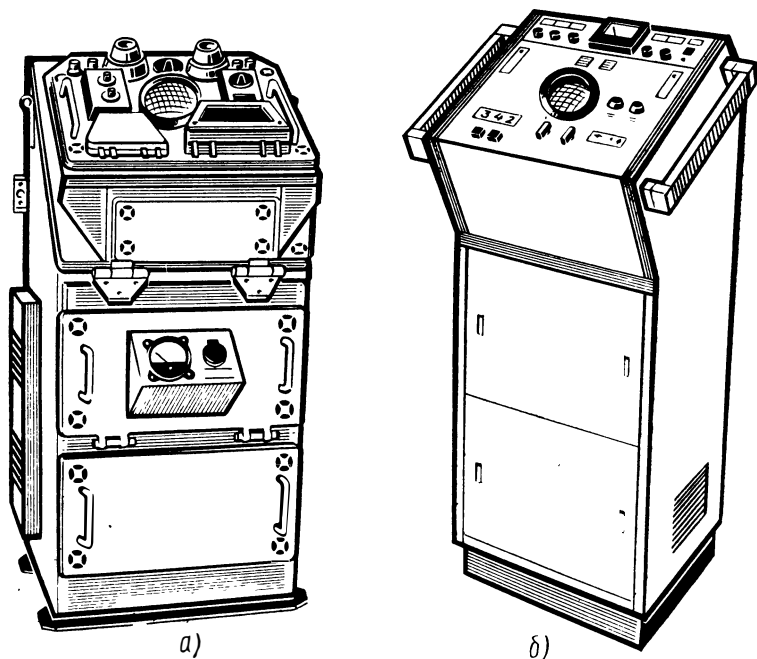


Рис. 3.5. Пример эстетически не отработанной формы прибора (а) и формы, проработанной художником-конструктором (б)

Различают три геометрических вида форм: объемный, плоский, линейный. Объемная форма имеет примерное равенство габаритных размеров по координатным осям (куб, параллелепипед, цилиндр, сфера). Плоская форма имеет размеры по двум осям, значительно превышающие размеры по третьей оси (пластина). У линейных форм один из размеров преобладает над другими (длинный цилиндр, печатный проводник).

Соотношение габаритных размеров изделия и размеров человека определяет положение изделия в пространстве.

Распределение объемов изделия по координатным осям определяет его зрительное восприятие. Так, неудачное распределение объемов создает ощущение неустойчивости, тяжеловесности конструкции (рис. 3.6).

Фактура поверхности изделия (гладкая, шероховатая и т. д.) может быть образована как обработкой поверхности (механиче-

ской, химической и т. д.), так и структурой материала (пластик, кожа, дерево и т. д.).

Для зрительного восприятия наиболее благоприятна форма, у которой выдержаны определенные соотношения размеров. Слишком вытянутая или сжатая, плоская, низкая, узкая или высокая форма называется непропорциональной. Приборы такой формы неприятны для глаза, а установленные в помещении с правильными архитектурными размерами выглядят архаичными.

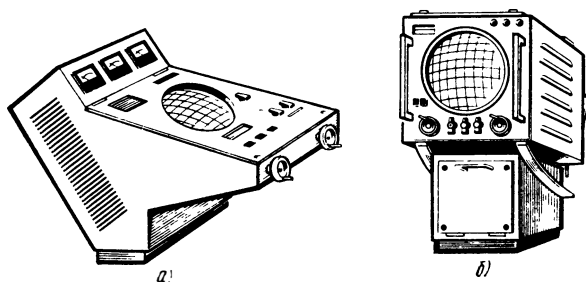


Рис. 3.6. Примеры зрительного несоответствия массы формы
а — создается впечатление неуравновешенной формы; б — создается впечатление неустойчивости формы

Отношение сторон формы или пропорции выражаются простыми и иррациональными числами. При равенстве размеров их отношение называют тождественным, в случае незначительных различий — нюансным, при значительной разнице размеров — контрастным. Эти три вида отношений в образовании формы служат основным средством для построения пространственного единства или, как его часто называют, соизмеримости.

С точки зрения эстетического восприятия формы благоприятными считают соотношения так называемого «золотого сечения», когда большая часть отрезка является средней пропорциональной между всем отрезком и его меньшей частью, т. е. $A/B = B/(A-B)$. Отсюда

$$B = 0,5 A (\sqrt{5} - 1) = 0,618 A.$$

При пропорционировании по «золотому сечению» можно пользоваться также шкалой, построенной на базе прямоугольного треугольника с отношением его сторон 1 : 2. Разработку формы часто ведут, используя ряд размеров, мм, построенных по модульному принципу, в котором кроме других требований могут быть учтены также и правила «золотого сечения» (рис. 3.7).

Изделию можно придать кажущуюся статичность или, наоборот, динамичность членением формы на части, убывающие по размерам в сторону «движения».

Сложная форма, состоящая из нескольких частей, делится на главную и второстепенные части. Главная часть является основой формы. Она выделяется своими размерами, положением в про-

странстве, массой или задается главной эксплуатационной плоскостью. Взаимной компоновкой главных и второстепенных частей решается композиция всей формы. Например, фронтальная часть в приборе или в приборной стойке является главной. Композиция фронтальной части производится членением ее лицевыми панелями блоков или дверцами на 2, 4 группы и более. Членение фронтальной плоскости может быть осуществлено также и соединением секций или стоек между собой.

Симметрия является одним из важных средств композиции формы. Целесообразность симметричной формы в природе служит большим стимулом к поиску таких решений и в технике. Прибор приобретает организованную форму с мнемоникой запоминания органов управления и информации.

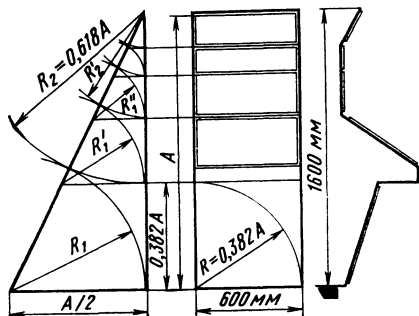


Рис. 3.7. Пропорционирование пульта по шкале «золотого сечения»

3.5. РОЛЬ ЦВЕТА В ОБРАЗОВАНИИ ПРИБОРОВ

Известно, что белый цвет состоит из ряда излучений разной длины волны. Каждый спектр излучения соответствует определенному цвету. Качественная градация цветового тона («вилка» цвета) объективно определяется следующей длиной волны, мкм:

Красный	780—620	Зеленый	550—510
Оранжевый	620—585	Голубой	510—480
Желтый	585—575	Синий	480—450
Желто-зеленый	575—550	Фиолетовый	450—380

Цвет характеризуется цветовым тоном, насыщенностью и яркостью. Каждый цветовой тон по-разному оказывает влияние на степень утомляемости зрения. Признаки цветового утомления сопровождаются потерей остроты цветоразличения, снижением чувствительности к яркости и определению границ цветового тона. Наиболее утомляющим действием обладают красный и сине-фиолетовый цвета. И, наоборот, наше зрение почти не утомляют цвета средневолновой части спектра: желтый, желто-зеленый, зеленый и голубовато-зеленый слабой насыщенности и относительно большой яркости.

Максимальная заметность и наиболее быстрое считывание обеспечиваются, когда черный предмет или обозначение находятся на желтом фоне. Это сочетание цвета создает наибольшую контрастность. Однако необходимо учитывать, что большая контрастность действует на глаза раздражающе и быстро вызывает признаки цветового утомления. Фоном, вызывающим наименьшую утомляемость, считается светло-серый цвет.

Яркость и контрастность цвета в известной мере зависят от отражения цветной поверхности (табл. 3.2). Цвет является важным средством решения ряда технических задач. Так, цвет можно использовать в виде общеизвестных кодовых сигналов (красный, желтый, зеленый), в интересах техники безопасности и т. д.

Т а б л и ц а 3.2. Средние коэффициенты отражения от цветной поверхности

Цвет	Коэффициент отражения	Цвет	Коэффициент отражения
Белый	0,83	Розовый	0,53
Кремовый	0,78	Светло-зеленый	0,51
Желтый	0,75	Оранжевый	0,50
Золотисто-желтый	0,72	Синий	0,35
Светло-оранжевый	0,62	Зеленый	0,20
Салатовый	0,56	Красный	0,15
Светло-серый	0,55	Фиолетовый	0,10
Светло-голубой	0,55	Черный	0,02

Цветом и интенсивностью его тона можно вызвать различные физиологические ощущения: теплоты или прохлады, напряженности или спокойствия, заметности или скрытости. Окраска в определенный цвет вызывает различные психологические реакции, создающие впечатление тяжести или легкости, отступающей или выступающей плоскости, цельности или разрозненности поверхности.

Например, синие, голубые и зеленые тона успокаивают и вызывают чувство прохлады. Красные, оранжевые и желтые тона действуют как возбуждающие и вызывают чувство теплоты. Голубые и зеленые тона создают ощущение большого пространства. Красные и коричневые тона, наоборот, уменьшают объем помещения и создают известный уют. Серый цвет считается нейтральным, вызывает наименьшую утомляемость зрения и в зависимости от его оттенков вызывает те же физиологические ощущения.

Красный и черный тона считаются «тяжелыми», а голубой и белый тона — «легкими». Предмет, окрашенный в красный цвет, приближается; видимое расстояние до него кажется меньше действительного, и наоборот, предмет, окрашенный в голубой цвет, как бы отдаляется.

Плоскости прибора, окрашенного в светлые тона, кажутся больше таких же плоскостей, окрашенных в темные тона. Контраст между «тяжелыми» (темными) тонами окраски верхней части прибора и «легкими» (светлыми) тонами окраски нижней его части создает у оператора угнетающую неуверенность в устойчивости прибора и, наоборот, окраска верхней части в «легкие» тона, а фундамента в «тяжелые» тона создает впечатление устойчивости аппаратуры. «Тяжесть» цвета зависит от его насыщенности (интенсивности): чем меньше насыщенность или чем светлее оттенок цвета, тем «легче» он кажется.

Человек быстро утомляется, когда находится в окружении одного цвета. Глаза, уставшие от одного цвета, невольно ищут другой, дополняющий его цвет. При использовании гаммы цветов это явление исчезает. Такие цвета называются дополнительными и в создании гармоничности красок являются главными.

Выбор цвета окраски или его тона диктуется и практической целесообразностью. Медицинскую аппаратуру, например, окрашивают чаще всего в светлые тона. Корабельную аппаратуру — в серый цвет при установке на палубах, в светло-серый или кремовый («слоновая кость») при установке во внутренних помещениях. Лицевые панели пультов и щитов информации выделяются из общего фона окраской в нейтральные цвета светлых тонов и малой насыщенности. Панели информации и управления авиационной РЭА часто окрашивают в черный цвет при окраске кабины в светло-серые тона.

Наземную аппаратуру окрашивают в зависимости от применения, например полевую аппаратуру — в зеленый (защитный) цвет, промышленную аппаратуру — преимущественно в светлые тона.

В РЭА цвет широко используют как информацию в сигнальных устройствах.

В качестве цветowych условных знаков широко применяются следующие цвета:

красный — запрещающий или предупреждающий об аварии, опасных режимах, необходимости принятия срочных мер; указывающий на органы аварийного управления; обозначающий на шкальных устройствах границы, за пределы которых не следует выходить, и т. д.;

зеленый — разрешающий; указывающий на нормальное состояние режима работы и т. д.;

белый — обозначающий сигнал «внимание — прибор включен»; указывающий на наличие напряжения питания; отмечающий выданное или принятое указание;

синий — отмечающий законченный цикл работы; указывающий на отрицательную полярность;

желтый — предупреждающий; указывающий предельное состояние параметров и т. д.

Имеются и заменители указанных цветов. Они применяются там, где появляется необходимость в дополнительной градации цвета, например заменителем красного цвета используют розовый или оранжевый, синего — голубой, желтого — слабо-оранжевый, белого — серый слабого насыщения.

3.6. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ И СВЕТОСИГНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Осветительные устройства. При рациональном освещении длительное время сохраняются нормальная функция зрения и работоспособность оператора в напряженных условиях работы.

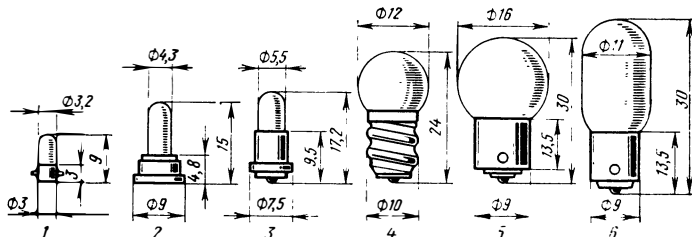
Осветительные устройства, используемые в РЭА, представляют собой систему, состоящую из источников света и элементов, предназначенных для перераспределения светового потока лампы накаливания, защиты их от механического повреждения, защиты от слепящего действия тела накала лампы, комплекта элементов несущей конструкции и присоединительного электро монтажа.

Перераспределение светового потока источника света осуществляется отражателями, имеющими зеркальную или полированную отражательную поверхность, и линзами из силикатного стекла или прозрачных и полупрозрачных пластических материалов.

Выбор приборных ламп накаливания производят по их световым и электрическим характеристикам. Лампы накаливания отличаются величиной светового потока, яркостью свечения нитей накала и расположением их относительно цоколя лампы. Электрические характеристики ламп накаливания отличаются напряжением питания и силой тока.

Геометрическая линия, проходящая через центр тела накала и продольную ось цоколя лампы, принимается за главную базу при установке ее в осветительное устройство. Основные светотехнические и электрические характеристики приборных ламп накаливания, широко используемых в осветительных и светосигнальных устройствах, приведены в табл. 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3. Основные параметры приборных ламп накаливания



Тип лампы	Напряжение, В	Сила тока, А	Световой поток, лм	Срок службы, ч	ГОСТ или ТУ	№ рисунка
МН-1	1	0,068	—	200	ГОСТ 2204-74	4
МН-4	2,5	0,29	4,00	250	ГОСТ 2204-74	5
МН-7	2,5	0,54	6,25	500	ГОСТ 2204-74	5
МН-14	6,3	0,25	8,00	300	ЕСФ0.337.001	4
МН-18	26	0,12	9,00	100	ЕСФ3.337.001	4
МН-24	36	0,15	18,00	100	СУ0.337.072	6
НСМ10×55	10	0,065	1,00	1000	16.021.09-66	1
СМ-36	3	0,29	2,00	100	ТУ № 1-3-108	2
СМ-34	6	0,25	7,00	100	ТУ № 1-3-108	6
СМ-37	28	0,05	5,00	100	ТУ № 1-3-108	3

Необходимая освещенность поверхности, создаваемая осветительным устройством, определяется величиной светового потока F лампы накаливания. Выбор соответствующей лампы накаливания производится на основании светотехнического расчета, который достаточно выполнить в приближенной форме, используя основные светотехнические зависимости [17].

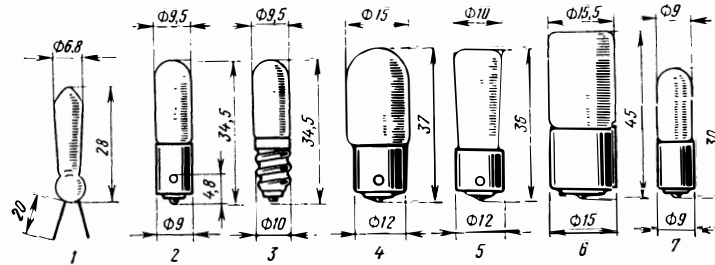
Освещенность какой-либо точки плоскости определяется выражением

$$E = (I_{\alpha} \cos \beta) / l^2, \quad (3.1)$$

где I_{α} — направленная сила света от источника, кд; β — угол, составленный направлением вектора силы света лампы и перпендикуляром, восстановленным от освещаемой поверхности; l — расстояние от источника света до освещаемой плоскости, м.

Яркость источника света для всех его точек в практических расчетах считают одинаковой. Тогда соотношения между световым потоком, силой света и яркостью B освещаемого тела простейшей формы (плоскость прямоугольника, шар, цилиндр) будут иметь вид:

Таблица 3.4. Основные параметры сигнальных газосветных ламп



Тип лампы	Род тока	Сила тока, А	Напряжение зажигания, В		Срок службы, ч	Балластное сопротивление, кОм	ГОСТ или ТУ	№ рисунка
			начальное	предельное				
ТН-0,2	=	0,25	85	90	200	—	ОДО.337.020ТУ	2
ТН-0,3		0,3	150	155	200	200	ОДО.337.050ТУ	3
ТН-0,5		0,5	90	108	300	—	ОДО.337.051ТУ	6
МН-3	≡	1,0	65	110	300	100	СУ0.337.015	4
МН-6	=	0,8	60	90	100	60	ТУ 1-3-19	1
96СГ-9		3,0	—	95	500	—	СЛЗ.390.073	5
ТЛО-1-1 ТЛЗ-1-1 ТЛЖ-1-1	≡	1,3	80	145	2000	100	МРТУ 16.535.005-65	7

Обозначения: Т — тлеющая, Н — неоновая, Л — люминесцентная, О — оранжевый цвет, З — зеленый цвет, Ж — желтый цвет.

— для силы света от источника площадью S , м^2 ,

$$I_{\alpha} = BS \cos \alpha = I_0 \cos \alpha ; \quad (3.2)$$

при этом справедливы выражения для светового потока

$$F_S = \pi I_0 ; \quad (3.3)$$

— для силы света источника в виде шара диаметром D_0 , м ,

$$I_0 = \pi B D_0^2 / 4 = \text{const} ; \quad (3.4)$$

и световой поток для этого случая будет

$$F_0 = 4 \pi I_0 = \pi^2 B D_0^2 ; \quad (3.5)$$

— для силы света в виде цилиндра диаметром $D_{\text{ц}}$ и высотой h , м , с несветящимися торцами

$$I_{\alpha} = I_{90} \sin \alpha = B D_{\text{ц}} h \sin \alpha ; \quad (3.6)$$

и световой поток, излучаемый цилиндром, определяется выражением

$$F_{\text{ц}} = \pi^2 I_{90} = \pi^2 B D_{\text{ц}} h . \quad (3.7)$$

Пример 1. Лампа накала типа СМ-34 имеет световой поток 7 лм (табл. 3.3) и нить накала в виде цилиндра диаметром 2, высотой 4 мм. Необходимо определить яркость тела накала.

Для заданного случая яркость определяется из выражения (3.7)

$$B = \frac{F}{\pi^2 D_{\text{ц}} h} = \frac{7}{3,14^2 \cdot 0,002 \cdot 0,0004} \approx 875000 \text{ нт}.$$

Пример 2. Определим силу света лампы типа СМ-12. Нить накала лампы принимаем за шар. Световой поток лампы равен 105 лм.

Из выражения (3.5) определяем значение силы света:

$$I = F / 4 \pi = 105 / (4 \cdot 3,14) = 8,36 \text{ кд}.$$

Светотехнические материалы, используемые для преобразования светового потока, различаются по прозрачности и структуре поверхности. Просвечиваемость их имеет широкие пределы: от прозрачных до малопрозрачных и непрозрачных. Степень прозрачности характеризуется коэффициентом пропускания света τ_i , поглощения α_i и отражения ρ_i . Структура поверхности может изменяться от зеркально или глянцевой до матовой или диффузной.

Поглощенная часть светового потока равна $F_{\alpha} = \alpha_i F$, отраженная $F_{\rho} = \rho_i F$ и пропущенная $F_{\tau} = \tau_i F$, где F — световой поток, падающий на поверхность, по закону сохранения энергии составляет $F = F_{\alpha} + F_{\rho} + F_{\tau}$. Отсюда следует, что $\alpha_i + \rho_i + \tau_i = 1$. Значения α_i , ρ_i и τ_i для различных материалов приводятся в табл. 3.5.

Освещение рабочей зоны. Освещение поверхностей шкальных устройств, индикаторов и панелей управления должно быть равномерным и мягким, без резких теней и ярких бликов. Неравномерность освещенности, оцениваемая отношением максимальной освещенности к минимальной, в пределах одного освещаемого поля должна быть не выше 5. Такое освещение достигается размещением осветительных ламп и использованием рассеивающих светотехнических материалов. Глянцевые поверхности защитных стекол стрелочных приборов и индикаторов, размещаемых на панелях управления, не должны вынуждать оператора менять угол зрения естественного наблюдения с целью отыскания положения, при котором отсутствуют яркие отражения предметов и плоскостей, расположенных позади оператора.

Уровень освещенности рабочей плоскости зависит от характера выполняемой работы и устанавливается:

для местного освещения, при различении особо мелких деталей 300—1000 лк;

для общего освещения при работе с экраном электронно-лучевого индикатора, защищенного от попадания прямого света, — от 55 до 220 лк;

Таблица 3.5. Средние значения коэффициентов отражения, поглощения и пропускания для некоторых материалов

Материал	Коэффициенты		
	отражения	поглощения	пропускания
Стекло толщиной 2—3 мм:			
оконное	0,08	0,02	0,90
матированное	0,10	0,05	0,85
опаловое	0,30	0,10	0,60
молочное	0,45	0,15	0,40
Посеребрянное зеркало	0,98	0,02	—
Белая бумага	0,75	0,25	—
Хром полированный	0,65	0,35	—
Фарфоровая эмаль	0,60	0,40	—
Сукно черное	0,02	0,98	—
Бархат черный	0,005	0,995	—

при работе за пультом с подсвеченными шкалами, надписями, рукоятками и экранами с электронно-лучевыми индикаторами общее освещение 15—30 лк.

Так как наблюдение изображения с прямым контрастом (со светлого на темный фон) сопровождается световой адаптацией, а наблюдение с обратным контрастом (с темного на светлый фон) — темновой адаптацией, при переносе взгляда с одного светового поля на другое, отличающееся своей яркостью, учитывают условия световой и темновой адаптации.

В целях улучшения различаемости изображения сигнала на экранах электронно-лучевых индикаторов устанавливают светофильтры оранжевого или желтого цвета. Для предохранения экрана от засвечивания используют тубусы или козырьки над лицевыми панелями.

Подсветка наблюдаемых полей осуществляется отраженным или прямым светом. Осветительные лампочки размещаются над шкалами или под лицевыми панелями, ближе к отсчетным делениям. Пример освещения шкального устройства прямым светом показан на рис. 3.8, а, б. В шкальных устройствах с про-

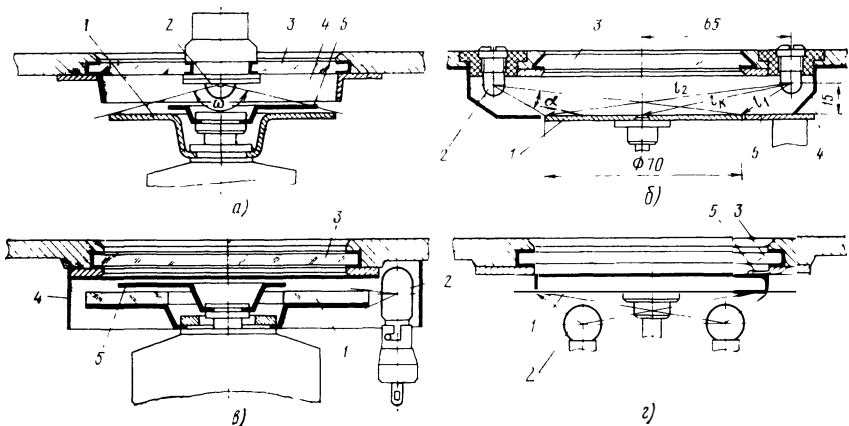


Рис. 3.8. Подсветка шкал лампами центрального освещения (а), бокового освещения (б), в торце прозрачной шкалы (в) и снизу полупрозрачной шкалы (г)
1 — шкала; 2 — лампа подсветки; 3 — защитное стекло; 4 — светозащитный козырек; 5 — указатель отсчета

зрачными или полупрозрачными шкалами лампочками освещают торец прозрачного диска или они устанавливаются под полупрозрачной шкалой, как это показано на рис. 3.8,г. При этом риски и цифры выполняются гравировкой с последующей заливкой их черной или цветной краской. Мощность, количество и тип осветительных лампочек определяются размером шкал, необходимой освещенностью и способом подсветки.

Пример 3. Необходимо определить среднюю освещенность и неравномерность освещенности отсчетной шкалы диаметром 70 мм, освещаемой двумя лампочками типа СМ-34. Лампочки установлены диаметрально противоположно (рис. 3.8,б) от центра шкалы на расстоянии 65 мм и возвышаются над ней на 15 мм. Нить накала приблизительно имеет форму цилиндра ($I_{\alpha} = I_0 = \text{const}$).

Сила света лампы определяется из выражения (3.7)

$$I_0 = F/\pi^2 = 7/3,14^2 = 0,7 \text{ кд.}$$

Освещенность в каждой точке шкалы составляет сумму освещенности от ламп *A* и *B*. Определим освещенности, минимальную — в центре шкалы в точке, равноудаленной от ламп на расстояние l_k , и максимальную — в точке, находящейся вблизи одной из ламп на расстоянии l_1 , имея в виду, что $l_2^2 = 0,065^2 + 0,015^2$; $l_2 = 0,1^2 + 0,015^2$; $l_1 = 0,03^2 + 0,015^2$; $\beta_1 = 64^\circ$; $\beta_k = 77^\circ$ и $\beta_2 = 82^\circ$.

Используя выражение (3.1), находим $E_{\text{макс}}$ и $E_{\text{мин}}$:

$$E_{\text{макс}} = E_A + E_B = \frac{0,7 \cdot 0,439}{0,03^2 + 0,015^2} + \frac{0,7 \cdot 0,199}{0,1^2 + 0,015^2} = 285 \text{ лк,}$$

$$E_{\text{мин}} = \frac{2 \cdot 0,7 \cdot 0,225}{0,065^2 + 0,015^2} = 70,9 \text{ лк.}$$

Неравномерность освещенности $E_{\text{макс}}/E_{\text{мин}} = 285/70,9 = 3,97$.

Сигнальные устройства. Простейшим световым сигнальным устройством является сигнальный фонарь, представляющий собой ламповый патрон-держатель с установленной в нем лампочкой накаливания, покрытой цветным полупрозрачным стеклом — линзой. Более сложные сигнальные устройства в виде световых панелей, мнемосхем, индикаторов и экранов получили широкое распространение в РЭА. На фоне светового поля часто наносят различную информацию и обозначения, разъясняющие значение и дополняющие содержание каждого сигнала.

Собственная яркость сигнальных полей, определяемая в темноте (обратный контраст), должна соответствовать следующим нормам:

а) осведомительная сигнализация молочно-белого цвета 100—140, бело-розового 100—130, оранжевого 100—130, голубого и синего 80—90, зеленого и малинового 60—70 и фиолетового 60—70 нт; при обратном контрасте (нормальное освещение) яркость может быть снижена на 10—30% для первых трех цветов и на 20—50% — для остальных цветов;

б) аварийная и предупредительная сигнализация красного цвета 150—350 и желтого цвета 150—400 нт.

В РЭА широко применяется подсветка шкал с помощью световодов, изготавливаемых из прозрачного силикатного стекла и пластмасс. Передача светового потока лампы накаливания вдоль прозрачной пластинки производится за счет свечивания ее торцов. Схемы исполнения некоторых световодов показаны на рис. 3.9. Внутренние плоскости прозрачной пластинки многократно отражают световой поток лампы от плоскости входа вдоль всего светового канала. С целью улучшения эффекта проводимости светового потока наружные плоскости светового канала покрывают непрозрачной или полупрозрачной краской светлых тонов. Если на поверхности светопроводящей пластинки гравировкой нанести риски, буквы или цифры, то они будут ярко светиться и на общем фоне становятся хорошо видны.

С помощью прозрачных световодов подсвечивают шкалы измерительных приборов (рис. 3.10) различных сигнальных устройств, указателей и мнемосхем.

Световоды широко используются при подсветке сложных устройств, склеенных из нескольких прозрачных слоев, каждый из которых может иметь свою

информацию (шкалы, надписи, мнемознаки). Включением одной из лампочек, установленных у торца каждого слоя, из нескольких шкал можно высветить ту, которая при данном режиме работ должна служить отсчетной. Для увеличения распознаваемости информации торцы таких шкал, риски, оцифровку и мнемознаки покрывают цветными прозрачными лаками.

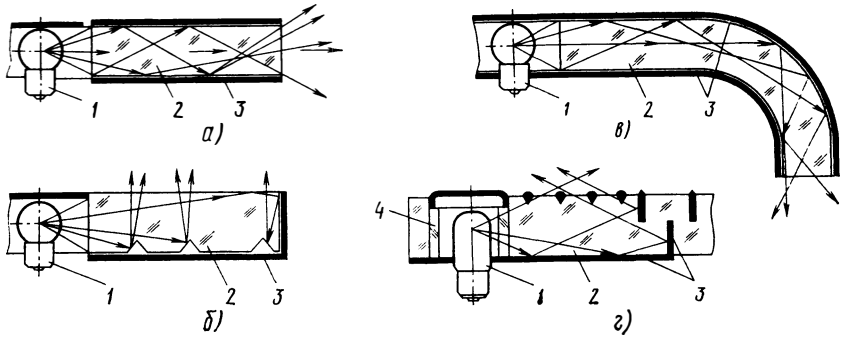


Рис. 3.9. Подсветка шкал и надписей с помощью прозрачных материалов
а — прямой световод; *б* — высвечивание надписей на плоскости; *в* — изогнутый световод;
г — подсветка шкал;
 1 — источник света; 2 — прозрачный материал; 3 — слой непрозрачной краски; 4 — цветной прозрачный фильтр

Для подсветки надписей часто используют слоистые пластинки, состоящие из двух различных по цветности и прозрачности слоев.

При передаче информации находит все большее применение волоконная оптика. Световод представляет собой жгут, составленный из большого количества стеклянных волокон. Каждое волокно образует отдельный канал световода диаметром 20—30 мкм. Снаружи волокна покрыты тонким слоем непрозрачного лака. На торцах противоположных концов жгута образуются прозрачные плоскости, представляющие собой мозаичный экран, размеры и разрешающая способность которого зависят от диаметра жгута. Принцип волоконной оптики широко используют при создании узлов по типу перископов или зондов.

Флуоресцентное и электролюминесцентное высвечивание. Флуоресцентное высвечивание шкал осуществляется покрытием их отметок, цифр и указателей активными светящимися составами (активизированный фосфор и др.). В зависимости от физических свойств состава цвет свечения их может быть оранжевый, зеленый или голубой. Риски, цифры и буквы, покрытые светящимся составом, видны глазом с остротой зрения до 0,8 в темноте на расстоянии 60 см.

Электролюминесцентные панели информации представляют собой плоские конденсаторы, в которых в качестве диэлектрика используется слой, содержащий равномерно распределенные кристаллы электролюминофора (рис. 3.11). Люминесцентное свечение получают за счет прямого преобразования электрической энергии в световую. Первым электродом служит прозрачная токопроводящая пленка, нанесенная на стеклянную пластинку. Второй электрод образуют гальваническим способом или напылением металла (медь, алюминий, серебро) с последующим покрытием его защитным слоем лака. Высвечиваемое изображе-

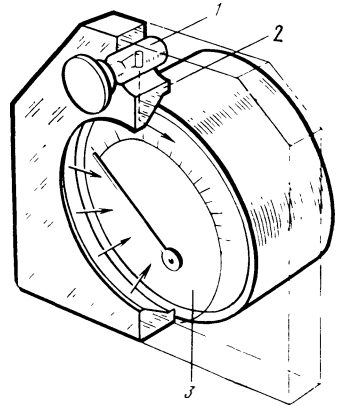


Рис. 3.10. Пример освещения шкалы прибора
 1 — источник света; 2 — прозрачный материал; 3 — шкала

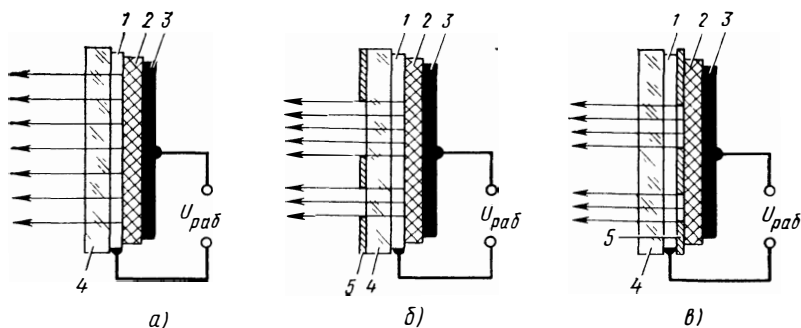


Рис. 3.11. Электролюминесцентные панели

a — светящаяся; *б* — с наружным трафаретом; *в* — с внутренним трафаретом
 1 — прозрачный электрод; 2 — слой электролюминофора; 3 — непрозрачный электрод; 4 — защитное стекло; 5 — трафарет с сигнальными надписями или знаками

ние получают с помощью трафаретов, выполняемых отдельной деталью или наносимых краской на защитное стекло. При использовании фигурных электродов трафареты не нужны.

На световых панелях изображения могут быть выполнены несветящимися на светящемся фоне или светящимися на темном фоне.

По назначению электролюминесцентные панели делятся на световые панели, индикаторы и экраны, по принципу индикации — на коммутируемые и некоммутируемые. Индикаторами служат световые панели со скрытыми изображениями, которые становятся видимыми при подключении питающего напряжения.

3.7. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОТСЧЕТНЫХ И ИНДИКАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Отсчетные и индикаторные устройства различаются между собой:

- 1) по конструктивному исполнению — механические, электро-механические, световые и комбинированные;
- 2) по принципу сигнализации — указатели, непрерывно обрабатывающие сигнал (моделирующие), указатели периодически действующие (дискретные) и неподвижные указатели (статические);
- 3) по функциональному назначению — поисковые, командные, предупредительные, вызывные, аварийные, контрольно-распределительные;
- 4) по форме кодирования — сигналы символы (условные знаки), сигналы, указывающие действительные значения (стрелочные приборы и шкалы), и сигналы условные, совпадающие с действительными по величине и направлению в определенном масштабе (знаки и векторы).

Приборы информации подразделяются на главные и второстепенные. Главные как указатели, несущие более важную информацию, отличаются от остальных увеличенными размерами. Практически наиболее широко используют шкалы диаметром 90—300 мм — для несущих важную информацию, 60—80 мм — для информации средней важности и 30—50 мм — для информации второстепенной важности.

В отсчетных устройствах важную роль играет форма шкалы. Ошибочно было бы при разработке отсчетной шкалы выбирать для нее только круглую форму. Более удобно считывать показания по шкале, имеющей форму «открытое окно», и только за этой формой следует преимущество круглой и полукруглой шкал. Менее удобными для считывания показаний оказываются горизонтальная и вертикальная шкалы.

Необходимо максимально упрощать изображение шкал, учитывая при этом внутреннюю смысловую связь информации. Например, не следует наносить шкалу полностью, если считывание показаний с нее производится в пределах небольшого участка.

При контроле только допустимых отклонений от установленной величины чтение абсолютного значения не нужно, и вместо делений и оцифровки на шкале достаточно нанести лишь контрольный участок. Такой измерительный прибор превращается в индикатор, скорость восприятия показания которого значительно увеличивается.

На скорость и точность чтения показаний оказывают также влияние форма указателя стрелки (индекса) и расстояние его от плоскости шкалы. Чем ближе к плоскости шкалы находится стрелка, тем меньше будет ошибка отсчета (ошибка параллакса).

Размер отсчетного деления шкалы определяется необходимой точностью отсчета и расстоянием шкального устройства от глаз наблюдателя. Чем дальше от наблюдателя располагается шкала, тем больший размер отсчетного деления она должна иметь. Практически установлено, что для обеспечения показаний с точностью $1/2$ деления со шкалы, находящейся от глаз оператора на расстоянии до 50 см, размер одного деления должен быть не менее 0,8—1,0 мм.

По характеру оценки показаний устройства зрительной информации делятся на указатели, дающие качественную оценку, дающие количественную оценку и оказывающие тенденцию к изменению в сторону «меньше» или «больше».

Характер оценки информации в отсчетных устройствах может быть и комбинированного типа. Это имеет место как в стрелочных приборах, так и в индикаторных устройствах, где одновременно с указанием количественной оценки стрелка, сигнальная отметка или панорама, отклоняясь от прежнего положения, показывает тенденцию к изменению по направлению. Величину или координаты отклонения можно передать в систему ручным или автоматическим слежением за сигналом (рис. 3.12).

Шкалы могут быть односторонние, двухсторонние и без нулевого значения, равномерные и неравномерные, симметричные и несимметричные, одношкальные и многошкальные. Односторонние шкалы начинаются с нулевого значения. У двухсторонних нулевое значение находится в середине шкалы, а отсчет производится вправо или влево от нуля. Шкалы без нулевого значения выполняются в пределах выбранного интервала. У равномерных шкал цена деления по всей шкале постоянна. Неравномерные шкалы имеют

переменную цену деления. Несимметричные шкалы используются в случае ограниченных габаритных размеров прибора. В приборах, предназначенных для измерения нескольких величин попеременно, используют многошкальные циферблаты. Форма шкал измерительных устройств оказывает существенное влияние на раз-

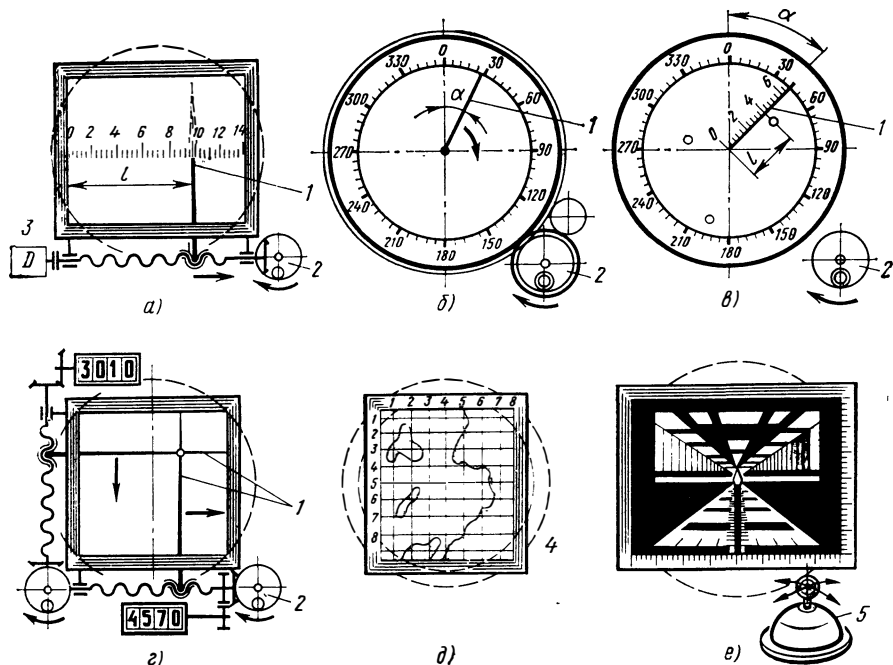


Рис. 3.12. Шкалы и методы отсчета с экрана электронно-лучевого индикатора
 а — линейная шкала; б — круговая; в — координатно-непрерывная; г — дискретная; д — раст-
 ровая; е — панорамная
 1 — индекс; 2 — следящая рукоятка; 3 — датчик; 4 — координатная рамка; 5 — координат-
 ная рукоятка

меры панелей информации. Сравнение одинаковых шкал с различной формой показывает, что если измерительный прибор круглой формы со шкалой, развернутой по дуге на 90° , принять за единицу, то наиболее эффективно используется площадь циферблата в квадратном приборе со шкалой, развернутой на $240\text{--}270^\circ$. Затем следует такой же прибор со шкалой, развернутой на 90° , и далее приборы с прямыми шкалами.

Отметки шкал делятся на главные, средние и малые и различаются между собой длиной и толщиной штриха. Высоту средних отметок делают в $1/2$ или в $1/5$ часть главных, а малые — в $1/5$ или $1/10$ часть главных.

Смотровые окна, образованные над участками вращающихся шкал, должны позволять при отсчете одновременно видеть соседние цифры большего и меньшего значений.

Мнемосхемы. Мнемосхемы, размещаемые на информационных панелях управления в виде наглядного изображения функционального состава действующего комплекса, показывают в каждый момент времени состояние объекта управления и процесс воздействия на него исполнительной системы. Мнемосхема — один из основных источников информации, он заменяет большое количество различных сигнальных устройств, указателей, измерительных приборов, счетчиков и других источников информации.

Мнемосхемы различают по выполняемым функциям на операторские, отображающие пространственно-сосредоточенный комплекс, и диспетчерские, отображающие рассредоточенную систему; по роду работы — на оперативные (информация и управление) и неоперативные (информация и связь); по объему информации — на индивидуальные (для одного объекта) и избирательно-вызывные (для большого числа объектов); по месту размещения — на информационные щитах и в пультах; по способу кодирования информации — условные и символические; по способу высвечивания — пряموконтрастные или обратноконтрастные; по способу конструктивного выполнения — накладные, вырезные, рисованные, проекционные и электролюминесцентные.

При компоновке мнемосхемы символически или предметно отображают наиболее существенные элементы информации о системе и изменении ее состояния. При этом не следует допускать избыточную информацию или такую которую невозможно использовать в процессе управления.

Наиболее важные элементы информации выделяют размерами, цветом или яркостью. Изображение состояния должно быть выразительным, четким и легко запоминающимся. При этом в качестве символа используют унифицированные изображения, широко известные в технике информации. Соединительные линии связи делают короткими и по возможности прямыми, сплошными и не пересекающимися.

3.8. ОРГАНЫ РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Классификация органов управления. Органы управления и индикации служат основными средствами связи оператора с системой управления. Выданная этой системой информация перерабатывается оператором, и результаты ее в виде управляющих приказаний вносятся в систему с помощью органов управления.

Органы ручного управления могут быть оперативными или малооперативными. К оперативным относятся те, которые несут наиболее важные функции (главные) и часто используются оператором.

Органы ручного управления, используемые в РЭА, классифицируются по роду исполнительных движений, виду воздействия на них усилия и характеру процесса воздействия на управляемые органы.

По роду исполнительных движений органы управления могут быть: простого манипулирования — включения, выключения и переключения; дозированного движения — больше или меньше; непрерывно-исполнительного движения — при слежении или при постоянном внесении изменений; манипулирования с повторяющимися движениями — набор программы, работа с ключом или клавишным устройством.

По виду воздействия усилия исполнительные движения при управлении могут быть: плавные или прерывистые; кратковременные или длительные; к себе или от себя; вправо или влево, вверх или вниз; фиксированные или нефиксированные; с постоянным или переменным усилием.

Определяющие процессы управления. Система управления должна предусматривать максимальное использование естественных рефлексов оператора и мнемонических правил запоминания. Поэтому направление перемещения или вращения органов управления должно соответствовать логике движений объекта, направлению протекания процесса, нарастанию или снижению величин.

Движение рукоятки вправо, вверх или от себя, вращение по часовой стрелке или нажатие верхних и правых кнопок соответствуют положению «включено», «пуск», «вперед», «вправо», «вверх», «замер» и т. д. Противоположное направление движения, вращение рукояток или нажатие нижних кнопок соответственно должны означать: «выключено», «назад», «влево», «вниз», «нет замера» и т. д.

Как правило, необходимо стремиться к существенному снижению усилий, затрачиваемых на приведение в действие органов управления. Однако наименьшее значение этих усилий не должно снижать четкости восприятия движения при управлении и осознания усилий сопротивления, предохраняющего рукоятки от самопроизвольного вращения. Для преодоления трения фиксации при включении, переключении и вращении ручек управления необходимо обеспечивать следующие усилия: 2,3—4,5 Н для рычажных ручек типа тумблер, 5 Н для кнопок малого типа и 10—30 Н для кнопок большого типа; до 10 Н при вращении маховиков и рукояток только кистью руки; до 40 Н тоже рукой до локтя; до 100 Н всей рукой; 9—23 Н при вращении с большой скоростью [37].

Форма, размеры и установка органов управления. Физиологические требования предусматривают необходимость образования органов управления такой формы, при которой в первую очередь обеспечивается удобный их захват (соответствующий анатомическому строению руки). В зависимости от того, предназначена ли рукоятка для захвата двумя пальцами или тремя, всеми пальцами или с охватом ладонью, изменяется и ее форма. Она должна способствовать также преодолению сопротивления управляемого органа при захвате естественным образом, без нарушения основного рабочего положения оператора.

При выборе размеров рукояток кроме действующего момента сопротивления надо учитывать также и используемое оператором штатное снаряжение (перчатки, рукавицы).

Нажимные кнопки выполняются круглой, квадратной и прямоугольной формы. Круглые кнопки имеют размеры диаметров от 12 до 20, квадратные имеют размеры сторон от 10 до 20 и прямоугольные — от 10×16 до 20×32 мм. Наиболее удобная рабочая плоскость кнопки — вогнутая.

Кнопки, собранные в группу, представляют собой клавишные устройства с системой фиксации каждой кнопки в нажатом состоянии (при взаимной блокировке остальных кнопок) или освобождения включенной кнопки (при нажатии какой-либо другой из этой группы).

Некоторые клавишные устройства имеют обратный контроль включенного положения. При включении контакта высвечивается и сигнальная лампочка, помещенная под полупрозрачной клавишей, что указывает на положение «включено».

Кнопки и клавишные устройства иногда выполняют цветными. Цвет клавиш определяется тем или иным режимом или исполняемыми функциями.

Круглые поворотные ручки неограниченного вращения при захвате их пальцами руки должны обеспечивать хорошее сцепление. Для этого на ручках с высотой до 20 мм делают мелкую накатку (рис. 3.13). На ручках с высотой более 20 мм наносят

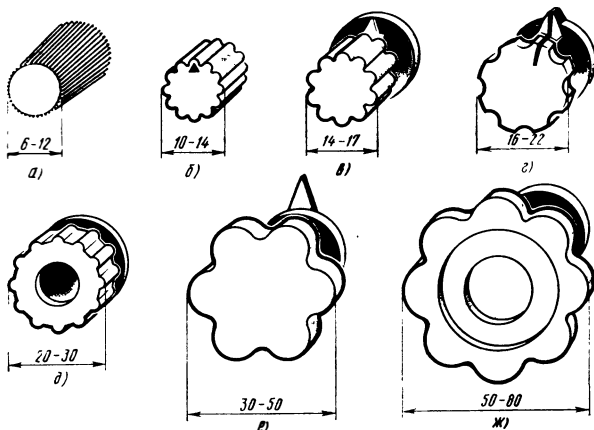


Рис. 3.13. Форма ручек управления плавного вращения до одного оборота
 а, б — для захвата двумя пальцами; в, г, д — для захвата тремя пальцами; е, ж — для захвата ладонью руки

крупные зубцы или впадины, равномерно расположенные по окружности. Некоторые ручки у основания имеют диски, предохраняющие пальцы рук от скольжения по приборной панели. Часто на эти диски наносят индексы и цифры. Диаметр круглых ручек определяется передаваемым крутящим моментом или точностью установки.

Круглые поворотные ручки иногда делают с кодовой формой (рис. 3.14), хорошо различаемой пальцами на ощупь при слабом освещении.

Поворотные ручки ограниченного вращения используются преимущественно на выключателях и переключателях в элементах управления с фиксированным положением. Такие ручки, как правило, имеют указатели положения в виде «клювика» (рис. 3.14, б).

Поворот ручки производится в пределах угла, ограниченного действием переключателя. Поворотные ручки различаются между собой геометрической формой и могут быть при необходимости опознаны в темноте пальцами рук на ощупь, а также размером, обеспечивающим диапазон усилий вращения нормального ряда

переключателей тремя типами с размерами a , равными 32, 40 и 52 мм.

Рычажные рукоятки и маховики кругового вращения применяются при управлении положением элементов управления многооборотных и силовых приводов.

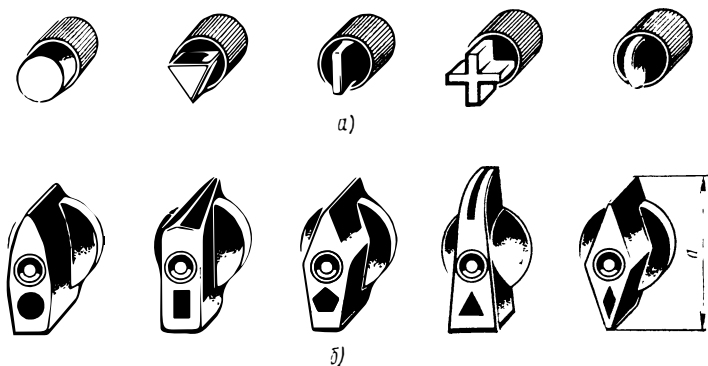


Рис. 3.14. Ручки управления с условной кодовой формой

a — для плавного вращения, диаметр 16 мм; b — для дискретной установки в пределах до одного оборота

При управлении ползунковыми и перекидными переключателями, вращении координатных устройств или передвижении движков скользящих контактов часто используются рукоятки поступательного движения, наиболее характерные типы которых приведены на рис. 3.15.

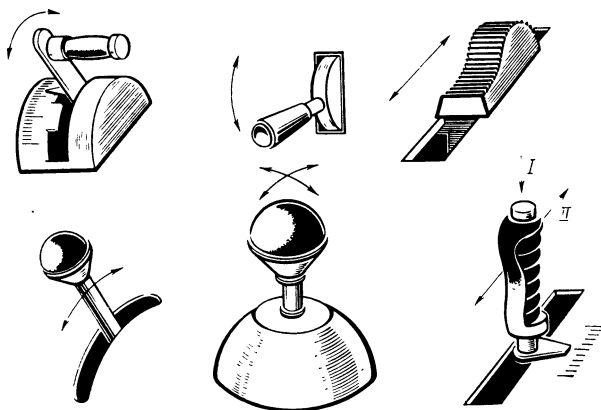


Рис. 3.15. Типовая форма рукояток поступательного перемещения

3.9. КОМПОНОВКА ПАНЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

Взаимное размещение элементов информации и органов управления на панелях приборов должно способствовать: выработке у оператора определенного чередования автоматических навыков

в управлении режимами и усвоении получаемой информации; снижению времени, затрачиваемого на каждую операцию; рациональному использованию всех зон пространства перед операторами.

Элементы информации сосредотачиваются на лицевых панелях приборов в определенной системе с учетом группировки их по функциональному признаку, важности информации, частоты использования информации и последовательности снятия показаний. Наиболее рациональным размещением элементов информации и органов управления, функционально связанных между собой, считают горизонтальное.

При размещении средств информации на панелях особого внимания требуются приборы, у которых текущие показания быстро изменяются. В отличие от регистрирующих приборов, у которых они непрерывно записываются, показания стрелочных приборов необходимо запоминать. Оператору при этом приходится не только принимать и использовать информацию, но и хранить ее в памяти.

Порядок использования средств информации и органов управления должен исключить необходимость одновременного запоминания более трех значений информации, сопоставления более трех логических условий и использования более двух органов управления.

Органы управления располагают на панелях в пределах их доступности и не далее 60 см от плеча оператора. Оперативные рукоятки помещают несколько ниже груди оператора, следуя общему правилу: чем чаще используют рукоятку, тем ближе устанавливают ее к уровню локтей. При этом необходимо учитывать, что рука оператора во время манипуляций при управлении не должна заслонять наблюдаемые им индикаторы. Распределение рукояток между правой и левой частями панелей происходит из условий загрузки двух рук оператора. Кроме того, органы информации и управления располагают на панелях в порядке последовательности выполнения операций с минимальными зрительными и ручными маршрутами.

Если на панелях имеется большое число светосигнальных устройств, необходимо предусматривать возможность проверки исправности их с целью создания у оператора абсолютной уверенности в отсутствии перегоревших сигнальных ламп накала.

Мигающий источник света как более заметный (по сравнению с постоянным) следует использовать в аварийной и предупредительной сигнализации. Частота мигания должна быть в пределах 3—8 Гц.

ПРИНЦИП КОМПОНОВКИ И ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

4.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КОМПОНОВКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Схемы современных радиоэлектронных систем настолько сложны, что непосредственная конструкторская разработка рабочих чертежей невозможна без выполнения предварительной части работ — компоновки РЭА по заданным требованиям.

Компоновка есть процесс создания из отдельных составляющих частей композиции целого изделия, отвечающего всем требованиям технического задания.

Компоновка является первым этапом при разработке конструкции. На этом этапе может быть произведен поиск принципиального и наиболее совершенного решения поставленных технических задач без существенной потери времени. В процессе компоновки выбираются основные технические направления или принцип действия. Далее определяются конструктивные составляющие изделия, устанавливаются их взаимное расположение, связи и определяются габаритные размеры и масса изделия.

Результатом выполненной компоновки являются компоновочные чертежи, позволяющие до начала основных работ при сравнительно небольших затратах средств и времени рассмотреть имеющиеся варианты, сделать их качественную оценку и принять к разработке лучший. Наличие компоновочных чертежей позволяет предварительно рассчитать прочность, тепловой режим и виброизоляцию, а также оценить компактность аппаратуры и условия размещения ее на объекте.

В процессе компоновки широко используются способы, упрощающие и сокращающие объем чертежно-графических работ, такие как аппликационный, модельный, натурный, номографический и машинный [8]. Основным способом является графический, хорошо известный каждому конструктору. В процессе графической компоновки используют номографический и машинный способы, руководствуясь при этом геометрическими параметрами элементов, их тепловыми режимами и электромагнитной совместимостью. Для модельной компоновки модели компокуемых элементов выполняют из пластмассы или металла, а для натурной компоновки в качестве моделей используют и натуральные элементы аппаратуры. Аппликации представляют собой контуры элементов в плоскости. Их изготавливают из бумаги, картона, пластмассы или металла. Металлические аппликации или модели позволяют использовать в качестве компоновочной плоскости магнитные матрицы, выполненные из постоянных магнитов. Фотографирование скопированных моделей исключает чертежно-графические работы. Компоновку сложной РЭА, как правило, выполняют графическим способом с использованием номографического и машинного метода.

В процессе компоновки вначале решают главные задачи и только после этого переходят к второстепенным. В компоновочном чертеже не следует увлекаться подробным изображением элементов конструкции. Необходимо максимально упрощать такие чертежи, так как подробности всегда можно нанести впоследствии там, где возникает в этом необходимость.

Процесс компоновки делят на два этапа. На первом этапе осуществляют внутреннюю компоновку: решают основные вопросы образования отдельных конструктивных составляющих и размещения схемных элементов (с помощью ЭВМ). На втором этапе осуществляют внешнюю компоновку: решают общие вопросы формообразования и компоновки отдельных устройств и приборов исходя из условий наиболее качественного выполнения технических требований их эксплуатации.

Оценка плотности заполнения объема РЭА может быть выполнена по значению коэффициента заполнения объема или, как его часто называют, коэффициента компактности, который характеризуется отношением суммы объемов элементов $\sum_1^n V_d$ к общему объему сборочной единицы V_c , т. е.

$$K_3 = \left(\sum_1^n V_d \right) / V_c. \quad (4.1)$$

Однако при определении компактности сложной РЭА, в которой число элементов может исчисляться тысячами, определение объема всех схемных элементов связано с большой затратой времени. Такая задача может быть упрощена при использовании данных, накопленных в процессе выполнения предшествующих разработок.

В настоящее время при оценке компактности РЭА широко используют способ, характеризующий компактность по количеству схемных элементов, приходящихся на единицу объема сборки. Такая оценка учитывает средние габаритные размеры элементов независимо от степени их микроминиатюризации. Если в выражении (4.1) заменить сумму фактических объемов всех n элементов значением их среднего объема $V_{д.ср}$, то коэффициент заполнения можно записать в виде $nV_{д.ср}/V_c = \gamma_c V_{д.ср}$. Тогда плотность заполнения объема конструктивной составляющей примет вид

$$\gamma_c = n/V_c.$$

Сравнивая плотность заполнения объема РЭА схемными элементами различных поколений, можно отметить, что если при использовании вакуумных ламп пальчиковой серии плотность компоновки составляла от 0,03 до 0,4 деталей/см³, то при переходе на полупроводниковые приборы и печатный монтаж плотность компоновки возросла в 5 раз (от 1 до 2 деталей/см³). При использовании пленочных интегральных микросхем плотность компоновки увеличилась в 50 раз (от 50 до 100 деталей/см³), а при использовании полупроводниковых интегральных микросхем — в 600 раз (от 500 до 1200 деталей/см³).

4.2. ВЛИЯНИЕ РАЗВИТИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ НА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПОНОВКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Совершенствование компоновки РЭА нужно рассматривать как историю качественного развития электронной техники и технического уровня промышленного производства. Истоками современной радиоэлектронной техники надо считать технику телефонной и телеграфной связи и, в частности, беспроволочную телеграфную связь.

Появление первых трехэлектродных радиоламп промышленного типа можно назвать началом массового распространения РЭА.

Взросшее значение первых станций радиосвязи и радиовещания и большая потребность в приемной и передающей радиоаппаратуре поставили перед промышленностью неотложную задачу ее массового выпуска. В 1928—1932 гг. был налажен выпуск приемников, а в 1933—1937 гг. их было выпущено более 4 млн. штук. Однако половина их была приемниками детекторного типа.

В то время каких-либо требований к конструкции радиотехнических приборов не существовало. При компоновке первых промышленных передатчиков и приемников имелись в виду главным образом обеспечение хорошего доступа к каждому электроэлементу схемы, возможность их регулировки и наблюдения за каналом нитей электронных ламп.

В первых образцах радиоприборов схемные элементы, такие как катушки индуктивности, радиолампы, постоянные и переменные резисторы и конденсаторы, имели значительные габаритные размеры и размещались свободно в деревянных футлярах, на изоляционных панелях из эбонита или дуба, пропитанного лаком. Особенно большие габаритные размеры и массу имели источники питания (батареи постоянного тока накала и анодные батареи высокого напряжения).

Внешние приборы во многом походили на электротехническую измерительную аппаратуры (магазины сопротивлений, емкостей, измерительные мосты или стрелочные приборы), выпускавшуюся в то время промышленностью. Такие приборы выполнялись преимущественно в футлярах из полированного дуба с наружными установочными, контактными и крепежными деталями из полированной латуни.

Электрический монтаж радиоаппаратуры производился одножильным медным проводом, а крепление элементов и контактные соединения в большинстве случаев осуществлялись с помощью резьбовых деталей. Большие габаритные размеры радиодеталей, их свободное размещение в футлярах и наружная установка радиоламп не требовали специальных мер охлаждения элементов, несмотря на их значительную мощность потерь. Такие конструкции в то время обладали двумя существенными недостатками — малой технологичностью и ограниченной эксплуатационной надежностью. .

Блочный принцип построения усилительных каскадов, распространенный в телефонии, перенесен на РЭА. Многоламповую радиоаппаратуру стали компоновать покаскадно, а межкаскадные экраны внутри приборов стали использовать как несущую конструкцию — шасси. При этом намного улучшилась общая компоновка блоков и их механические характеристики. Дальнейшим этапом совершенствования радиоаппаратуры послужил выпуск промышленностью в начале 30-х годов электронных ламп с улучшенными параметрами: стеклянных и металлокерамических с направляющим ключом, расположенным в центре цоколя.

Плотность компоновки была существенно увеличена с выпуском в конце 40-х годов электронных ламп так называемой «пальчиковой» серии, а также ламп типа «желудь» и «дробь». Одновременно с массовым изготовлением резисторов (переменных композиционных, постоянных металлопленочных) и конденсаторов (переменной и постоянной емкости металлобумажных и керамических) промышленностью были освоены и так называемые установочные электроэлементы: сигнальные патроны, держатели предохранителей, монтажные платы, присоединительные колодки и т. п.

Выпуском промышленностью в 1928—1930 гг. приемных и передающих электронно-лучевых трубок было положено начало широкому развитию радиолокационной и телевизионной аппаратуры.

Совершенствование промышленных радиоэлементов — улучшение их параметров и снижение габаритных размеров — постоянно служило источником улучшения компоновки РЭА. Однако наиболее существенное уменьшение размеров в то время осуществлялось за счет повышения плотности размещения схемных элементов.

Расширение областей использования РЭА (в авиации и морском флоте, в авто- и железнодорожном транспорте) в конце 30-х годов поставило перед конструкторами задачу создания аппаратуры, защищенной от вредного воздействия климатических и механических факторов окружающей среды. Испытания и опыт эксплуатации первых образцов такой аппаратуры позволили сформулировать единые общие и специальные технические условия на разработку РЭА и создать первые унифицированные узлы и типовые блоки наземной, корабельной и самолетной аппаратуры.

Все увеличивающаяся сложность РЭА создавала казалось бы непреодолимые трудности ее конструирования. Число радиоламп и схемных элементов в электронных устройствах непомерно возрастало. Объем аппаратуры радиоэлектронной системы средней сложности составлял десятки стоек, общая масса — тонны, а потребляемая мощность — киловатты. Относительно большие мощности потребления электроэнергии настолько увеличивали внутренний нагрев аппаратуры, что используемые системы охлаждения по своей массе и объему уже не позволяли превысить достигнутого уровня плотности компоновки РЭА.

Дальнейшие требования снижения объемов, массы, материалоемкости потребляемой мощности, повышения надежности и технологичности требовали кардинальных мер.

Микроминиатюризация как новое направление в компоновке РЭА утвердилось с освоением в массовом производстве полупроводниковых приборов и печатного монтажа в 1950—1960 гг.

Наконец, развитием техники тонких пленок и полупроводниковых материалов было положено начало (1960—1966 гг.) созданию пленочных и полупроводниковых интегральных микросхем. Подготовка к практическому использованию интегральных микросхем и созданию первых промышленных образцов микроэлектронной аппаратуры заняла длительный период. Начало его относится к первому выпуску пленочных резисторов (1930—1940 гг.) и конденсаторов (1940—1950 гг.) и использованию печатного монтажа.

С развитием микроэлектроники изменялись и методы конструирования. Если при создании первого поколения РЭА в целях снижения габаритных размеров, массы и стоимости аппаратуры стремились к сокращению количества каскадов, ламп и других схемных элементов, то в третьем и четвертом поколениях стремятся неограниченно увеличить число эквивалентных схемных элементов, а значит, и интеграцию. Это вполне закономерно, так как габаритные размеры, масса и относительная стоимость электро-радиоэлементов стали значительно меньшими, в то время как их надежность — возросла.

4.3. ПРИНЦИП ДЕЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Структурное образование РЭА. Система РЭА представляет собой структуру, постепенно наращивающуюся из сборочных единиц (частей). Основой для построения элементарной сборочной единицы служит *элементный базис* (схемные элементы) — наиболее низкий и неделимый структурный уровень. Элементный базис часто называют и нулевым структурным уровнем. Он состоит из схемных элементов общего применения или дискретных элементов. В микроэлектронной аппаратуре элементным базисом служат микросхемы.

Уровень сборки характеризуется размерами и сложностью сборочной единицы (рис. 4.1). В РЭА на дискретных элементах самой малой сборочной единицей конструкции является элементарный узел, ячейка, модуль или типовой элемент замены. Таковую сборку называют первым структурным уровнем. При использовании в качестве элементной базы микросхем функциональные задачи первого структурного уровня значительно усложняются. Степень интеграции микросхем может изменить структурный уровень сборки на более высокую ступень. Сборка субблоков, блоков или панелей из узлов первого структурного уровня составляет второй структурный уровень. Третий структурный уровень образуют моноблоки или рамы, состоящие из субблоков, блоков или панелей. Группа блоков, моноблоков или рам с установленными на них панелями, собранная в приборном корпусе (стойке, шкафу, контейнере), составляет прибор или устройство, являющиеся высшей сборочной единицей — четвертым структурным уровнем.

Функциональный принцип деления аппаратуры. Функциональное деление аппаратуры на приборы, блоки и узлы осуществляется разбивкой ее на такие части, группа базовых элементов которых выполняет самостоятельную функцию. Наименьшую часть функциональной сборочной единицы составляет ячейка (модуль). Она состоит из минимального функционально оправданного числа элементов, решающих одну из задач преобразования.

Функциональный принцип компоновки РЭА увеличивает возможность использования одних и тех же сборочных единиц в новых системах с неоднократно повторяющимися функциональными узлами. Изменение конструкции одного узла не влечет за собой переделку других функциональных сборочных единиц и не вызывает изменения всего изделия и перестройки производства.

Основные особенности деления РЭА на приборы. Структурный состав радиоэлектронной системы определяется ее функциональной сложностью, объектом использования, ремонтопригодностью и технологичностью. Поэтому при делении системы на приборы указанные свойства учитывают в первую очередь. Кроме того, немалое влияние на образование прибора оказывают условия транспортировки приборов через стандартные двери, проемы, трапы, люки, требования размещения на объекте, специальные требования исполнения аппаратуры (взрывобезопасность, термостойкость и др.), универсальность приборов, применяемых в других изделиях, и т. д.

Практически существуют два способа исполнения приборов радиоэлектронной системы: децентрализованный и централизованный.

Децентрализованный способ предусматривает деление радиоэлектронных систем малой и средней сложности на мелкие одноблочные или двухблочные приборы. При этом в комплекс может входить большое число простых приборов, различных по функцио-

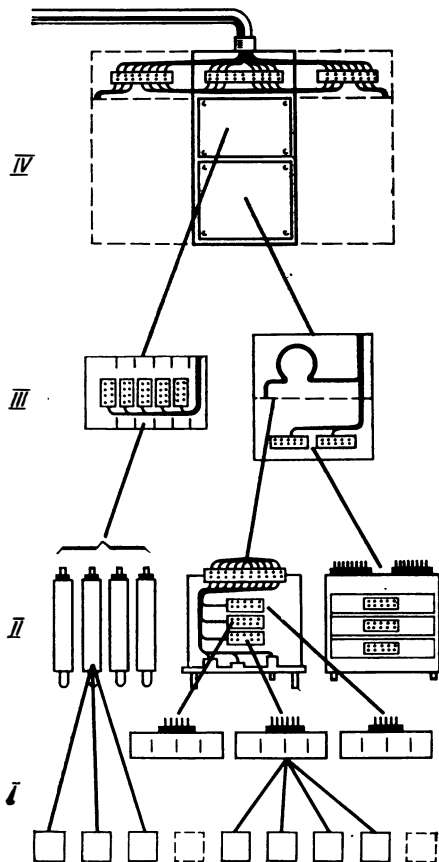


Рис. 4.1. Структурные уровни РЭА
I — модуль (ячейка); II — блок; III — моноблок (секция); IV — прибор (устройство)

нальному назначению и относительно малых габаритных размеров. Такие приборы в аппаратном помещении крепятся на стенку или устанавливаются на столах. Электрическая связь между ними осуществляется кабелем. Приборы, имеющие органы управления и индикации, сосредотачиваются у рабочего места оператора.

Однако в силу большой насыщенности объектов разнообразной аппаратурой возможность удобного размещения большого количества приборов комплекса непосредственно у оператора снижается. Крайне трудно в таких условиях обеспечить нормальный доступ для обслуживания каждого прибора, а общая площадь рабочих панелей управления оказывается непомерно большой, и работа с ними становится невозможной. Кроме того, кабельная связь большого числа малых приборов комплекса усложняет схему соединения и увеличивает расход кабеля, а при использовании централизованного принудительного охлаждения значительный объем занимают воздухопроводы. Необходимость обеспечения доступа к каждому прибору для его монтажа на месте и обслуживания при эксплуатации требует значительного объема аппаратного помещения. Это в свою очередь лишь увеличивает трудности нормального размещения аппаратуры.

Вследствие перечисленных недостатков децентрализованный способ компоновки сложных комплексов оказывается малоэффективным.

Лучшим компоновочным решением является способ агрегатирования аппаратуры, т. е. создания из отдельных приборов сборок в виде самостоятельных функциональных устройств — агрегатов. Пример агрегатирования отдельных приборов сборкой их в стойку показан на рис. 4.2. Агрегатирование является начальным этапом централизации аппаратуры.

Централизованный способ исполнения РЭА предусматривает размещение всех органов управления и информации на центральном пульте, а исполнительных блоков, скомпонованных в виде стоек, шкафов или контейнеров, — в помещениях, удаленных от поста управления.

Способ централизации аппаратуры особенно эффективен при использовании функционально-узловых и блочных конструкций. На рис. 4.3 для сравнения приведены схемы исполнения радиоэлектронного комплекса этими двумя способами. Как видно, участки приборов, которые требуют постоянного наблюдения или доступа к органам управления (показаны на рисунке в виде заштрихованных участков), при централизованном способе исполнения занимают значительно меньшую площадь.

Объем аппаратуры централизованного исполнения в сравнении с децентрализованным снижается примерно на 20—25, а масса на 15—20 %. Снижение объема и массы достигается главным образом за счет сокращения кабельной связи, арматуры ввода кабеля в приборы, использования групповой амортизации, вен-

тияции, элементов несущей конструкции и за счет увеличения компактности аппаратуры.

Принцип деления аппаратуры на блоки. Деление аппаратуры на блоки предусматривает наиболее полную реализацию в изданных условиях, вытекающих из технологических и эксплуатационных требований. Существуют два принципа построения РЭА по функциональным признакам. Первый называют функционально-блочным, в нем нераздельной сборочной единицей является блок, второй — функционально-узловым, в нем блок состоит из функциональных узлов (модулей, ячеек), которые приняты за основу при построении нижней сборочной единицы — первого структурного уровня.

Блочный принцип преследует цель построения РЭА в соответствии с выбранным размерным модулем с высокими эксплуатационными качествами и ремонтнопригодностью из технически однородных блоков. По технологическому признаку блоки комплекса РЭА подразделяются на четыре группы:

- 1) радиоэлектронные блоки с различными функциями преобразования сигналов, состоящие из однородных узлов;
- 2) электротехнические, выполняющие функции устройств распределения питания, коммутации и т. д.;

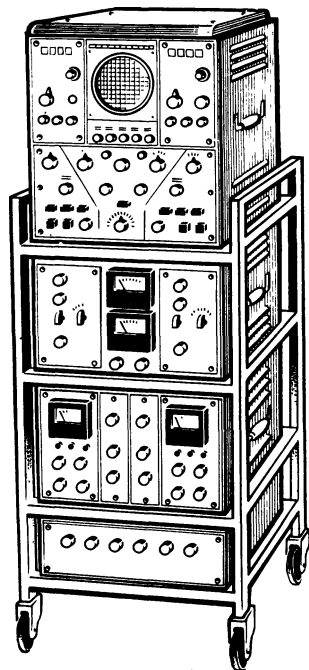


Рис. 4.2. Пример простейшего агрегатирования отдельных приборов

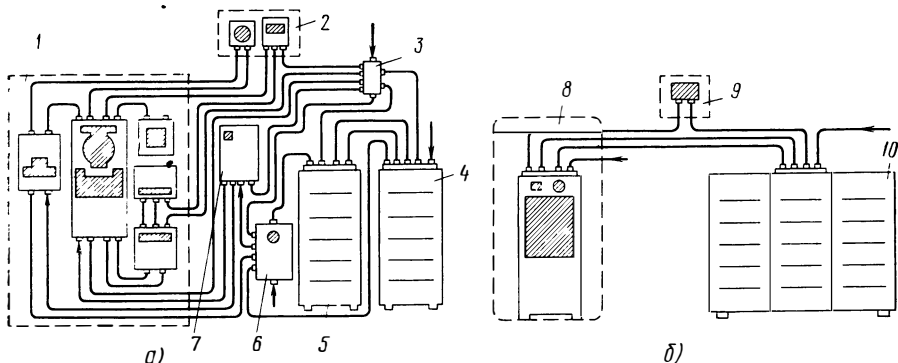


Рис. 4.3. Компонка комплекса РЭА децентрализованным (а) и централизованным (б) способом

1 — приборы управления, устанавливаемые перед оператором; 2 — выносные контрольные приборы; 3 — распределительная кабельная коробка; 4 — приемное устройство; 5 — передающее устройство; 6 — прибор питания; 7 — коммутирующее устройство; 8 — пульт управления; 9 — выносной контрольный прибор; 10 — приемно-передающее устройство

3) электромеханические, состоящие из электрических приводов, следящих систем, записывающих механизмов и т. д.;

4) механические, составляющие механизмы ручного привода, шкальных устройств, редукторов и других элементов механики.

Основная компоновочная форма блоков и узлов часто зависит от заданной формы приборов, стоек и контейнеров (рис. 4.4). Наиболее простой и технологичной формой принято считать плоскость или параллелепипед. Однако при размещении блоков в контейнерах или приборах, имеющих цилиндрическую или шаровую кон-

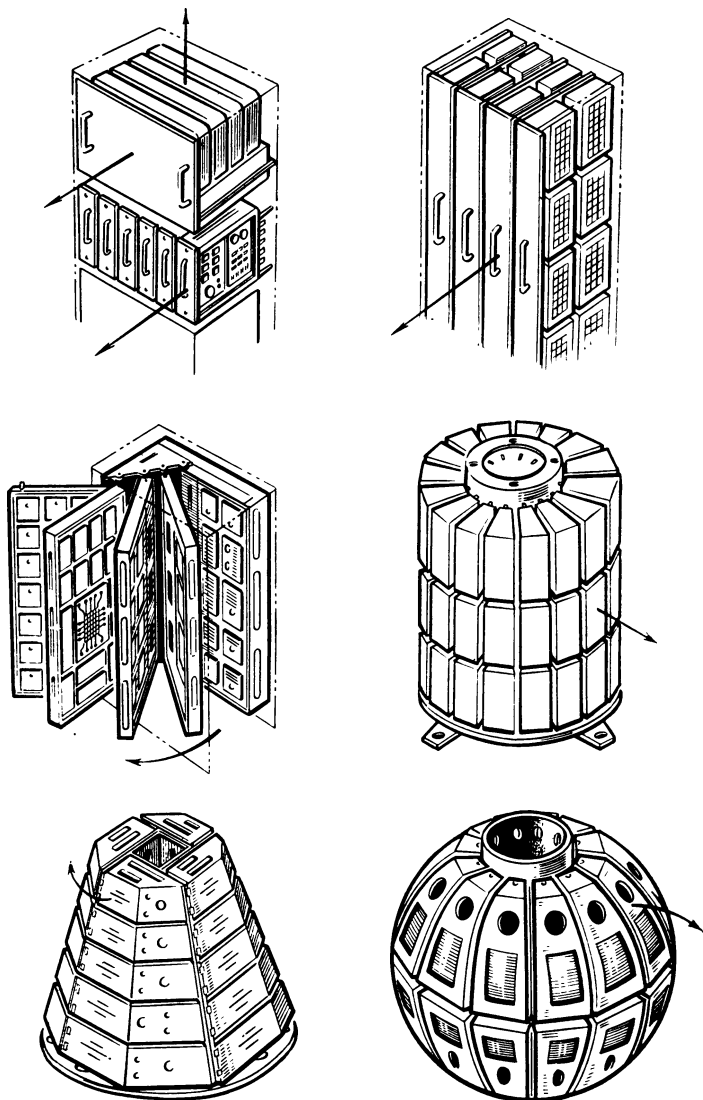


Рис. 4.4. Формы блоков, устанавливаемых в различные приборы

фигурацию, сегментная или призматическая форма по своей компактности может оказаться более выгодной.

Принцип деления блоков на узлы. Необходимо различать два вида функциональных узлов: сложные (субблоки) и элементарные (модули или ячейки). Метод построения блоков из функциональных узлов благодаря полной реализации в них технологических и эксплуатационных требований получил наиболее широкое применение.

Деление блоков на узлы способствует: созданию наименьшей и экономически целесообразной сменной сборочной единицы, ниже которой РЭА не контролируется; образованию сборочной единицы с законченным циклом изготовления и широкой применимостью; обеспечению наиболее простого доступа при ремонте или смене узла; исполнению электромонтажа простым технологичным способом и короткими участками (печатный монтаж).

При делении блоков на узлы необходимо учитывать, что при отказе в узле хотя бы одного элемента с определенной надежностью необходимость ремонта или замены такого узла будет возникать тем чаще, чем больше элементов содержит узел. Поэтому узлы целесообразно делить на более простые, содержащие небольшое число схемных элементов. Однако чрезмерное дробление схемы также имеет свои недостатки, так как при этом в изделии увеличивается общее количество соединительных, установочных и крепежных деталей, усложняется внутриблочный электромонтаж, возрастают общая масса и габаритные размеры аппаратуры. Поэтому при использовании схемных элементов высокой надежности можно компоновать более крупные узлы.

4.4. КОМПОНОВКА И ХАРАКТЕР КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРОВ

Конструктивные особенности. В РЭА, выполненной для различных условий эксплуатации, значительное число схемных элементов и элементов конструкции имеет общее применение. Это способствует осуществлению широкой унификации конструкции РЭА и создает условия для расширения централизованного изготовления типовых узлов и элементов несущей конструкции с поставкой их разработчикам РЭА.

Сопряжение блоков и элементов несущей конструкции с корпусом прибора (стойкой) стремятся осуществить простыми связями при движении блоков вдоль одной оси, направленной преимущественно перпендикулярно плоскости передних панелей прибора. Это значительно упрощает общую компоновку прибора и конструкцию его элементов связи.

В своем развитии РЭА насчитывает четыре этапа или, как часто говорят, четыре поколения. Каждое поколение отличается конструкцией базовых элементов. Первое поколение представляет РЭА, построенная с использованием электронных ламп и навесных схемных элементов, второе — с применением полупроводниковых приборов, миниатюрных подвесных элементов и печатного монтажа. Третье поколение построено на корпусированных инте-

гральных микросхемах, и, наконец, четвертое поколение — на микросхемах высокой степени интеграции. Элементная база стала определяющей при оценке качества конструкции РЭА. Поэтому ниже конструкцию блоков и узлов мы будем рассматривать по применению типа базовых элементов, а конструкцию исполнения приборов систем РЭА — по объектам их использования.

Следует иметь в виду, что деление РЭА по объекту использования или, иначе говоря, по условиям использования на наземную, бортовую и корабельную чисто условное, так как при использовании РЭА в закрытых отапливаемых и проветриваемых помещениях четко определить границы между названными группами подчас невозможно. С одной стороны, типизация высоконадежной РЭА общего применения (приемно-передающая, звукозаписывающая, телевизионная, счетно-решающая) уже преодолела ограничения, связанные с условием использования ее на земле, в воздухе и на воде, с другой — существующий комфорт в закрытых помещениях современных объектов создает равные и благоприятные условия эксплуатации для всех групп РЭА.

Наземная аппаратура. Она относится к самой большой многофункциональной разновидности стационарной, переносимой и перевозимой аппаратуры децентрализованного и централизованного типов. Примером наземной РЭА могут служить стационарная радиовещательная аппаратура, приемно-передающие устройства, телевизионная аппаратура, автоматические системы управления, электронно-вычислительные машины, аппаратура измерительная стационарных и передвижных лабораторий и т. д.

В числе этой аппаратуры особенно характерны своей компоновкой *стационарные ЭВМ*. Они предназначены для работы в закрытых отапливаемых и вентилируемых помещениях. Объем аппаратуры, входящей в ЭВМ, зависит от ее производительности и сложности решаемых ею задач. По такому принципу создают комплексы больших, средних и малых машин.

Для рассмотрения структуры ЭВМ конструктивным примером может служить ЭВМ ЕС-1050. Основные устройства ее состоят из четырех структурных уровней. Нулевым (базовым) уровнем являются ИМ в пластмассовых корпусах типа ДИП. Первым сборочным уровнем служат сменные узлы. Они представляют собой печатные платы, на каждой размещены 24 или 72 ИМ и электрические соединители на 48 или 90 контактов. Вторым сборочным уровнем являются блоки-панели, объединяющие до 40 сменных узлов. Компоновка шести полных и двух полупанелей на одной раме образует третий структурный уровень — моноблок. И, наконец, четвертым структурным уровнем являются аппаратные шкафы, в которых размещены три рамы, из них средняя неподвижная, а крайние откидываются в сторону на шарнирах. В единой серии ЭВМ используют унифицированные аппаратные шкафы большого и малого типов.

Специализированные ЭВМ часто komponуют в специальных шкафах с выдвигающимися моноблоками, развитыми по всей вы-

соте шкафа; эти моноблоки расположены в продольный ряд. Иногда отдельные секции закрепляют на центральной тумбе, относительно которой они поворачиваются поочередно, открывая доступ к расположенным в них блокам (рис. 4.5).

Примером компоновки нестационарной наземной РЭА могут служить электронно-измерительные приборы лабораторного типа (см. рис. 4.2). Такие приборы делают и переносными. Их лицевые

панели насыщены характерными для универсальной измерительной аппаратуры стрелочными, световыми и цифровыми индикаторами, рукоятками переключения и кнопочными устройствами.

Приборы переносного типа для полевых условий образуют группу, образец которой приведен на рис. 4.6. Переносимые приборы используются для двухсторонней связи, изыскательных, спасательных и аварийных работ. Условия эксплу-

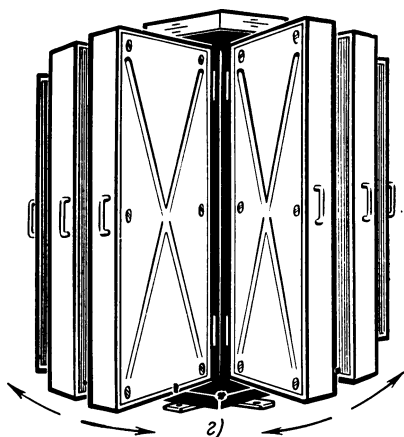
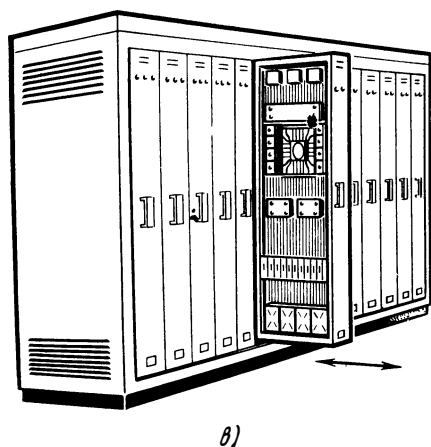
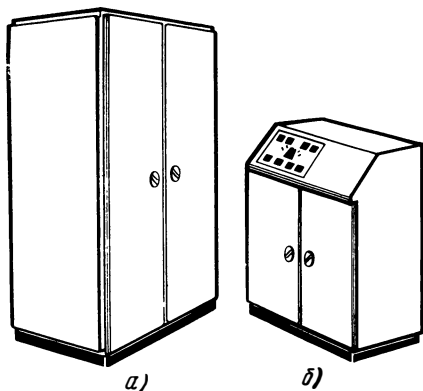


Рис. 4.5. Типовые конструкции стоек и шкафов стационарной РЭА

а — шкаф ЕС ЭВМ; б — шкаф программного управления; в — шкаф управления с выдвигающимися моноблоками; г — моноблоки, разворачиваемые на центральной стойке

атации аппаратуры этой группы предъявляют к ее конструкции требования компактности, малой массы, надежности при значительных перепадах температуры, защищенности от пыли, влаги, брызг дождя и механических повреждений. Переносимая полевая аппаратура обычно предназначена для обслуживания одним че-

ловеком, и ее масса не должна превышать 13—15 кг. Такие приборы снабжаются чехлами, рукоятками и заплечными ремнями.

Приборы, перевозимые автотранспортом в район базирования, могут состоять из большого количества блоков. Их конструкция должна допускать быструю разборку, укладку в специальные ящики, погрузку и сборку в стойку на месте базирования. Пример конструкции таких стоек приведен на рис. 4.7. Стойки состояются из трех-четырёх секций и с помощью кабельной коробки, установленной на верхней секции, присоединяются к кабельной сети системы. Жгуты межблочного электромонтажа укладываются снаружи и с помощью электрических соединителей соединяются с блоками. Секции унифицированы и могут быть использованы в различных вариантах.

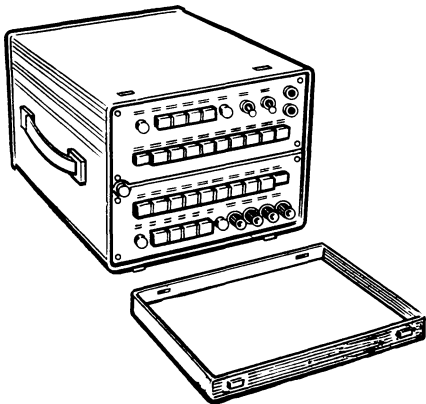


Рис. 4.6. Пример исполнения переносимой РЭА

Условия эксплуатации переносимой аппаратуры предъявляют к ее конструкции требования компактности, надежности при многократных сборках и разборках, защищенности от пыли, влаги и механических повреждений при транспортировках.

Радиоэлектронная аппаратура, возимая на автомашинах и предназначенная для постоянной эксплуатации ее в этих условиях,

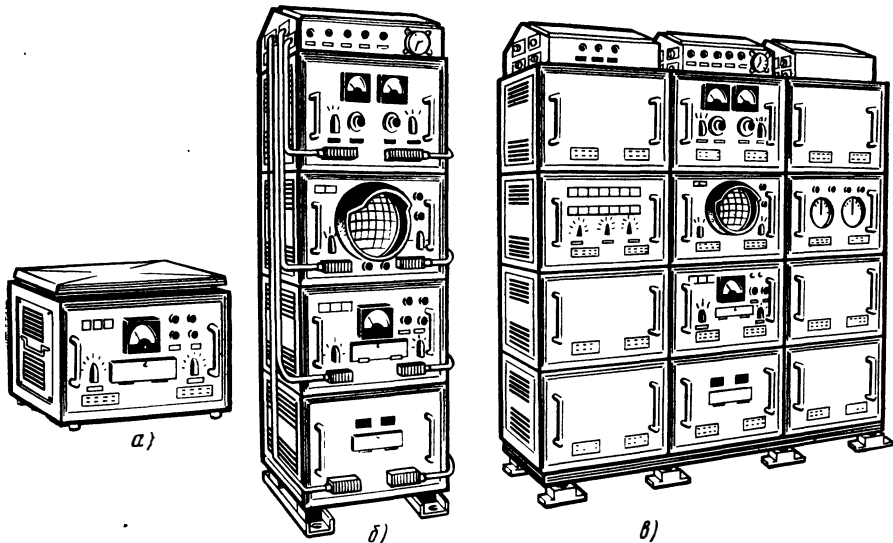


Рис. 4.7. Переносимая РЭА, собираемая из унифицированных секций
а — блок-секция; б — сборная стойка; в — устройство

разрабатывается с учетом всех специфических требований, обусловленных этим видом транспорта. Автомашины обычно оборудуют герметичными кузовами, вентилируемыми и отапливаемыми специальными системами. Аппаратура состоит из одноблочных и многоблочных приборов, собранных в небольших по высоте типовых стойках, которые устанавливаются на стеллажах или крепятся на амортизаторах к полу кузова. По своим функциям возимая РЭА весьма разнообразна.

Аппаратура на автомашинах подвержена динамическим перегрузкам неустановленного характера. Поэтому при разработке таких приборов особое внимание уделяют механической прочности конструкции, виброустойчивости ее элементов и жесткости крепления электрического монтажа, а приборы устанавливают на амортизаторах.

Объем кузова автомашины обычно ограничивает габаритные размеры и массу устанавливаемых в нем приборов, а отдаленность ремонтных баз заставляет хорошо укомплектовывать аппаратуру ремонтным инструментом и достаточным количеством запасных частей.

Самолетная (бортовая) аппаратура. Самолетная РЭА работает в сложных условиях эксплуатации. Широкий диапазон вибрации и значительные перегрузки выдвигают на первый план вопросы обеспечения механической прочности, жесткости и виброустойчивости. При этом обеспечение минимальных габаритных размеров и массы приборов высокой надежности является задачей первостепенной важности. Резкий перепад температуры окружающего воздуха, влажность на земле и пониженное давление на больших высотах увеличивают и без того жесткие требования к конструкции РЭА этого типа.

Аппаратуру, работающую при пониженном давлении, часто выполняют в герметичных оребренных корпусах, внутри которых можно создать повышенное давление (нейтральными газами), а с поверхности — эффективный теплообмен. Приборы в большинстве своем делают децентрализованными, легко съемными со специальных амортизационных рам. Их подключают к кабельной си-

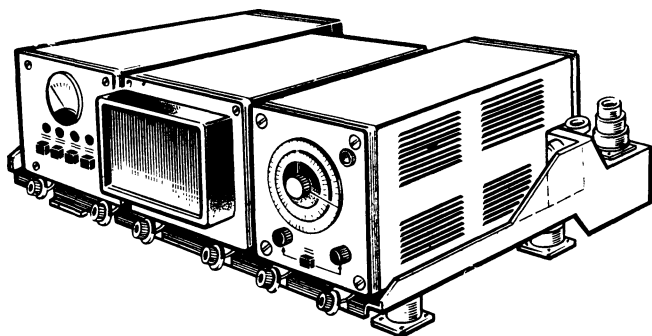


Рис. 4.8. Пример исполнения типовой РЭА самолетного типа, устанавливаемой на амортизированной раме

стеме с помощью электрических соединителей (рис. 4.8). Текущий ремонт их на месте выполнять неудобно, и производят его в мастерских.

Блоки самолетной РЭА часто компонуют в специальных контейнерах, которым придают форму отведенного на самолете места. Иногда контейнером служит специальный отсек, отведенный под аппаратную часть.

Корабельная РЭА. По функциональному назначению она делится на аппаратуру связи, радиолокации, гидролокации, штурманскую, автоматики управления, счетно-решающую и т. п. От

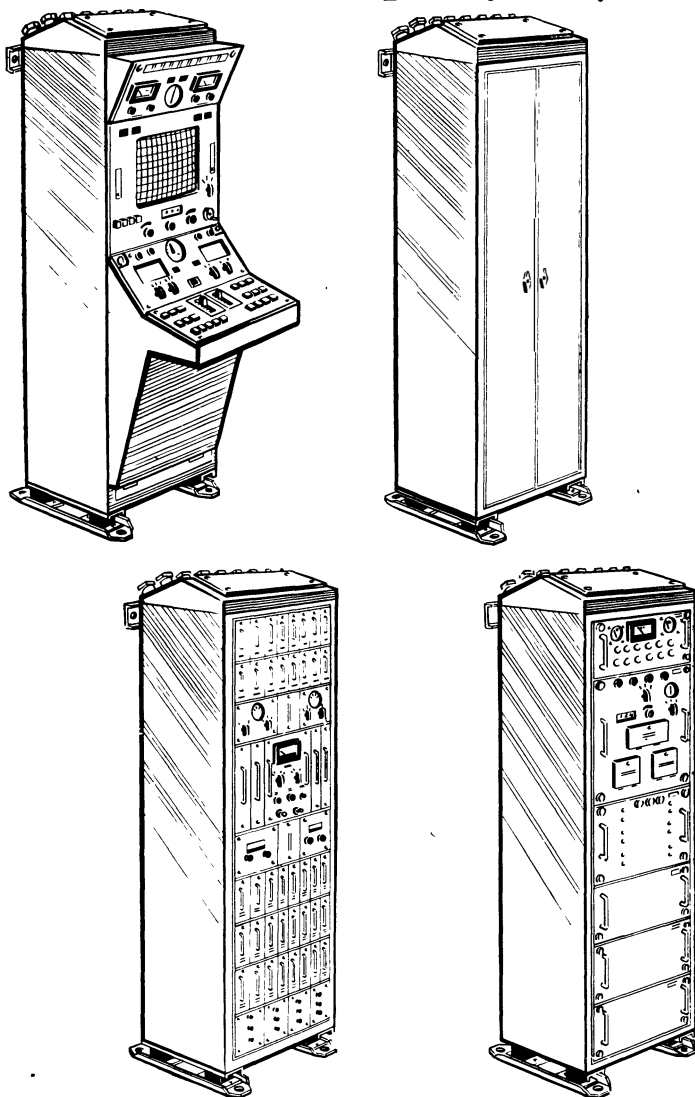


Рис. 4.9. Примеры исполнения типовых стоек корабельной РЭА

класса корабля и места установки на нем приборов зависят и эксплуатационные требования к морской аппаратуре.

Как известно, характер внешнего воздействия климатических факторов для этого рода аппаратуры изменяется в широких пределах. Изменение температуры воздуха, значительная влажность и насыщенность его морскими солями, вибрация и удары — все это заставляет конструктора морской аппаратуры обращать особое внимание на вибропрочность, ударостойкость и на водонепроницаемость разрабатываемых приборов. Конструирование такой аппаратуры производится с учетом требований обслуживания ее в условиях качки корабля, транспортировки ее через ограниченные по размерам стандартные люки, двери и трапы, а также монтажа приборов в тесных помещениях.

Типичная компоновка стационарных многоблочных приборов корабельной или береговой аппаратуры в унифицированных стойках показана на рис. 4.9. Здесь представлены все модификации стоечных приборов: блочная стойка, приборный шкаф, стойка с кассетами и пульт стоечного типа. Такие стойки компонуются блоками с лицевыми панелями, без лицевых панелей, блоками кассетного типа или выдвигаемыми из стойки моноблоками. Сверху стоек могут быть размещены кабельные коробки, позволяющие осуществлять подключение кабеля к прибору без вскрытия его.

В кабельных коробках размещают присоединительные и коммутационные планки, контрольные гнезда, сигнальные фонари и сальники или держатели для ввода кабеля. В приборах нестационарного типа вместо сальников используют герметичные электрические соединители.

Стойки устанавливают на амортизаторах, соединенных попарно крепежными планками. При этом четыре амортизатора помещают под основание, а два — в верхней части задней стенки стойки.

К одноблочным приборам, используемым на кораблях автономно или в системах, относятся контрольные приборы, выносимые в другие помещения и дублирующие показания основных в системе. Наиболее характерная компоновка таких приборов показана на рис. 4.10.

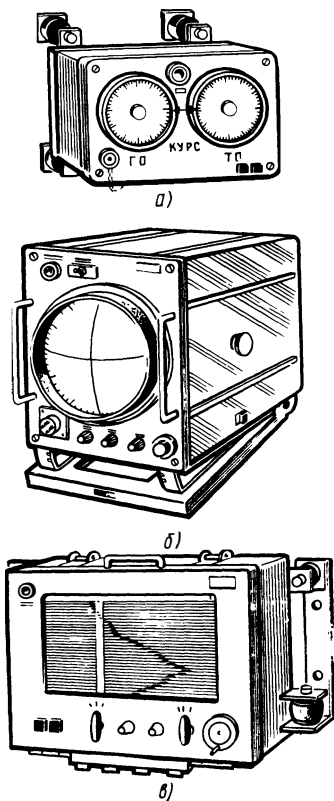


Рис. 4.10. Пример конструктивного исполнения выносных приборов

а — репитер курса; б — индикатор; в — самописец

4.5. КОМПОНОВКА ПРИБОРОВ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Функции и особенности конструкции приборов. Под приборами информации и управления следует понимать ту часть РЭА, которая находится в поле зрения оператора и несет на себе органы информации и управляющие устройства, необходимые для выполнения функций управления. По своим функциям и компоновке такие приборы делятся на панели информации, распределительные щиты питания и пульта управления (рис. 4.11).

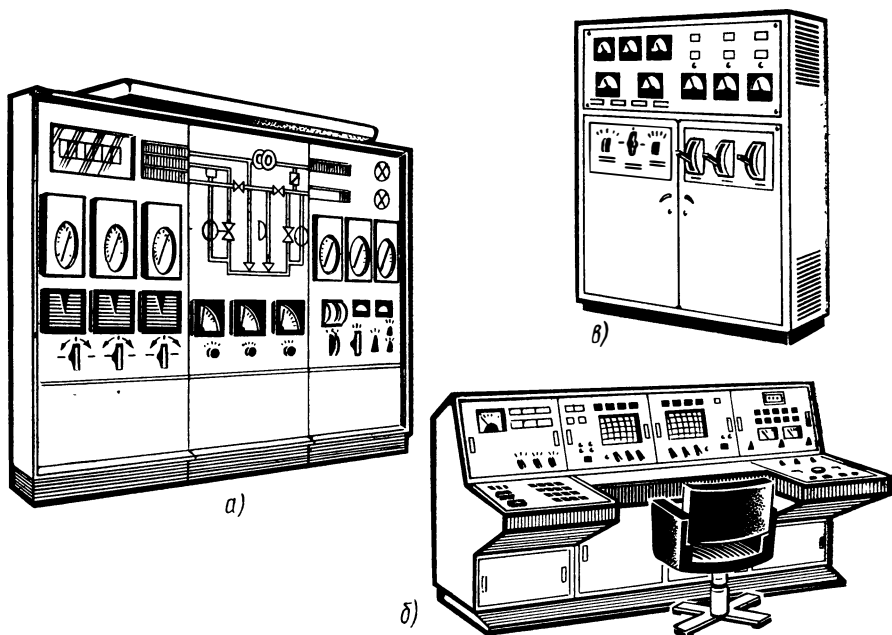


Рис. 4.11. Типовые устройства управления и информации
а — панель информации; б — пульт управления; в — щит питания

В задачу приборов управления входят: введение в действие всех составляющих системы РЭА; изменение программы действия или режимов работ; контроль за работой всех режимов и параметрами системы и поддержание их в норме; локализация аварийных случаев; получение необходимой информации и использование ее по назначению; определение обстановки, места и координат.

При разработке приборов информации и управления кроме общих технических требований необходимо учитывать и специальные психофизиологические требования, изложенные в гл. 3.

Форма пульта и его размеры должны обеспечивать оператору прямой обзор всех панелей и свободный контакт рук с установленными на панелях органами управления без нарушений его основных рабочих положений и без дополнительных затрат вре-

мени на лишние движения. Отличительной чертой пульта управления является его консольная часть, образующая наклонную панель, приближенную к оператору. В нижней части консоли создается углубление, где свободно размещаются ноги оператора. Внутри пультов устанавливают те блоки, которые функционально связаны с аппаратурой информации и управления.

Форма и размеры. На рис. 4.12 приведены типовые формы и основные размеры пультов. Высокие пульта обычно используются в помещениях с ограниченной площадью, например в рубке ко-

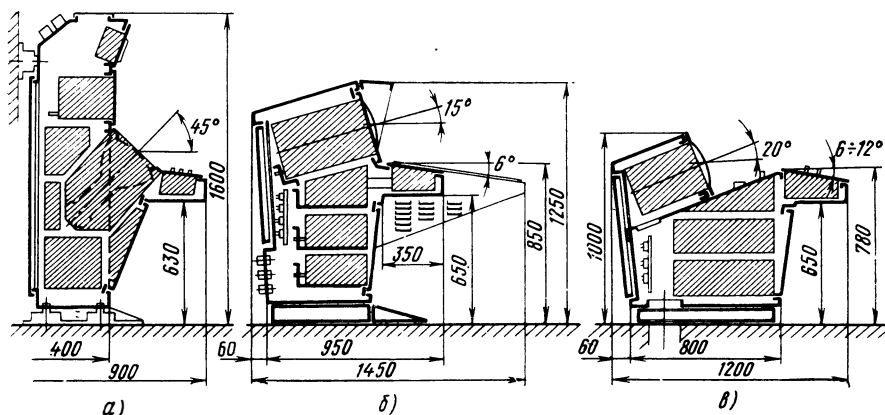


Рис. 4.12. Форма профиля пультов управления и основные размеры, мм
 а — с преобладанием информационных функций; б — с развитыми функциями управления;
 в — с функциями наблюдения за РЭА, расположенной за пультом

рябля. Низкие пульта предназначены для помещений, где непосредственно за пультом расположена аппаратура, требующая постоянного наблюдения. Пульта обычно собирают из вертикальных или горизонтальных секций, жестко соединяя их между собой.

Горизонтальная или несколько наклонная панель, выступающая на 400—600 мм у каждой секции, служит оператору рабочим столом, на котором также устанавливают и основные органы управления. На вертикальных панелях размещают приборы информации и элементы контроля. Лицевые панели откидываются, открывая доступ к блокам, монтажу и элементам информации и управления.

Ширина пульта обусловлена количеством одновременно работающих операторов, каждому из них должна быть обеспечена возможность удобно и быстро выполнять свои функции без помех со стороны соседа. Нормальное расстояние между осями соседних кресел находится в пределах 80—100 см. Максимальная ширина панелей, лежащих в одной плоскости и обслуживаемых одним оператором, должна быть не более 100 см для высокого и не более 150 см для низкого пульта.

Пульта, панели которых расположены перед оператором в одной плоскости, не освобождены от некоторых недостатков. При

последовательном обзоре всех участков плоскости расстояние от глаз оператора до рассматриваемого участка изменяется. При этом зрение должно все время приспособляться (аккомодироваться) для чтения каждого из участков, и скорость распознавания падает. Например, при переносе взгляда с плоскости, находящейся на расстоянии 70 см от глаз оператора, на плоскость, отстоящую от него на 100 см, время распознавания увеличивается на 15 % [25].

У панелей сферической формы этот недостаток отсутствует, так как расстояние от глаз оператора до плоскости панелей остается постоянным. Однако осуществление такой формы лицевых панелей пульта создает ничем не оправданную сложность. Поэтому вместо сферы в таком случае делают панель пульта из ряда вертикальных, наклоненных и горизонтальных участков, расположенных перед оператором полукругом. Размеры таких панелей могут быть выполнены согласно стандарту на щиты и пульты автоматизации ГОСТ 3244-68. На базе этого стандарта разрешено разрабатывать пульты с учетом обеспечения необходимой вибропрочности, ударостойкости, пыле- и брызгозащищенности.

В создании оператору наиболее удобного рабочего положения за пультом немалое значение имеют форма и размеры рабочего кресла. Оно должно иметь удобную спинку и подлокотники. Форма и размеры кресла должны позволять оператору в процессе его работы свободно отклоняться в левую и правую стороны, наклоняться вперед и откидываться назад. Кресло должно регулироваться по высоте в пределах 320—460 мм от пола. Сидение шириной 400 и глубиной 390 мм должно быть мягким и иметь прямоугольную или трапециевидную форму. Высота подлокотников от плоскости сидения должна быть около 230, высота спинки кресла 310—330 мм. Подлокотники и спинка должны иметь у основания сквозные отверстия. Базой для установки кресла служит передняя кромка консольной части пульта.

4.6. БЛОКИ И УЗЛЫ НА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ

РЭА первого поколения находит себе все меньшее применение, так как она имеет ряд недостатков, неизбежно вытекающих из условия применения электронных ламп и навесных схемных элементов (большие габаритные размеры, масса и потребляемая мощность). Однако принцип компоновки, разработанный на базе вакуумных ламп, подтвердил свою целесообразность для РЭА последующих поколений.

На рис. 4.13 показаны примеры типовых конструкций блоков, скомпонованных по функционально-блочному и функционально-узловому принципам. В первом случае все схемные элементы и электронные лампы размещены на металлическом шасси коробчатого типа 1; сверху — лампы пальчиковой серии, моточные изделия и установочные детали, а снизу шасси — навесные схемные элементы, соединительные детали и объемный электромонтаж

блока. Во втором случае на шасси в виде рамы 1 размещены функциональные узлы, образованные каскадами ламп. Узлы скомпонованы на своих шасси упрощенного типа 2 и с помощью электрических соединителей 3 подключены к блочному электромонтажу.

Функционально-узловой принцип компоновки в сравнении с функционально-блочным имеет ряд преимуществ. При выходе из строя какого-либо участка схемы надо сменить только тот узел, к которому этот участок относится, а не весь блок. Сменные узлы позволяют лучше организовать доступ (для контроля) к схемным элементам и равномерно использовать весь объем блока.

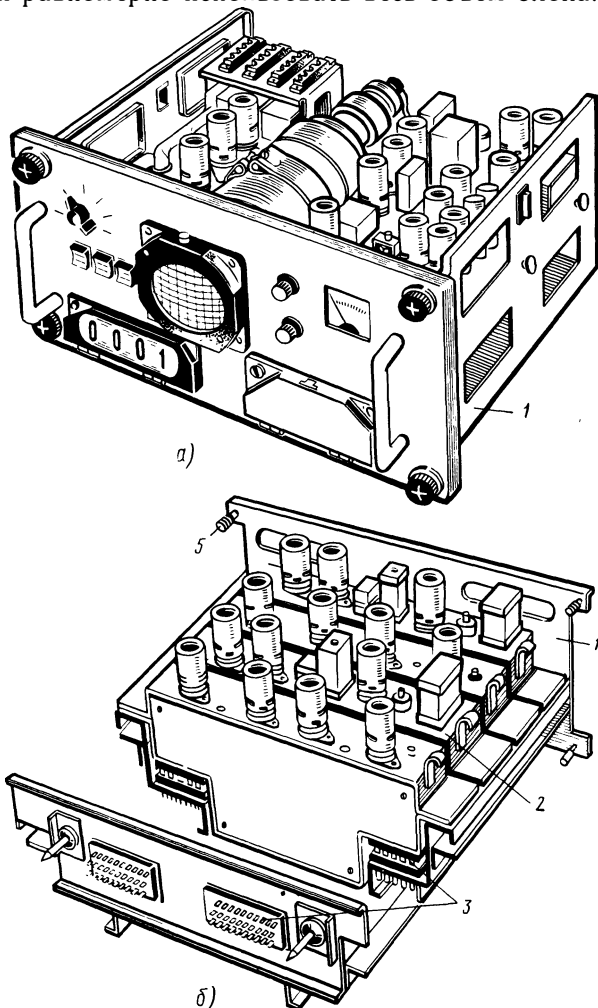


Рис. 4.13. Пример конструкции блоков первого поколения, собранных по функционально-блочному (а) и функционально-узловому (б) принципам

4.7. БЛОКИ И УЗЛЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Основной особенностью конструкции функциональных блоков и узлов на полупроводниковых приборах с использованием печатного монтажа является компоновка схемных элементов на плоскости изоляционной платы, с одной или двух сторон которой нанесен электромонтаж, выполненный в виде печатных проводников.

Форма и размеры плат обуславливаются эксплуатационными и конструкторско-технологическими требованиями. В РЭА большое распространение получила прямоугольная форма с размерами сторон, подчиненными размерному модулю, принятому в разрабатываемой системе. Толщина плат определяется размером наибольшей стороны из условия обеспечения достаточной жесткости ее на изгиб и принятого способа закрепления.

При изготовлении плат используют листовые материалы, такие как гетинакс, текстолит, стеклотекстолит в обычном виде или фольгированные. Широкое распространение получают также диэлектрики марок ФАФ-4, СВАН, НФД-180-1 и др. [42].

В узлах с печатным монтажом выводы схемных элементов, включая и полупроводниковые приборы, изгибают так, чтобы можно было осуществлять автоматизированную их установку на

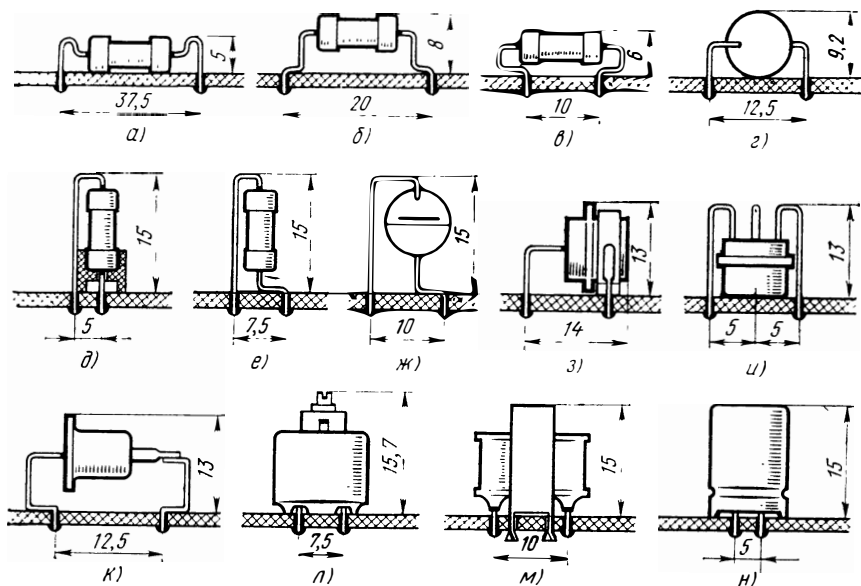


Рис. 4.14. Варианты установки схемных элементов на печатную плату и формовки их выводов

платах и пайку соединения с печатными проводниками без дополнительных опорных контактов. Форма изгиба выводов и установка схемных элементов на печатных платах показаны на рис. 4.14.

Форма изгиба учитывает минимальный установочный объем. Для элементов, у которых пайка коротких выводов не допускается, изгиб проводников выполняют, как показано на рис. 4.14,а. Широко используется также способ установки схемных элементов на плату с гарантированным зазором, позволяющим выполнять операцию покрытия лаками печатных плат с двухсторонним монтажом (рис. 4.14,б, в).

Более компактно размещаются элементы при их вертикальной установке на плате (рис. 4.14,д, е, ж). Вертикальный размер радиодеталей в этом случае не превышает максимальную высоту полупроводниковых приборов, устанавливаемых на печатной плате (рис. 4.14,з, и, к). Максимальная высота многополюсных и крупногабаритных схемных элементов, предназначенных для установки на платы с печатным монтажом, как видно из рис. 4.14,л, м, н, соизмерима с высотой остальных элементов, размещаемых на той же плате. Установка схемных элементов и нанесение на платах печатных проводников производятся по единой координатной сетке с шагом 2,5 или 1,25 мм.

Из существующих вариантов конструкций функциональных узлов с печатным монтажом наибольшее распространение получили узлы плоского типа (рис. 4.15). При установке таких узлов на промежуточные межзубовые печатные платы ориентация их производится с помощью технологических пазов, срезов или отверстий, наносимых на одну из кромок платы.

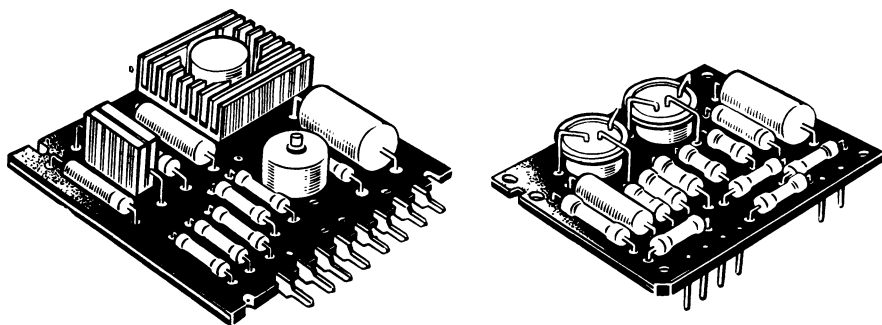


Рис. 4.15. Пример исполнения плоских узлов с печатным монтажом

Узлы с печатным монтажом компонуют и в виде объемных конструкций. В отличие от плоских объемные узлы состоят из двух плат, соединенных между собой стойками. Стойки часто используют и как монтажные переключки между верхней и нижней печатными платами со схемными элементами, установленными навстречу друг другу.

В блоках с печатным монтажом в большом количестве используют различные переходные и промежуточные модули пассивного типа. Они представляют собой стандартные схемы, собранные из дискретных резисторов и конденсаторов или нанесенные на

изоляционную подложку методом вакуумного напыления с последующей заливкой их эпоксидной массой. С целью увеличения вибростойкости и влагостойкости такие узлы устанавливают и в алюминиевые корпуса с последующей заливкой их пенопластом и компаундом.

При компоновке блоков по блочному или узловому принципам размещение схемных элементов или модулей стремятся выполнять

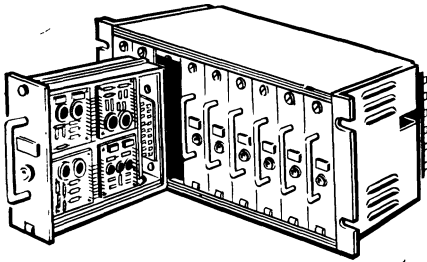


Рис. 4.16. Пример сборки блока из кассет унифицированного типа

по каскадам в порядке, предусмотренном электрической схемой. Это особенно важно для печатного монтажа. Вначале наносят элементы входных цепей как наиболее чувствительных к внешним воздействиям. Это обычно конденсаторы малой емкости, катушки малой индуктивности и т. п. Далее производят размещение анодных цепей, цепей питания и, наконец, заземления. Таким образом, цепи, чувствительные к внешним полям, оказываются наиболее короткими, в то время

как некоторое увеличение других цепей будет уже меньше сказываться на возникновении паразитных связей.

Кассеты с печатными платами обычно имеют унифицированные размеры, кратко изменяющиеся по ширине и одинаковые по высоте и глубине. При установке кассет в приборы положение их относительно гнезд электрических соединителей фиксируется двумя направляющими штырями на задней плоскости каждой кассеты рядом с вилками соединителей (рис. 4.16).

4.8. БЛОКИ И УЗЛЫ В МИКРОМОДУЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Из имеющихся вариантов микромодулей наибольшее распространение получили микромодули этажерочного и плоского типов.

Микромодули этажерочного типа собирают из миниатюрных схемных элементов, полупроводниковых приборов и монтажных перемычек, размещаемых на одинаковых по форме изоляционных подложках (рис. 4.17). Подложки соединяют между собой в этажерки соединительными проводниками 1, которые используются для механического крепления подложек между собой и крепления микромодуля к печатной плате. Подложки 2 изготавливают из керамического материала толщиной от 0,3 до 1,0 мм. Герметизация микромодулей производится заливкой компаундом, экранирование — установкой в алюминиевую оболочку с последующей заливкой компаундом.

Функциональные узлы и блоки на базе микромодулей компонуют на печатных платах совместно с промежуточными элемен-

тами. Взаимное расположение их на печатной плате производится с учетом обеспечения равномерного теплового поля. При этом микромодули с повышенным тепловым излучением по мере возможности устанавливаются с краю. Общая мощность теплового рассеяния микромодулей этажерочного типа не превышает 1—2 Вт при температуре окружающей среды не выше 358 К. На рис. 4.18 показаны примеры компоновки блока и узла на базе микромодулей.

Плоские микромодули собираются на двухсторонних печатных платах толщиной 0,8 мм. На одной стороне печатной платы монтируются корпусированные полупроводниковые приборы и печатные схемные элементы, на другой — миниатюрные навесные элементы и выводы. Эти микромодули помещают в алюминиевые экраны и герметизируют пенообразующими пластмассами с последующей заливкой тонким слоем компаунда. Конструкция плоского микромодуля показана на рис. 4.19. При компоновке узлов и блоков эти микромодули, так же как и этажерочного типа, устанавливаются на печатных платах совместно с промежуточными схемными элементами.

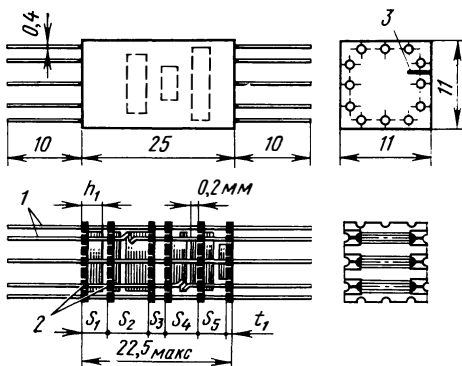


Рис. 4.17. Общий вид микромодуля этажерочного типа

Внизу показана сборка плат с микроэлементами и микроплата (размеры в миллиметрах)

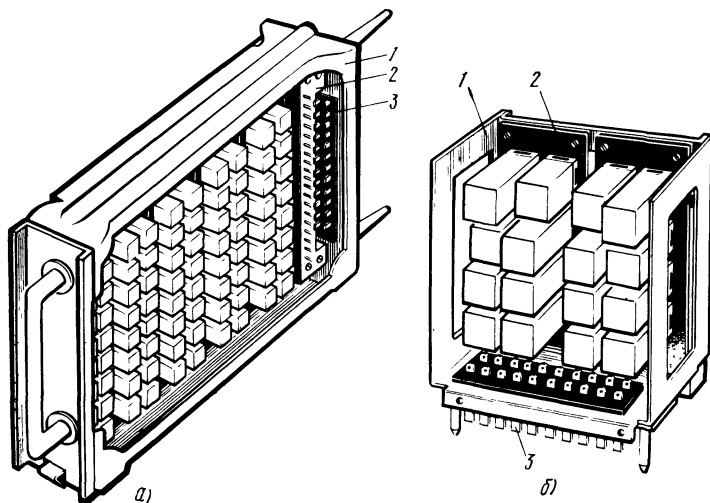


Рис. 4.18. Пример компоновки узлов с микромодулями

a — в кассетном исполнении; *б* — узел со снятым кожухом
1 — шасси; 2 — печатная плата; 3 — штепсельный разъем

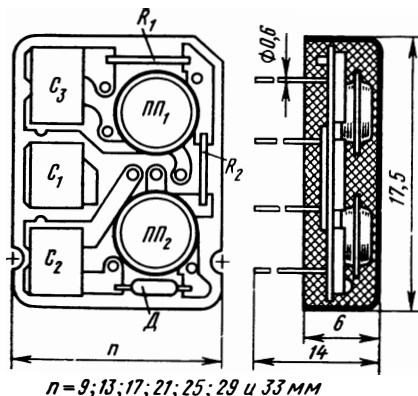


Рис. 4.19. Конструктивное исполнение плоского микро модуля
 $n=9; 13; 17; 21; 25; 29$ и 33 мм (размеры в миллиметрах)

Плоские микро модули по своей форме и исполнению печатного монтажа содержат в себе большие возможности для дальнейшей микроминиатюризации и интеграции модульных схем.

4.9. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Общие сведения об интегральных микросхемах. При компоновке узлов и блоков микроэлектронной аппаратуры на базе пленочных и полупроводниковых интегральных микросхем совершенно по-новому решается вопрос о нулевом структурном уровне РЭА. Микросхемы служат наименьшей конструктивной составляющей и используются наравне с дискретными схемными элементами. Микросхемы называют интегральными, так как они, имея высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов, конструктивно представляют собой единое целое по размерам, сопоставимое с дискретными элементами. Микросхемы, собранные в одном корпусе из отдельных элементов или кристаллов, называют гибридными интегральными микросхемами.

Микроэлектронная аппаратура строится на базе типовых ИМ широкого применения. Они поставляются разработчику РЭА специализированными предприятиями в виде готовых изделий со своими ТУ.

Все ИМ можно разбить на логические (цифровые) и аналоговые (линейно-импульсные). Первые характеризуются временем срабатывания, потребляемой мощностью, значением напряжения помех и уровнем входных напряжений, вторые — коэффициентом передачи или усиления, входным и выходным сопротивлением, полосой частот и т. п.

По технологическому принципу ИМ делятся на толстопленочные, тонкопленочные и полупроводниковые микросхемы, по конструктивному исполнению — на бескорпусные и корпусированные.

Микросхемы широкого применения разбиваются на классы, группы, серии. Класс отражает функцию микросхемы (усилители, детекторы, генераторы, модуляторы, триггеры и т. д.), группа характеризует микросхемы по роду тока (постоянного или переменного), виду запуска и т. д. Серия объединяет ИМ по принципу изготовления, способу монтажа и т. д.

Дальнейшее снижение объема аппаратуры, повышение ее быстродействия стали возможными при переходе от интеграции от-

дельных схем к интеграции устройств, так как благодаря значительной надежности ИМ конструирование РЭА с высокой степенью интеграции становится экономически целесообразным.

Различают пять степеней интеграции ИМ:

Степень интеграции	Количество элементов и компонентов
1	До 10
2	От 10 до 100
3	От 100 до 1000
4	От 1000 до 10000
5	От 10000 до 100000

Толстопленочные микросхемы. К ним относят микросхемы с толщиной пленок свыше 10^{-6} м. Пленочные пассивные элементы, нанесенные на подложку и, дискретные активные и пассивные элементы (диоды, транзисторы, кристаллы, миниатюрные конденсаторы емкостью более $0,02 \text{ мкф/см}^2$) образуют гибридную интегральную микросхему (ГИМ).

Толстые пленки изготавливают методом шелкографии. Этот метод предусматривает нанесение на диэлектрическую подложку проводящих резистивных и диэлектрических паст продавливанием их через сетчатый фототрафарет. Для сетчатых трафаретов используют шелковую основу или мелкую металлическую сетку.

Конструкция толстопленочной ГИМ приведена на рис. 4.20. На керамической подложке с одной стороны расположены пассивные и активные элементы, печатные проводники с контактными площадками, с другой — выводы. Микросхема прикрыта защитным колпачком и герметизирована компаундом. Подложки толстопленочных микросхем изготавливают из стекла, ситалла или керамики толщиной 1,6; 0,6; 0,2 мм.

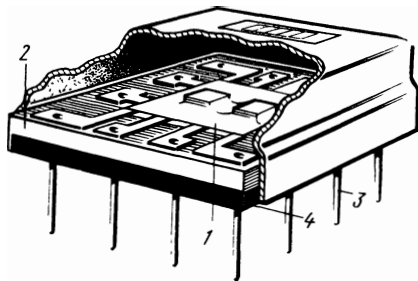


Рис. 4.20. Общий вид толстопленочной микросхемы в экранном кожухе

Для получения фототрафаретов с конфигурацией, обеспечивающей воспроизведение необходимых участков микросхемы, на шелковую основу наносится слой светочувствительной эмульсии. После экспозиции рисунка схемы светочувствительный слой проявляется, а свободные участки, не заполненные схемой, дубятся.

Паста для проводящих пленок изготавливается на основе порошков серебра и золота, для резистивных пленок — на основе смеси порошков серебра и палладия, а для диэлектрических пленок используется порошковая керамика. В состав паст входит также мелкодисперсионный порошок стекла. После операции вжигания пасты стекло обеспечивает необходимое сцепление частиц основного материала между собой и их адгезию к подложке.

Толстопленочные микросхемы просты в изготовлении и имеют хорошие эксплуатационные характеристики. Они проще и дешевле тонкопленочных и при изготовлении не требуют сложного оборудования. Основным недостатком таких микросхем является трудность получения конденсаторов большой емкости и наличие увеличенного удельного сопротивления проводящих элементов. Кроме того, метод шелкографии не обеспечивает необходимой точности параметров резисторов при воспроизведении их геометрии, и поэтому требуется дополнительная подгонка их ручным способом.

Тонкопленочные микросхемы. К ним относят микросхемы с толщиной пленок до 10^{-6} м. Они проще по конструкции, технология их изготовления сложнее, чем технология толстопленочных ИМ. Схемные элементы тонкопленочных микросхем наносят на изоляционные подложки тонкими пленками проводящего,

полупроводящего и непроводящего материала толщиной от $0,1 \cdot 10^{-4}$ до $0,1 \cdot 10^{-6}$. Материал и толщина изоляционных подложек такие же, как и у толсто пленочных микросхем.

Тонкопленочные многослойные покрытия микросхем наносят поочередно с помощью фигурных трафаретов вакуумным напылением материалов (хром, алюминий, серебро, окись кремния, тантал, титан и др.). Этим способом образуют все пассивные элементы, контактные площадки и соединительные проводники. Активные элементы монтируют на подложках, как навесные.

Тонкопленочная технология открывает широкую возможность получения микросхем различной сложности, отличающихся порядком следования слоев, их толщиной, формой, размерами подложек, удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью.

Последовательность изготовления тонкопленочной микросхемы из десяти слоев показана на рис. 4.21. Вначале на подложку (I) через трафарет напыляют резистивный слой (II), который образует резистор R_2 . Далее наносят слой первых электродов конденсаторов (III) C_2 и перемычки, после чего — общий изоляционный слой (IV), резистивный слой резисторов R_3 и R_4 (V), конденсаторные электроды для C_1 и C_2 , перемычки и контактные площадки (VI), изоляционный (VII) и резистивный для R_1 (VIII) слои, второй электрод C_1 (IX) и перемычки. Последний слой общий изоляционный (X). Окончательная операция — монтаж транзисторов. Герметизация микросхемы производится заливкой смолами или установкой ее в герметичный корпус.

Полупроводниковые микросхемы.

Их изготавливают введением в заранее определенные места полупроводниковой пластины некоторых примесей, изменяющих структуру материала в результате сплавления, диффузии, окисления, осаждения и других операций.

Транзисторы, диоды, резисторы и конденсаторы в полупроводниковых микросхемах располагаются в объеме пластины, имеют объемное, четко не разграниченное между собой строение, представленное структурой, приведенной в табл. 4.1.

Резисторы образуют области однородного полупроводника p - или n -типа между двумя омическими

контактами. Имеются также резисторы диффузного типа, сопротивление которых зависит от размеров и удельного сопротивления материала резистивного слоя, нанесенного диффузным способом. В них p - n переход является барьером, ограничивающим область резистивного слоя.

В качестве конденсаторов используют емкости обратно смещенных p - n переходов или непосредственно на поверхность полупроводника (первый электрод) наносят слой диэлектрика (двуокиси кремния) и проводящую пленку (второй электрод).

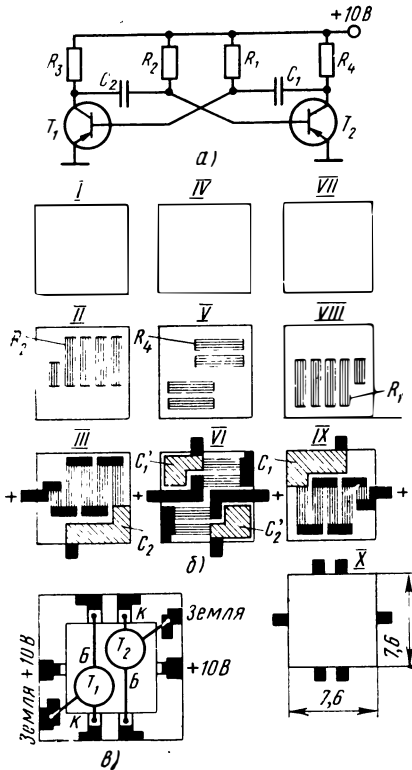


Рис. 4.21. Последовательность изготовления многослойных тонкопленочных микросхем

а — схема электрическая принципиальная; б — операции изготовления; в — микросхема; I—X — последовательность нанесения слоев

Таблица 4.1. Изображение структуры основных элементов в твердых схемах

Наименование элемента	Эквивалентная схема	Мезаструктура	Планарная структура
1. Резистор постоянный			
2. Резистор переменный			
3. Конденсатор постоянный			
4. Конденсатор с переменным смещением			
5. RC-цепь с распределенными постоянными			
6. Транзистор			
7. Диод			

Транзисторы образуют двумя $p-n$ переходами. В зависимости от геометрии образования различают мезатранзисторы, планарные и планарно-эпитаксиальные транзисторы. Диоды создают $p-n$ переходом между диффузным слоем и полупроводниковым основанием.

Выводы и внутренние соединения наносят на поверхность основания напылением пленки алюминия. Напыление производят через окна, заранее образованные в слое окиси кремния. Присоединение выводов осуществляют методом термокомпрессии и др.

При изготовлении полупроводниковой микросхемы основной задачей является образование в соответствии с эквивалентной схемой в массе полупроводниковой заготовки $p-n$ переходов. При этом используют методы сплавления, диффузии, эпитаксиального наращивания [23]. Последний метод имеет некоторое преимущество, так как позволяет получать большое число $p-n$ переходов, в то время как сплавным методом можно получить лишь два перехода, а диффузным — максимум четыре. Локальные области создаются методом фотолитографии.

Основным технологическим приемом изготовления твердых микросхем считают планарный метод (сохранение плоскости). Такой метод дает возможность в качестве полупроводниковой основы использовать полупроводниковые пластины, удобные с точки зрения автоматизации производства.

На рис. 4.22,б представлена компоновка полупроводниковой микросхемы по схеме генератора с фазовым сдвигом (рис. 4.22,а).

Конструкция корпусированных микросхем. Микросхемы, размещаемые в приборах, не защищенных от вредного влияния климатических и механических воздействий, герметизируют. Для этого их помещают в специальные механические прочные корпуса влагозащищенного, герметичного или вакуум-плотного

исполнения. Иногда их заливают компаундами. Корпуса микросхем имеют унифицированные габаритные и присоединительные размеры в соответствии с ГОСТ 17467-79, и каждый тип их представляет собой определенный конструктивный модуль. Примеры исполнения микросхем в типовых корпусах и установки их на печатных платах показаны на рис. 4.23.

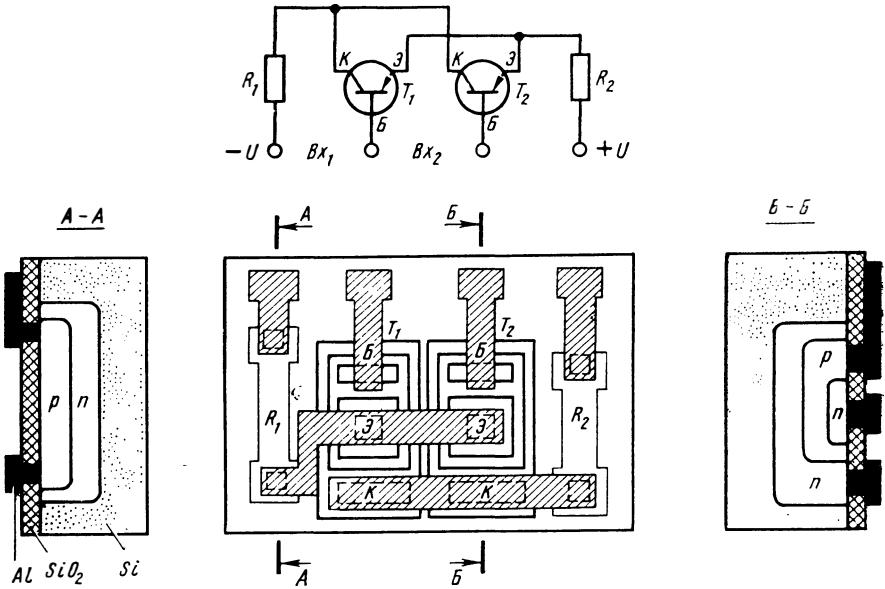


Рис. 4.22. Пример образования структур полупроводниковой микросхемы (вверху показана ее эквивалентная схема)

Si — кремниевая подложка; n, p — диффузионные слои; Al — проводники и присоединительные контакты; SiO_2 — изоляция

В зависимости от эксплуатационных требований и условий производства различают корпуса металлостеклянные, металлокерамические, металлополимерные, керамические клеевые, стеклянные, пластмассовые. Корпуса делают квадратными, прямоугольными или круглыми. Интегральные микросхемы 1-й степени интеграции размещают в корпусах с 14 выводами, микросхемы 2-й и 3-й степеней интеграции — в корпусах с 50 выводами. Присоединительные проводники их выведены в плоскости корпуса или направлены вниз. Шаг выводов равен 2,5 и 1,25 мм, что соответствует размерам координатной сетки, принятой для исполнения однослойных и многослойных печатных плат. При установке ИМ на печатные платы изгиб выводов делают на расстоянии свыше 2 мм от корпуса и 2,5 мм до места пайки.

4.10. УЗЛЫ И БЛОКИ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Принцип компоновки. При разработке структурных уровней конструкции МЭА — микроячеек, узлов и блоков, плотность размещения микросхем зависит от размеров монтажного поля, метода компоновки и степени интеграции. Широко используют следующие способы компоновки:

1. Микросхемы монтируют на печатной плате, установленной в металлическую рамку, создавая таким образом первичную ячее-

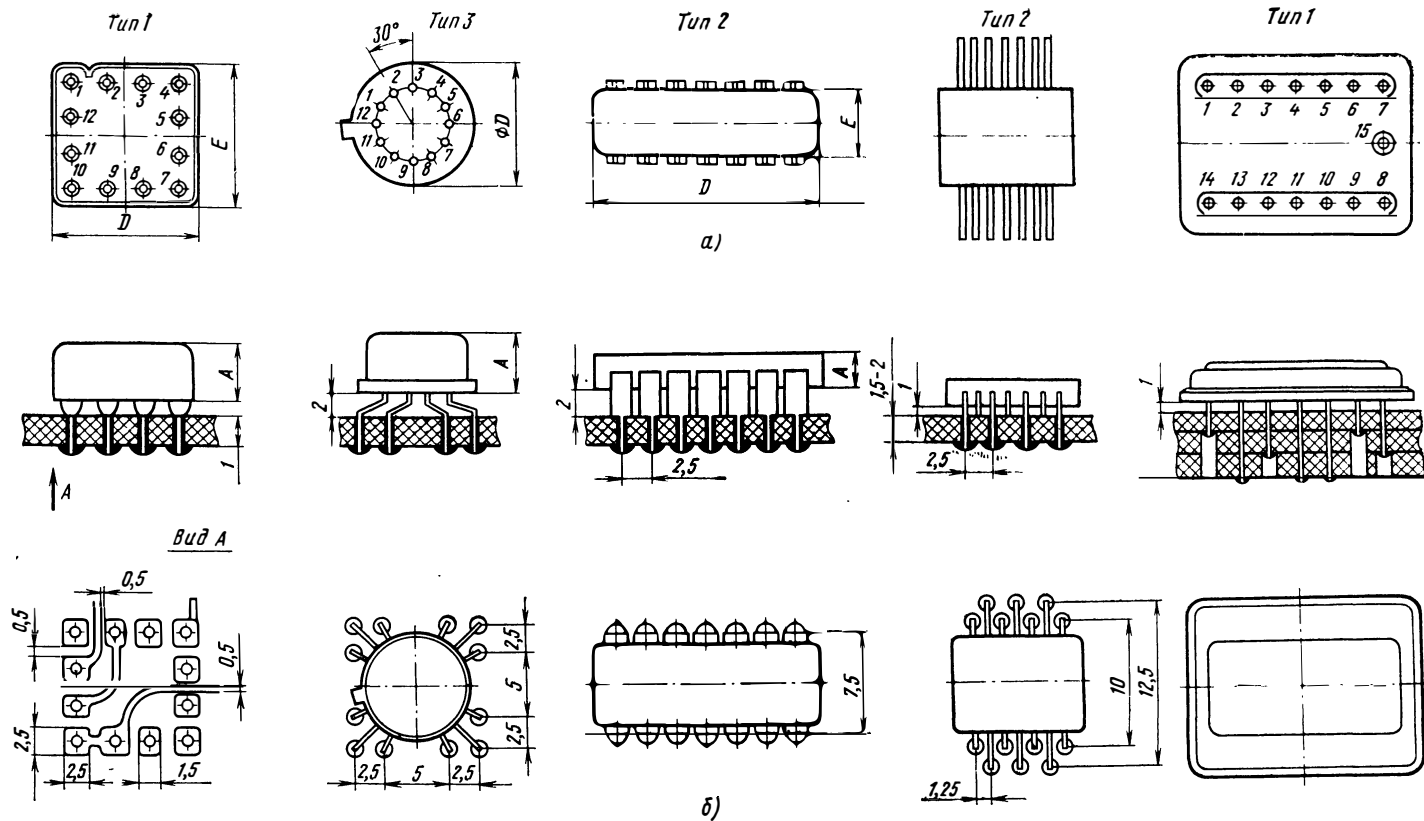


Рис. 4.23. Микросхемы в типовых корпусах (а) и примеры установки их на печатных платах (б)
 Размеры в миллиметрах

ку. Ячейки, собранные в галеты или кассеты по функциональным признакам, образуют узлы. Размещая узлы в отдельных защитных корпусах или на шасси, из них создают блоки, которые комплектуются в общую приборную стойку.

2. Ячейку создают, монтируя БИМ на печатных платах вместе с навесными пассивными схемными элементами, и корпусируют БГИМ.

3. Компоновку ячеек производят с использованием бескорпусных БГИМ, монтируя их на печатной плате с последующей установкой в общий герметичный корпус.

4. БГИМ или БИМ komponуют на общей подложке, соединяя их между собой перемычками непосредственно без печатной платы.

Основной сборочной единицей низшего уровня в МЭА становится функциональная ячейка, ниже которой неисправность уже не контролируется. При выходе из строя хотя бы одной микросхемы ячейка заменяется годной, а вышедшая из строя направляется в ремонт.

Установка ИМ на печатных платах производится по линейно-многорядному принципу с учетом размещения промежуточных навесных элементов. Корпусированные ИМ, устанавливаемые на печатных платах, закрепляются пайкой их выводов в монтажных отверстиях. Гибкие выводы бескорпусных ИМ подпаиваются к печатной плате с помощью контактных штырей или контактных площадок, образованных печатным монтажом. При монтаже бескорпусных ИМ на пассивных подложках выводы микросхем перепайваются непосредственно между ними, а крепление к подложке осуществляется клеем ВК-9 или демпфирующим компаундом.

Конструктивное исполнение узлов и блоков МЭА. Микроячейки komponуют микросхемами преимущественно в плоскую форму. Такая форма позволяет сравнительно легко собирать узлы и блоки в виде «пачки», «пенала», «книжных листов» и т. д. Основной несущей конструкцией в этом случае являются печатные платы. Примеры компоновки узлов с корпусированными ИМ и присоединения к межблочному монтажу электрическими соединителями типа ГРПМ-1 приведены на рис. 4.24.

Корпусирование микросхем связано с дополнительными потерями объема, возрастанием числа соединительных элементов, коммутирующих плат, опорных контактов и требует увеличения слоев в печатных платах. Поэтому использование бескорпусных ИМ (рис. 4.24, в) является весьма перспективной мерой дальнейшего снижения объемов МЭА.

Узлы, предназначенные для эксплуатации в жестких условиях, komponуют также в рамках для двухстороннего или одностороннего расположения бескорпусных микросборок, печатной платы и необходимых подвесных элементов (рис. 4.25). Рамка с двух сторон прикрывается крышкой и герметизируется по всему периметру соединения.

Бескорпусные микроячейки собирают на ситалловых подложках с размерами 20×15, 24×20, 30×16, 30×24, 36×24, 48×15,

48×20, 48×30, 60×16, 60×24, 60×48 мм и крепят на печатных платах или непосредственно на перегородке рамы с помощью демпфирующего компаунда. По внешнему контуру подложек рас-

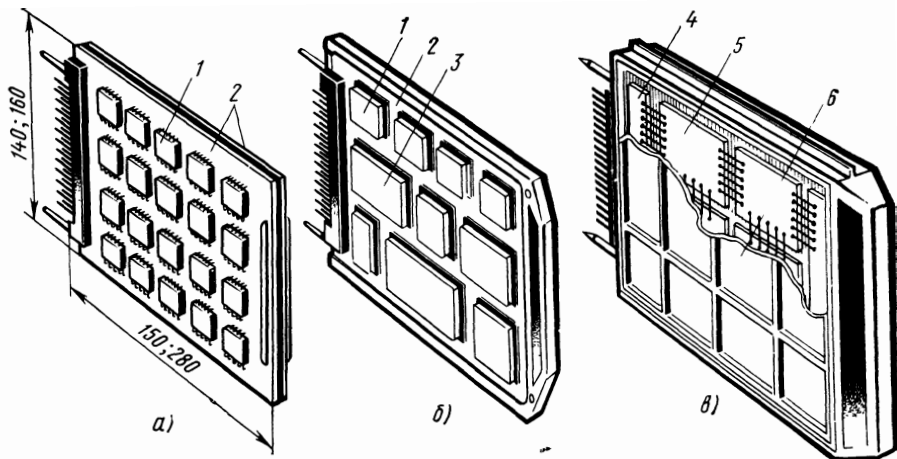


Рис. 4.24. Узлы МЭА в кассетном исполнении

a — ИМ с боковыми выводами; *б* — ИМ с нижними выводами; *в* — герметичный узел с бескорпусными ИМ высокой степени интеграции
 1 — микросхема 1-й степени интеграции; 2 — печатная плата; 3 — микросхема 2-й степени интеграции; 4 — коммутационная печатная плата; 5 — гибридная ИМ высокой степени интеграции; 6 — герметичная крышка

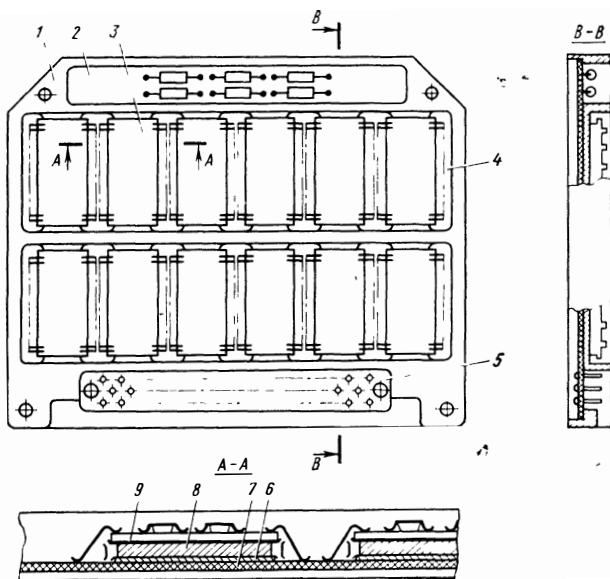


Рис. 4.25. Пример компоновки микроячеек с гибридными ИМ высокой степени интеграции

1 — рамка; 2 — зона навесных элементов; 3 — гибридная ИМ; 4 — коммутационная плата; 5 — выводные контакты; 6 — прокладка; 7 — печатная плата; 8 — планка; 9 — клей

полагают контактные площадки. Электрическое соединение их с печатной платой или с другими подложками производится с помощью медных золоченых перемычек из проволоки диаметром 0,05 мм или полосок сечением $0,3 \times 0,02$ мм.

Пример компоновки усилителя с бескорпусными БГИМ показан на рис. 4.26. Здесь микроячейки расположены в рамке в порядке прохождения сигнала. Для повышения помехоустойчивости входы и выходы сигналов разнесены на противоположные стороны шасси, а каскады экранированы тонкими металлическими пластинками. Подвесные схемные элементы установлены на общей печатной плате. Узел с микроячейками вставлен в вакуумплотный кожух, и место соединения его с шасси герметизировано вайкой по всему периметру. Внешнее электрическое соединение микроузла осуществляется с помощью герметичных проходных контактов (проходников) и разъемных электрических соединителей.

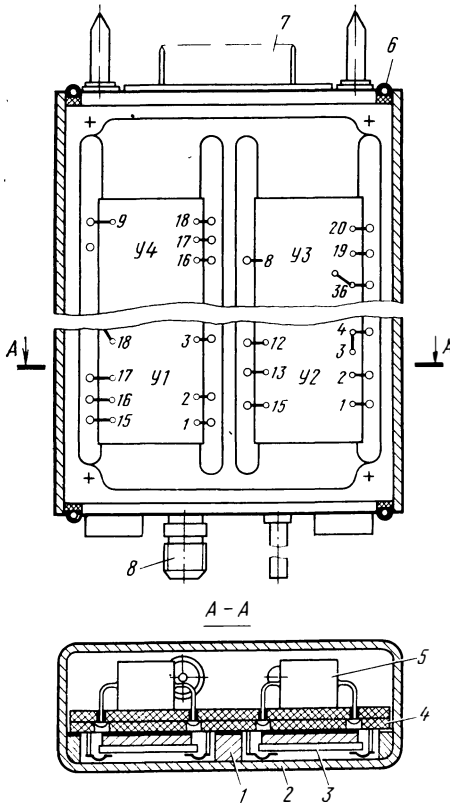


Рис. 4.26. Пример компоновки усилителя с бескорпусными гибридными ИМ
1 — рамка; 2 — кожух; 3 — гибридная ИМ; 4 — печатная плата; 5 — промежуточные элементы; 6 — герметичное соединение; 7 — гермопроходник; 8 — электрический соединитель

Другой типовой способ компоновки узлов МЭА с бескорпусными ГИМ показан на рис. 4.27 в виде четырех структурных уровней. Здесь представлен комплекс универсальных типовых конструкций (УТК), используемых при разработке МЭА, предназначенной для работы в жестких условиях эксплуатации на подвижных объектах. Этот комплекс выполнен на базе гибридно-пленочной технологии с использованием корпусированных или бескорпусных БГИМ и печатных плат с однослойным и многослойным печатным монтажом.

Первый структурный уровень представляет собой микроэлектронная ячейка БГИМ.

Она состоит из пассивных схемных элементов, нанесенных на синталловую подложку фотолитографическим способом с последующей ее изоляцией слоем лака и дискретных активных и пассивных элементов или отдельных ИМ. В одной микроячейке УТК может быть установлено до 57 микросхем 1-й степени интеграции.

Вторым структурным уровнем этого комплекса является микроузел, выполненный в форме «галеты». Он состоит из многослойной печатной платы 2, двух экранов 4, прокладок 3 и рамки 1 с монтажными колодками. На печатной плате (в зависимости от ее стандартных размеров) могут быть смонтированы до 16 БГИМ.

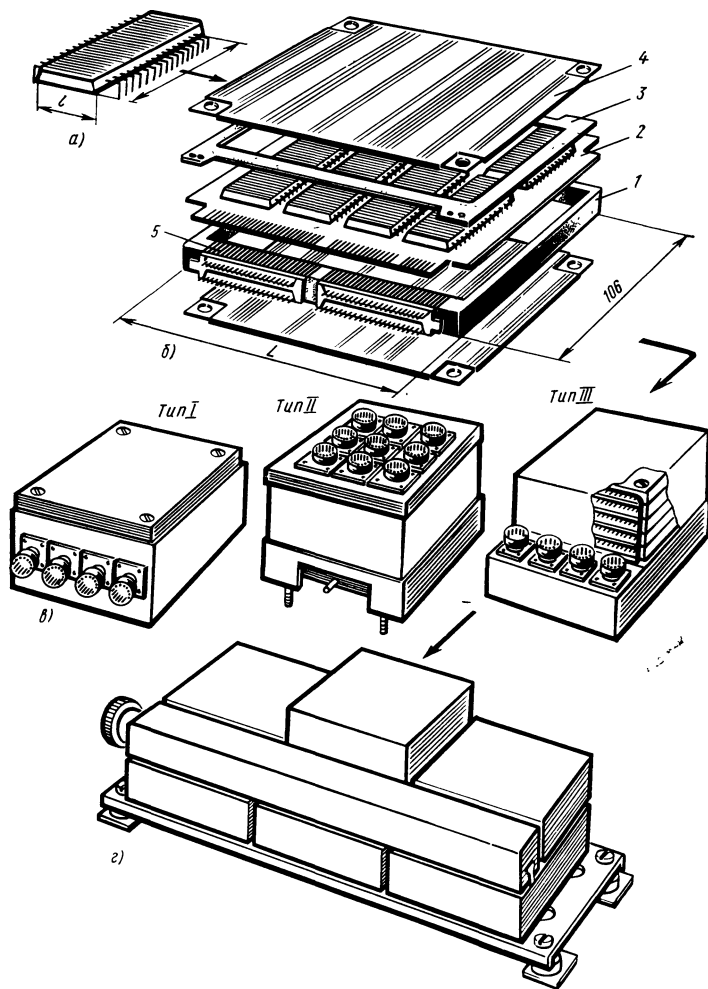


Рис. 4.27. Структурные уровни комплекса УТК МЭА

a — ячейка; *б* — узел; *в* — блок; *г* — устройство; *l* — 12, 16, 24 см; *L* — 69, 99, 124, 154 см

Печатная плата, накрытая через прокладки экранами, устанавливается в рамку из алюминиевого сплава. При сборке применяется клей ВК-9.

Третьим структурным уровнем является блок. В вакуум-герметичном корпусе блока размещают от 2 до 8 микроузлов, собранных в один пакет. Электромонтаж блока осуществляется про-

водом марки ФД-100 сечением 0,03 мм² (0,07 мм² для цепей питания). Для таких блоков используют корпуса трех типов: малый — тип I; средний — тип II; универсальный — тип III. В их конструкцию входит основание из алюминиевого сплава АЛ-2 и кожух, штампованный из тонколистового алюминиевого сплава. В корпусе типа II образована крышка из сплава АЛ-2. На основании или на крышке (тип II) установлены соединители типа МР-1. Герметизация соединений корпуса с кожухом осуществляется пайкой низкотемпературными припоями или заливкой мест стыковки мастикой типа ВГО-1 и др. Внутреннюю полость узла заполняют инертным газом.

Блок, собранный по функциональному признаку на общей амортизированной раме, представляет собой малогабаритное устройство (агрегатированного типа) четвертого структурного уровня. Оно имеет свою кабельную коробку, в которой осуществляются межузловая коммутация и присоединение жил внешнего кабеля.

Использование микросхем непременно ставит перед конструктором задачу комплексной микроминиатюризации создаваемой системы. Поэтому при разработке РЭА с целью сохранения в ней преимуществ, заложенных в микросхемах, все звенья ее конструкции, включая и входящие системы питания, теплоотвода, виброизоляции, необходимо увязывать (соизмерять) с принятыми базовыми элементами — микросхемами.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНТАЖ И ЭЛЕМЕНТЫ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

5.1. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОНТАЖА

Конструкция электрического монтажа во многом определяется элементной базой, диапазоном частот, структурным уровнем сборки и условиями эксплуатации. В РЭА используют два способа электромонтажа: объемный (жгуты, провода, кабель) и плоский (печатный монтаж). Широкая унификация схемных элементов и электромонтажных изделий, используемых в РЭА, способствует созданию типовых конструкций электромонтажных узлов, обеспечивающих высокий уровень стандартизации и единообразия технологического процесса изготовления.

Тщательно продуманный электромонтаж обладает высокой надежностью и электромагнитной совместимостью, обеспечивает устойчивость работы аппаратуры и способствует быстрому обнаружению неисправностей и их устранению. Сложность связей и длина цепей узлового, блочного или межблочного электромонтажа в значительной степени зависят от компоновки элементов и узлов РЭА. Поэтому разработка конструктивной топологии электромонтажа должна проводиться с помощью машинного метода (§ 2.3 и 2.4), способствующего поиску наиболее оптимальных вариантов.

Основными конструктивными элементами электромонтажа являются:

- а) элементы экранирования и заземления;
- б) провода, кабели и монтажные материалы;
- в) элементы крепления провода, жгутов и кабеля;
- г) соединительные элементы электрического монтажа;
- д) однослойный и многослойный печатный монтаж;
- е) монтажные соединения приборов, блоков и узлов РЭА.

На конструкцию электромонтажа наибольшее влияние оказывает частотный диапазон работы устройства.

В блоках, работающих *на низкой частоте* (до 20 Гц), вредные связи возникают при появлении отдельных механических колебаний, и особенно на резонансных частотах. Такие колебания могут быть вызваны нарушением жесткости крепления элементов магнитных цепей и некоторых деталей несущей конструкции. Вредные связи резко снижаются, когда наиболее чувствительные к механическим колебаниям первые каскады мощных усилителей, кристаллические резонаторы или электромеханические фильтры устанавливаются на эластичные основания (амортизаторы).

Во избежание возникновения неуправляемой обратной связи вход сигнала размещают возможно дальше от выхода или их тщательно экранируют друг от друга.

Низкочастотные устройства должны быть надежно защищены от влияния магнитных полей переменного тока. При монтаже блоков широко применяют монтажные провода, связанные в жгуты. Закрепление монтажного провода производится так, чтобы между проводниками и металлическими стенками несущей конструкции не возникали индуктивные связи.

В блоках, работающих *на средних частотах* (20 кГц — 1 МГц) особенно ощутима связь между входными и выходными электродами транзисторов. В этих случаях управляющие цепи каждого каскада выполняют короткими, а сами каскады располагают последовательно. Элементы схемы каждого каскада размещают вблизи «своей» лампы или транзистора. Элементы, создающие магнитные поля, экранируют.

Компоновка и электромонтаж блоков *высокой частоты* (от 1 до 100 МГц и выше) является более сложной задачей, и особенно в усилительной аппаратуре с большим коэффициентом усиления. В этом диапазоне весьма ощутимым становится влияние емкости элементов электромонтажа и электромагнитного поля. Для достижения минимальных излучений внутри блоков каскады схемы выполняют в виде отдельных узлов, тщательно экранируя их друг от друга и от внешних возбудителей. Колебательные контуры выполняют на тороидальных сердечниках. Общую экранировку часто выполняют двухслойными экранами из пермаллоя и меди.

Во избежание взаимных связей между проводниками последние разделяют достаточными промежутками, экранируя проводники от магнитных полей. Если снизить потери короткими проводами не представляется возможным, то связи выполняют коакси-

альным кабелем. Чем выше частота, тем сильнее сказываются взаимовлияния линий связи и тем качественнее должны производиться экранирование и заземление.

Блоки *сверхвысоких частот* (от 400 до 3000 МГц) по конструкции электро монтажа резко отличаются от РЭА более низких частот. Уже при частоте 400—600 МГц потери настолько возрастают, что вместо проводников используют коаксиальные линии связи, а при частоте более 1500 МГц — волноводы.

5.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОМЕХ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Помехи существуют трех видов: магнитные, электрические и кондуктивные. Причиной возникновения магнитных помех является протекание переменного тока в проводниках и катушках индуктивности. Электрические поля возникают за счет емкостных связей при прохождении тока частотой выше 10 МГц. Кондуктивные помехи возникают в результате наличия общих цепей питания или нагрузки основного полезного и наводимого вредного сигналов.

При наличии вредных связей электрических цепей, находящихся в магнитных и электрических полях, или проводной связи цепей питания и нагрузочных сопротивлений неизбежно снижается устойчивость работы РЭА. Однако снижение таких связей должно производиться с минимальными потерями полезного сигнала.

Меры создания помехоустойчивости РЭА находят свое отображение в принципиальных электрических схемах. Кроме того, они осуществляются и конструктивно созданием экранирующих элементов несущих конструкций и помехоустойчивого электро монтажа.

Экранирование электрических полей. Как известно, благодаря наличию электрического поля между двумя точками (источником переменного напряжения и приемником помех) будет наблюдаться емкостная связь. Для снижения этой связи между двумя точками достаточно установить экран, надежно соединенный с общим корпусом. Экран представляет собой перегородку из тонкого листового металла с хорошей электропроводностью. При этом емкость на корпусе увеличивается, а напряжение поля, создававшее помехи, резко снижается.

Экранирование магнитных полей. В электрических цепях, находящихся в переменном магнитном поле, возникает индуктивная связь. Источником, создающим переменное магнитное поле, могут служить трансформаторы, дроссели или катушки индуктивности, питаемые переменным током. Снижение влияния магнитных полей на цепи РЭА достигается экранированием.

Экранирование магнитных полей осуществляется двумя способами. Первый способ заключается в шунтировании магнитного поля сплошным экраном, изготовленным из металла с большой магнитной проницаемостью. При этом силовые линии магнитного поля шунтируются стенками экрана, не проникая в его внутреннюю полость. Магнитные экраны используют и для локализации

магнитных полей рассеяния, индуцируемых трансформаторами, дросселями или катушками индуктивности.

Второй способ заключается в использовании эффекта вытеснения поля из экрана за счет индукции и появления в стенках экрана вихревых токов. Этот способ экранирования выгодно используется при частотах выше 1 МГц. На таких частотах толщина экрана 0,5—1,5 мм уже обеспечивает достаточное экранирование. На частотах 10 МГц и более для экранирования может быть с успехом использована медная или алюминиевая фольга толщиной 0,03—0,1 мм.

В экранах сложной формы не исключена возможность появления различных паразитных связей, предусмотреть которые при разработке конструкции весьма трудно. Поэтому конфигурацию экранов следует выбирать наиболее простую и легко поддающуюся расчету (цилиндр, параллелепипед и др.).

Размеры экранов определяются габаритными размерами экранируемых катушек и минимально допустимыми потерями (индуктивности и добротности) от экранирования. На рис. 5.1 приводятся рекомендуемые размеры экранов, снижающих индуктивность экранируемой катушки на 10—20 и добротность на 5—10 %. Эти потери обычно учитываются при расчетах экранирующих катушек.

Эффективность экранов оценивается ослаблением энергии поля. Оценка производится в зависимости от характера поля: магнитного $S_{0,m}$, электрического $S_{0,э}$ или в виде плоской волны $S_{0,п}$ (например, при защите приборов от внешнего поля на расстоянии от источника помех более чем пять длин волн — как для плоской волны). При защите схемных элементов, расположенных в непосредственной близости к источнику помехи, оценка производится по магнитной или электрической составляющей поля. Ослабление (в децибелах) определяется из условия, что энергия поля, падающая на экран, частично отражается, частично поглощается материалом и некоторая (незначительная) часть проходит сквозь экран. Последней частью в расчетах пренебрегают.

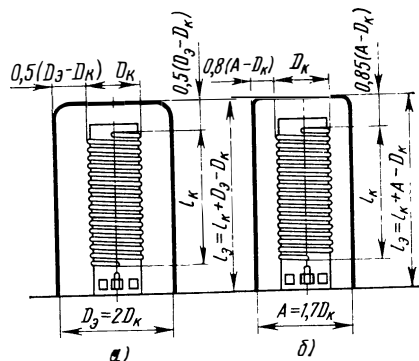


Рис. 5.1. Размеры экранов катушек индуктивности

а — для цилиндра; б — для параллелепипеда

Относительное ослабление энергии поля $S_э$ экраном составляет сумму потерь энергии поля на отражение $S_о$ и поглощение $S_п$, т. е. $S_э = S_о + S_п$. Здесь ослабление энергии поля отражением определяется для одного из действующих в каждом случае характеров поля [12].

Ослабление электрического поля отражением определяется из уравнения

$$S_{0,э} = 350 + 10 \lg \frac{640 G_э}{f^3 \mu r^2}, \quad (5.1)$$

где $G_э$ — относительная электропроводность материала экрана (табл. 5.1); μ — магнитная проницаемость (относительно меди); r — расстояние между источником наводки и экраном, мм; f — частота поля, Гц.

Таблица 5.1. Значения электрической проводимости и магнитной проницаемости материалов, применяемых для экранов

Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом/м ³	Относительная электропроводность	Магнитная проницаемость
Медь	1,72	1	1
Алюминий	2,83	0,61	1
Цинк	5,9	0,292	1
Никель	7,0	0,246	110—600
Латунь	7,5	0,25	1
Бронза ОФ	11,5	0,15	1
Олово	11,5	0,15	1
Пермаллой	21	0,082	6000—100 000
МЮ-металл	25	0,069	7000—100 000
Сталь малой кремнистости	16	0,107	170—8400
Сталь средней кремнистости	25	0,069	250—7700
Сталь высокой кремнистости	34	0,051	450—7800
Чугун	90	0,019	620

Ослабление магнитного поля отражением имеет вид

$$S_{0,м} = 20 \lg \left[\frac{12}{r} (\mu/fG)^{1/2} + 0,5 \cdot 10^{-2} r (\mu/fG_э)^{-1/2} + 0,35 \right]. \quad (5.2)$$

Ослабление отражением для плоских волн определяется из уравнения

$$S_{0,п} = 169 + 10 \lg (G/f\mu). \quad (5.3)$$

Потери на поглощение в материале экрана вычисляются из выражения

$$S_{п} = 0,13 a \sqrt{\mu G f}, \quad (5.4)$$

где a — толщина материала экрана, мм.

Экранирование катушек индуктивности производится экранами замкнутой формы в виде цилиндра или параллелепипеда с квадратным сечением. Экраны изготовляют из металлического тонкостенного немагнитного материала (медь, латунь, алюминий). Размеры экрана устанавливаются из допустимых потерь в катушке колебательной мощности в пределах 0,5—1%. В обычных ус-

ловиях это достигается выбором материала экрана и отношением диаметра катушки к диаметру экрана $D_K/D_э=0,45 \div 0,6$ [33].

Катушку с обмоткой обычно располагают в центре экрана, тогда для цилиндрического экрана $D_э - D_K = l_э - l_K$ и для прямоугольного с квадратным сечением $1,2 A D_K = l_э - l_K$.

Индуктивность экранированной катушки $L_{K,э}$ определяется выражением

$$L_{K,э} = \beta_L L_K \text{ или } L_{K,э} = L_K - L_a, \quad (5.5)$$

где L_K — индуктивность однослойной катушки; L_a — снижение ее индуктивности экраном; β_L — коэффициент снижения индуктивности,

$$\beta_L = [1 - (D_K/D_э)^3] [1 - (l_K/2l_э)^2]; \quad (5.6)$$

тогда

$$L_{K,э} = L_K [1 - (D_K/D_э)^3] [1 - (l_K/2l_э)^2], \quad (5.7)$$

и относительное изменение индуктивности будет:

$$L_a/L_K = (l_K/2l_э)^2 + (D_K/D_э)^3 [1 - (l_K/2l_э)^2]. \quad (5.8)$$

Добротность катушки индуктивности без экрана составляет $Q_d = \omega L_K/R_K$. Тогда добротность катушки, размещенной в экране, должна быть увеличена на

$$Q_a = Q_K [(L_a/L_K) - (R_a/R_K)], \quad (5.9)$$

где R_a/R_K — относительное изменение активного сопротивления; R_K — активное сопротивление катушки без экрана; R_a — активное сопротивление, вносимое в экранированную катушку с учетом поверхностного эффекта,

$$R_a = (3/2) (\pi N^2/\sigma G) (D_K/D_э)^2; \quad (5.10)$$

$$R_K = (0,52 D_K N V \bar{f} \cdot 10^{-3})/d_1 \quad (5.11)$$

(при условии $10^2 d_1 V \bar{f} > 5$), где G — электропроводность материала экрана, Ом/см; σ — глубина проникновения поверхностного эффекта, см; N — число витков катушки; f — частота, МГц; d_1 — диаметр медного провода, см. Тогда

$$R_a/R_K = 2,3 N d_1 D_K^3/D_э^4. \quad (5.12)$$

В целях сохранения эффективности экранирования входные и выходные провода катушки индуктивности также должны быть экранированы.

Пример. Для однослойной катушки индуктивности диаметром 1 и длиной 2 см с обмоткой из 30 витков медного провода диаметром 0,05 см определить относительное изменение индуктивности при установке ее в экран круглой формы.

Выбираем $D_K/D_э=0,5$, тогда $D_э=D_K/0,5=2$ см, высота экрана должна быть $l_э=D_э-D_K+l_K=2-1+2=3$ см

Подставляя полученные данные в уравнение (5.8), определяем относительное изменение индуктивности катушки

$$L_a/L_K = (2/2 \cdot 3)^2 + (1/2)^3 [1 - (2/2 \cdot 3)^2] = 0,222,$$

т. е. индуктивность катушки в экране уменьшится на 22,2%. Относительное изменение активного сопротивления определяем из соотношения (5.12) $R_a/R_k = 2,3 \cdot 30 \cdot 0,05 \cdot 1/16 = 0,216$, т. е. 21,6%. Добротность катушки при этом снижается на

$$Q_a/Q_k = L_a/L_k - R_a/R_k = 0,222 - 0,216 = 0,004, \text{ т. е. на } 0,4\%.$$

Материалы для экранирования выбирают из условий прочности экранов и их устойчивости против коррозии. Наиболее широко используются сталь, медь, латунь и алюминий в виде тонколистового проката, сетки и фольги. Эти же металлы используют и для металлизации поверхности.

Из уравнения (5.4) видно, что при увеличении частоты эффективность экранов возрастает. Однако магнитные материалы (сталь, пермаллой и др.) при той же толщине экрана, что и немагнитные (медь, алюминий и др.), при низкой частоте используются более выгодно.

Когда подавление паразитных связей становится одним из основных условий надежной работы РЭА, возникает необходимость в разработке кроме отдельных экранов сплошного экранирования несущих конструкций: шасси блоков, корпусов приборов, приборных стоек, шкафов и контейнеров. С целью создания в них электрогерметичности особенное внимание уделяют экранировке мест разъемов крышек, дверок, смотровых окон и проемов, а также заземлению элементов несущей конструкции и электромонтажных цепей. Примеры исполнения конструкции узлов электрогерметичности приведены на рис. 5.2.

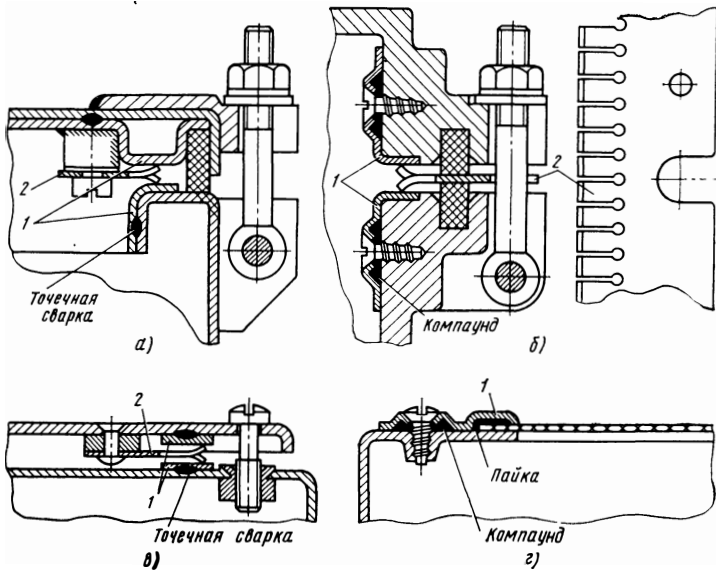


Рис. 5.2. Экранирующие узлы разъемных соединений из алюминиевых сплавов проката (а), литья (б), малых крышек (в), сетки (г)
1 — контакты из плакированного алюминия; 2 — упругодеформируемая лента (бериллиевая бронза)

Практически конструкцию сплошного экрана создать трудно. В любом экране неизбежны отверстия для выводов проводников, щели в установочных плоскостях крепления экрана и т. д. Поэтому при расчете ослабления поля необходимо иметь в виду, что фактически это значение будет на 20—30 % меньше заданного.

Экранирование проводников. Электромонтажные провода, так же как и элементы переменного тока, сами являются источниками или приемниками помех. Как известно, переменные токи, проходя по проводникам, создают вокруг них электрические и магнитные поля. Последние могут создавать наводки в цепях, расположенных в непосредственной близости.

Для защиты чувствительных электроцепей от вредных наводок используют экранированные кабель и монтажный провод. Металлическая оплетка проводников, заземленная на корпус, представляет собой защитный экран. По экрану ток наводки протекает в направлении, обратном направлению основного тока, и снимает электрические и магнитные поля, создаваемые основным током.

При низкой частоте качество экранирования металлической оплеткой сохраняется лишь в том случае, когда эта оплетка будет служить единственным проводником обратного тока. В случае короткого замыкания части оплетки экранировка этого участка нарушится.

В цепях переменного тока вместо экранированного провода применяют обычный двупарный провод. В каждый момент токи в нем протекают в противоположных направлениях, создавая вокруг разноименные, взаимоуничтожающиеся поля.

5.3. ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА

Все электрические провода, т. е. провода, предназначенные для передачи электрической энергии, называют кабельными изделиями. Они выпускаются промышленностью в широком ассортименте для различных силы тока, напряжений, частоты и условий эксплуатации и характеризуются: сечением токопроводящих жил; толщиной изоляции; механической прочностью; термостойкостью и влагостойкостью. Общая номенклатура кабельных изделий составляет около 200 наименований. Сведения по каждому из них всегда можно получить из каталогов на кабельные изделия или в ограничительных перечнях и ведомственных нормалях.

Для электромонтажа РЭА используют гибкие монтажные провода и кабели, выполненные из тонких медных луженых проводников, скрученных между собой в одну жилу. Жилы имеют однослойную и многослойную изоляцию из полихлорвиниловой, резиновой, полиэтиленовой, лавсановой или волокнистой оболочек. Отдельные жилы или все жилы кабеля могут быть экранированы. Провода с волокнистой изоляцией используются в аппаратуре, предназначенной для эксплуатации при нормальной влажности и с небольшими перепадами температуры. Для более жестких усло-

вий эксплуатации применяют провода в полиэтиленовой, полихлорвиниловой или резиновой изоляции.

Для внутриприборного электромонтажа РЭА из монтажных проводов используют провода марок БПВЛ, МГШВ, МГШ и др., для неподвижной или жесткой прокладки — медные многожильные со шланговой изоляцией из полихлорвинила, полиэтилена марок ПРГ, ПРД и др. Для внешних соединений приборов используют кабели марок МКШ, РПКЭ, РПШЭ и др. Для питания высоковольтных элементов аппаратуры (электронно-лучевые трубки и др.) применяют провода марок ПВЛ-2, ПВЛЭ-1, ПВС-5. Эти провода имеют усиленную изоляцию и предназначены для напряжения до 20 кВ.

В РЭА широко используют также плоские многожильные кабели, выполненные в виде ленты. Такие кабели используют в МЭА для гибких соединений и при ограниченных объемах монтажных промежутков. Ленточные кабели изготавливают с проводниками круглого и плоского сечений. Для образования жил плоского сечения используют фольгированный лавсан. Ширина ленты определяется количеством жил кабеля и сечением проводников. Наиболее широко используют ленточные кабели марок ЛФ и ЛФЭ с количеством жил 4, 7, 10, 19, 24 и 32 и сечением их 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35 и 0,5 мм². Материалы провода и изоляции такие же, как и у стандартного провода с полистироловой изоляцией.

5.4. РАЗДЕЛКА, ПРОКЛАДКА И КРЕПЛЕНИЕ МОНТАЖНОГО ПРОВОДА

По принципу исполнения электрический монтаж подразделяют на плоский и объемный. Объемный электромонтаж ведется проводом и применяется в межблочных и в межузловых соединениях. Такой монтаж выполняют в соответствии с монтажной схемой по всему объему в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

Электромонтажная схема представляет собой рабочий чертеж, определяющий нормы исполнения в производстве электрического соединения элементов, узлов и блоков, а также нормы механического крепления монтажного провода и установочных изделий. В электромонтажной схеме в упрощенном виде и в соответствующем масштабе графически изображают элементы принципиальной электрической схемы, их присоединительные контакты, а также монтажные провода, шины, контактные планки и места крепления монтажных жгутов, оговаривают технические требования и указывают дополнительные руководящие материалы, определяющие нормы на разделку проводов или кабеля, вязку жгутов, маркировку монтажа, пайку соединений и покрытие изоляционным лаком.

Внешний монтаж приборов системы (или присоединения блоков в приборе к межблочному электромонтажу) производится по схеме соединения, которая является таким же техническим документом, как и схема электромонтажная. В ней показаны трассы

соединений между блоками и приборами, марки проводов, присоединительные контакты и их маркировка.

Близко расположенные провода при укладке объединяют в один жгут. Прокладка проводов в жгутах значительно упрощает выполнение электрического монтажа пооперационно: вязка жгутов, разделка концов провода, крепление жгутов и пайка их жил к соединительным планкам, блокам и узлам.

Заготовку жгутов производят на основании монтажной схемы. При выполнении жгутов обычно используют специальные шаблоны, которые в пространстве точно повторяют все плоскости и размеры будущих участков укладки. Полученные таким образом заготовки формуют в жгуты, обвязывают нитками или лентой.

Монтажный провод крепят в местах прокладки так, чтобы он не был натянут. В противном случае даже при незначительных деформациях плоскостей закрепления может произойти обрыв проводов или нарушение паяного соединения. На каждом припаиваемом конце провода предусматривают некоторый запас длины в виде петли, позволяющей в случае излома провода у пайки выполнить до двух повторных разделок и паек провода.

Переход монтажных проводов или жгутов с неподвижных плоскостей на подвижные блоки осуществляют петлей из гибких проводников (рис. 5.3). Длина петли определяется размерами перемещения блока (вытаскивание, опрокидывание и разворачивание). Такой переход позволяет производить осмотр и ремонт блока, не отключая его от межблочного электромонтажа. Гибкие участки жгутов обшиваются кожей или ее заменителем. Срок службы таких монтажных переходов увеличивается при использовании их не на изгиб, а на кручение, как это показано на рис. 5.3,а. При незначительном расстоянии между блоками, устанавливаемыми в приборных стойках один над другим, используются плоские жгуты, обшитые кожей. Они располагаются под каждым блоком на специальных поддонах.

При необходимости вывода из блока большого количества проводников с использованием электрических соединителей последние устанавливаются на шасси блока, как это показано на рис. 5.3,б. Здесь вилки соединителей используют в корпусах и соединяют с межблочным электромонтажом гибкими жгутами, работающими на изгиб. Такой вид соединения не требует точной установки блока относительно корпуса прибора, не ограничивает количество соединителей, устанавливаемых в одном блоке, но допускает возможность быстрой смены блока.

В целях предохранения проводников от обрыва и порчи изоляции при вибрациях и ударах провода или жгуты закрепляют скобами через каждые 20—30 см. Под каждой скобой устанавливают прокладки из электрокартона. Места прохода проводников через металлические перегородки защищают от повреждений изоляции установкой мягких изоляционных втулок. Прокладка провода на острых углах, ребрах и впадинах несущей конструкции произво-

дится на упругих прокладках из резины и на металлических мостиках.

В стационарный прибор соединительные кабели вводятся в местах, удобных для разделки и присоединения его жил к входным соединительным платам. К переносным или съемным с места крепления прибором кабели присоединяются с помощью соединителей, имеющих пыле- и брызгозащитные корпуса.

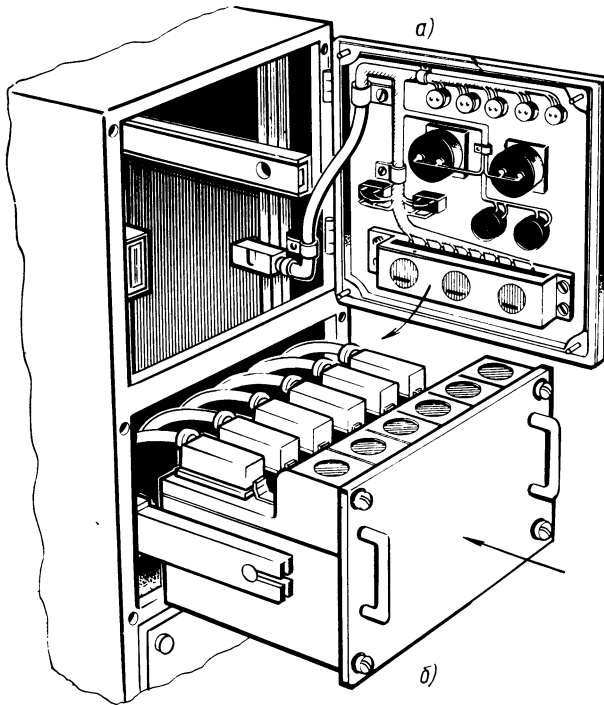


Рис. 5.3. Подключение блока к межблочному монтажу гибкими монтажными жгутами, работающими на кручение (а) и на изгиб (б)

Контактные соединения проводников делятся на разъемные и неразъемные. Разъемные соединения осуществляются пружинным давлением или прижимом под винт, неразъемные — сваркой, пайкой, горячим прессованием, накруткой и склеиванием токопроводящими клеями (рис. 5.4).

К разъемным соединениям относятся электрические соединители, переключатели, выключатели, контактные колодки с винтовым или пружинным поджатием проводников.

Неразъемные соединения делятся на две резко различающиеся между собой группы. Первая группа — соединения с применением нагрева (пайка, сварка, горячее прессование), вторая — соединения холодные или непаяные (накрутка, обжатие). К особой группе, используемой в микроминиатюрных соединениях, относится склейка проводников электропроводящими клеями и пастами.

Первая группа соединений связана с требованиями теплостойкости контактируемых элементов и обеспечения нормального доступа к контактам с нагретым инструментом. Пайка с трудом поддается автоматизации, ограничивает возможности микроминиатюризации соединений. Кроме того, паяные соединения обладают малой ви-

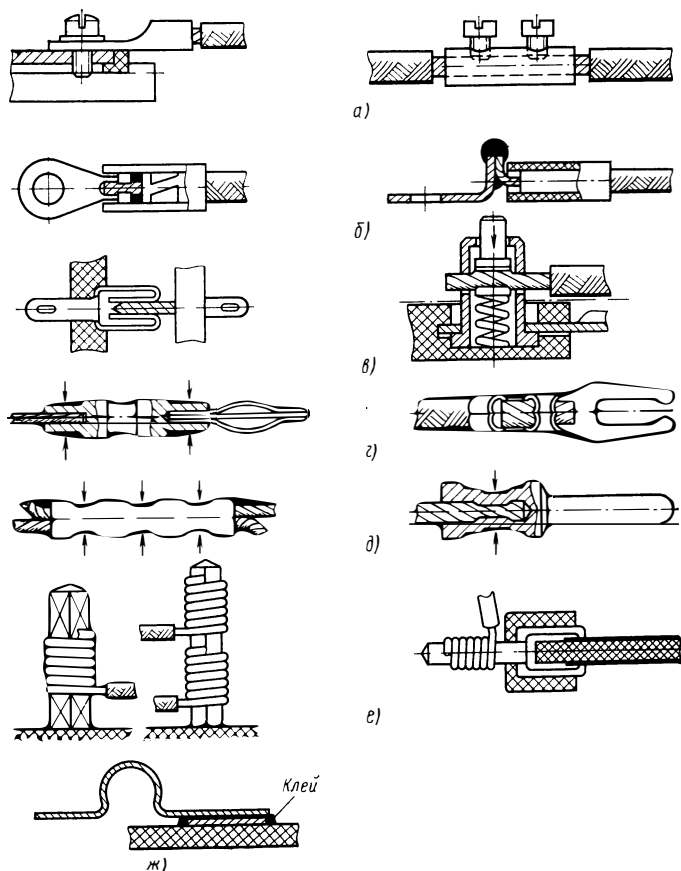


Рис. 5.4. Образование контактных соединений винтом (а), пайкой или сваркой (б), сжатием пружины (в), обжатием в гильзе (г), прессовкой (д), накруткой на штырь (е), склейкой (ж)

роустойчивостью. Вместо пайки часто применяют электродуговую сварку, считая ее более экономичной и менее трудоемкой. Однако этот способ имеет те же недостатки.

Холодные (или непаяные) соединения отличаются высокой прочностью, виброустойчивостью, не предъявляют высоких требований к теплостойкости соединяемых элементов, обладают более высокой надежностью. Непаяные соединения не требуют сложного оборудования и достаточно легко поддаются автоматизации. На-

пример, надежность соединения накруткой в 10 раз превосходит надежность паяных соединений и обеспечивает 50% экономии времени при монтаже. Однако и этот способ требует сравнительно большого резервного объема для доступа с инструментом к месту соединения контактов [38].

Соединение накруткой выполняют накручиванием оголенного от изоляции участка провода на присоединительный штырь квадратного или прямоугольного сечения. Накрутку выполняют так, чтобы витки проводника с силой врезались в острую кромку штыря.

Накручивание проводника начинают с основания и ведут к его вершине. Минимальное число накрученных на штырь витков зависит от диаметра провода и изменяется от трех (при диаметре провода 1,6 мм) до восьми (при диаметре провода 0,2 мм) витков.

Обжим используется для соединения проводов с контактами, наконечниками и другими элементами монтажа. Соединение осуществляется обжимом специальной втулки, в которую устанавливается провод. Соединение проводников между собой выполняют запрессовкой их в гильзу специальным прессовочным инструментом.

При разработке электро-монтажа особое внимание следует обратить на надежное заземление схемных элементов и экранов на шасси блоков и корпуса приборов. Материалы заземляющих контактов должны быть коррозионно-стойкими, температуростабильными при разнородных металлах. Алюминиевые и магниевые сплавы, широко используемые в РЭА для несущей конструкции, создают известные трудности в получении надежных переходных контактов в заземляющих и экранирующих узлах аппаратуры.

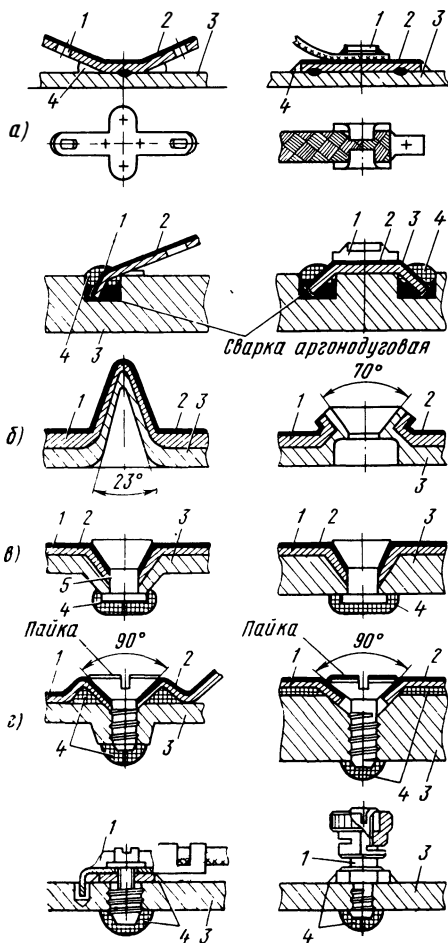


Рис. 5.5. Образование электрического контакта в несущей конструкции из алюминиевого и магниевого сплавов

а — горячей сваркой; б — холодной сваркой; в — прессованием; г — самонарезающими винтами
1 — контактный элемент; 2 — плакирующий слой меди; 3 — несущая конструкция; 4 — компаунд; 5 — заклепка

Конструкции переходных электрических контактов, выполняемых на «неконтактных» материалах (алюминиевые и магниевые сплавы), отличаются от обычных тем, что предусматривают меры защиты контактных поверхностей от образования оксидных пленок. Последние, как известно, предохраняя эти легкие металлы от коррозии, одновременно являясь хорошей изоляцией в контактных соединениях. Методы обеспечения надежных контактных соединений на корпус, изготовленный из алюминий-магниевого сплава, приведены на рис. 5.5. Такое исполнение контактных плоскостей пригодно для установки разнообразных заземляющих или экранирующих элементов конструкции. От вредного влияния атмосферных условий контактные поверхности защищают стойкими лаками, компаундом, лужением. В контактных устройствах широко используют плакированный алюминиевый тонколистовый прокат (АПМ) со слоем меди толщиной до 0,4 мм.

Подвижные или съемные элементы конструкции заземляют гибкими металлическими канатиками, плетенками или плоскими шинами. Гибкие шины широко используют для заземления приборов, установленных на резиновых амортизаторах, для заземления подвижных узлов аппаратуры, установленных, например, на шарнирных петлях, и т. п.

5.5. ПЕЧАТНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНТАЖ

Особенностью печатного электрического монтажа является нанесение на изоляционное основание металлизированного слоя, эквивалентного обычному монтажному проводнику. Крепление проводников на плате осуществляется за счет механического сцепления металла с изоляционным материалом. Навесные схемные элементы, расположенные на плоскости изоляционной платы, своими выводами впаиваются в проводники непосредственно, без каких-либо переходных или опорных деталей.

Применение печатного электро монтажа снижает трудоемкость сборочных и монтажных работ. Одновременно при этом уменьшается и материалоемкость изделия.

Методы изготовления печатного монтажа отличаются способами образования проводникового слоя и процессом нанесения рисунка проводников на поверхности платы. Наибольшее распространение получили:

по образованию проводникового слоя — способы электрохимического осаждения металла, травления незащищенных участков сплошного слоя медной электролитической фольги, предварительно нанесенной на плоскость листового диэлектрика, вжигания в плоскость соединений серебра, разбрызгивания расплавленного металла и, наконец, распыления металла в вакууме возгонкой или воздействием электрического поля;

по нанесению (печатанию) позитивного или негативного изображения проводников — способы фотографического копирования на плоскость, покрытую светочувствительным слоем, использования

трафаретов, тиснения изображения на плоскость, гравирования плоскости, предназначенной для покрытия, и нанесения изображения печатанием защитной краской на плоскости фольги.

При изготовлении печатных плат наибольшее распространение получил способ химического травления слоя фольги листовых фольгированных диэлектриков типов НФД-180-1, НФД-180-2, ФЛМ-1, ФЛМ-2 и фольгированного стеклотекстолита СФ-1 и СФ-2.

Размеры плат для одностороннего или двухстороннего печатного монтажа должны быть не более 220×380 , а по толщине 1,5—3,0 мм.

Печатный электромонтаж разрабатывается с использованием координатной сетки с шагом 2,5 и 1,25 мм. Отверстия для установки на плату радиодеталей и пайки их выводов или главные оси элементов схемы располагают на узлах координатной сетки. Исключение могут составлять лишь отверстия под пайку выводов от многополюсных схемных элементов, уже сориентированных своими главными осями на одном из этих узлов.

На плоскости печатных плат вокруг отверстий под выводы навесных элементов образуют контактные площадки диаметром до 2,5 мм. Печатные проводники по форме стремятся выполнять без резких переходов, изгибов и острых углов (рис. 5.6).

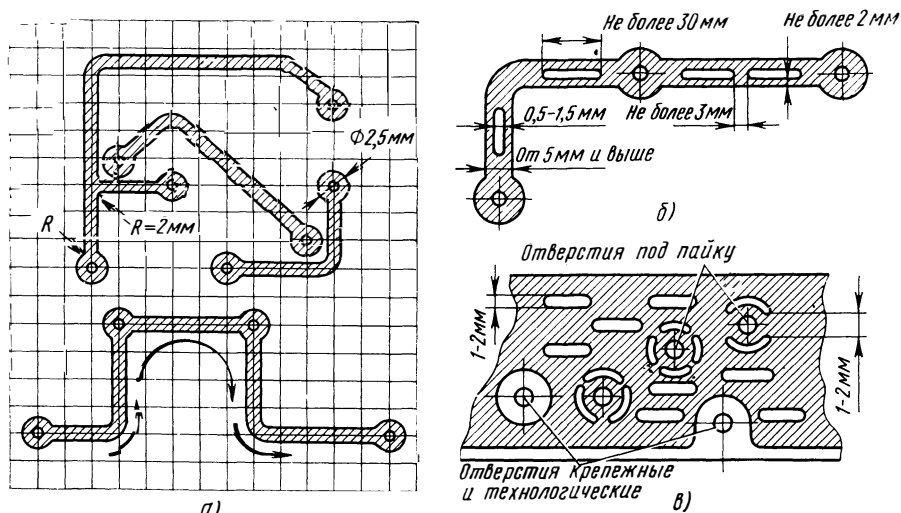


Рис. 5.6. Форма основных элементов печатного монтажа

а — контактные площадки и соединительные проводники; *б* — проводники шириной более 5 мм; *в* — печатные экраны

В зависимости от способа нанесения печатных проводников толщину их $h_{п}$ выдерживают от 10 до 100 мкм, ширину b — в пределах 0,2—1,5 мм исходя из допустимых плотности тока i и падения напряжения $U_{доп}$.

Известно, что плоские проводники в сравнении с проводниками круглого сечения имеют большую поверхность теплового излучения. Поэтому максимальную плотность тока для печатных проводников, полученных гальванохимическим методом, принимают равной 20 А/мм^2 , а для проводников, полученных методом химического травления, 30 А/мм^2 . Тогда допустимая сила тока в них $I_{\text{доп}}$ определится выражением

$$I_{\text{доп}} = i h b.$$

Практически установлено, что нагрев печатных проводников в нормальных условиях не должен превышать 353 К . Этот предел сохраняется при условии $b \geq I_{\text{доп}} \cdot 10^3 / (ih)$.

Падение напряжения в проводнике длиной l допускают не более $1\text{--}2\%$ нормального напряжения. Учитывая удельное сопротивление материала $\rho_{\text{п}}$, ширину проводников определяют из условия

$$b \geq 10 \rho l I_{\text{доп}} / h U_{\text{доп}}.$$

Для медного проводника, наносимого гальванохимическим способом, $\rho_{\text{п}} = 0,025 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, а для полученного химическим травлением $\rho_{\text{п}} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.

Наименьшее расстояние Δ между соседними проводниками определяется рабочим напряжением при $U_{\text{н}}$, равном 50; 75; 100; 125; 150; 175; 200; 250; 300; 400, ВД, принимают значения 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,5, мм.

Выходные проводники печатного монтажа выводят к кромкам платы (рис. 5.7), образуя простое подключение схемы к межзловому электромонтажу. Так же как и в объемном электромонтаже при образовании проводников, в печатных платах учитывают распределение магнитных и электрических полей с целью исключения паразитных связей и наводок в чувствительных цепях.

Печатные экраны выполняют на платах перфорированным металлическим слоем. В качестве примера конструктивного выполнения формы печатных проводников на рис. 5.8 приведен общий вид двух плат с печатным монтажом, различающихся между собой способом их разработки.

Односторонние или двухсторонние печатные платы просты в изготовлении, однако при установке на них многополюсных схемных элементов резко усложняется трассировка проводников.

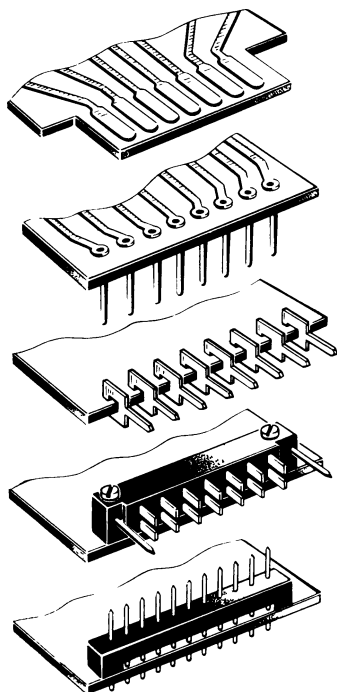


Рис. 5.7. Типовые соединения печатных плат электрическими соединителями

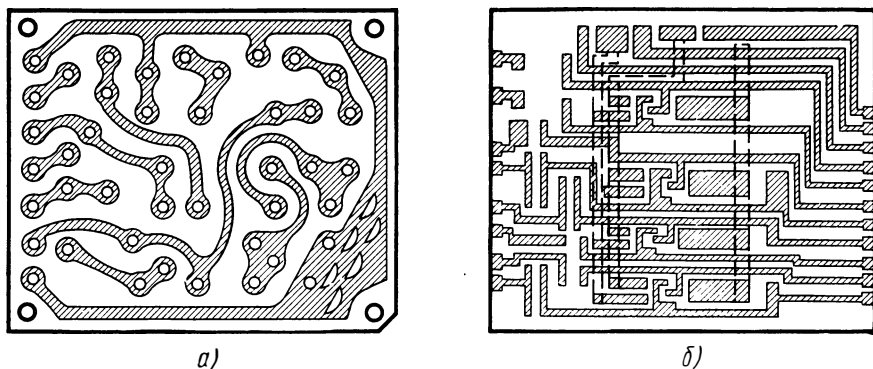


Рис. 5.8. Форма печатного монтажа при ручном (а) и машинном исполнении (б) монтажного чертежа

5.6. МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Широкое распространение в РЭА микромодульных и микросхемных конструкций обусловило задачу дальнейшего увеличения плотности электро монтажа за счет: снижения размеров печатных проводников до уровня, соизмеримого с размерами монтажных выводов микросхем; сокращения числа опорных и разъемных элементов монтажного соединения; оптимального использования площади печатной платы при монтаже на ней многополюсных подвесных элементов.

Эффективным решением этой задачи явилось создание многослойных печатных плат, конструкция которых оказалась не только соизмеримой с микросхемами, но и качественно превосходящей однослойные печатные платы по электрическим характеристикам.

Многослойная печатная плата (МПП) представляет собой монолитную плоскую конструкцию, изготовленную из нескольких слоев диэлектрика, каждый из которых имеет свой печатный рисунок проводников. Монтажные отверстия, образованные на плоскости платы, служат одновременно и элементами электрической связи между отдельными слоями проводников. Практически число слоев МПП не превышает 10.

Многослойные печатные платы расширяют возможности монтажа значительного количества навесных многополюсных элементов, резко снижают объем монтажного провода, позволяют осуществлять эффективную экранировку проводников, заземление, теплоотвод и защиту электро монтажа от механических воздействий и вредного влияния внешней среды.

Имеются различные методы получения межслойных соединений. Из них наиболее распространенными являются методы попарного прессования, послыстного наращивания, открытых контактных площадок и металлизации сквозных отверстий (рис. 5.9).

Метод попарного прессования заключается в изготовлении односторонней печатной схемы и межслойных соединений на заго-

товке двухстороннего фольгированного диэлектрика с последующим склеиванием и прессованием двух таких плат печатными слоями внутрь. На полученной четырехслойной заготовке, как на двухсторонней печатной плате, изготавливают наружные рисунки печатных проводников и металлизированные отверстия, соединяющие 1-й и 4-й слои (рис. 5.9,а). Таким же способом можно получить и шестислойную печатную плату, если на четырехслойной заготовке образовать лишь нижний печатный рисунок схемы и после металлизации отверстий к нему приклеить еще заготовку двухсторонней печатной платы. Наружные печатные отверстия, соединяющие 1-й и 6-й слои, изготавливают так же, как и в предыдущем случае. В качестве изоляционного слоя между внутренними печатными схемами используют стеклоткань, пропитанную лаком. Толщину изоляционного слоя выдерживают в пределах 150—300 мкм. Этот метод изготовления МПП использует технологические режимы, принятые при изготовлении двухсторонних печатных плат, и благодаря своей простоте получил широкое распространение.

Метод послойного наращивания предусматривает последовательное образование каждого слоя диэлектрика и наращивание на нем необходимого печатного рисунка с запасом по толщине. Рассматриваемый метод изготовления имеет несколько технологических вариантов. Один из них, используемый наиболее широко, показан на рис. 5.9,б. Здесь контактные столбики межслойных соединений образуют за счет неполного травления нанесенного слоя проводников до необходимой толщины, не затрагивая мест образования

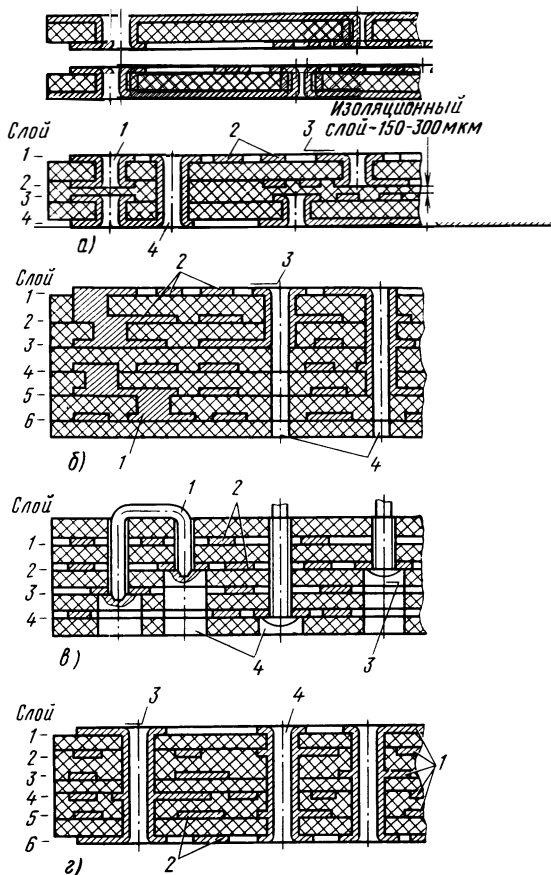


Рис. 5.9. Образование многослойных печатных плат методом парного прессования (а), открытых контактных площадок (б), послойным наращиванием (в), металлизацией сквозных отверстий (г). 1 — межслойные соединения; 2 — проводники; 3 — контактные площадки; 4 — монтажные отверстия. Сечение по межслойным соединениям и монтажным отверстиям

самих соединительных столбиков. После нанесения 2-го изоляционного слоя и последующей шлифовки его контактные столбики вскрывают. Этот процесс повторяется при образовании каждого очередного внутреннего печатного слоя. После изготовления всех необходимых слоев в местах расположения контактных столбиков сверлят отверстия для установки выводов навесных элементов.

Метод открытых контактных площадок состоит из склейки односторонних печатных плат (до 10 шт.). Чтобы обеспечить доступ к пайке выводов навесных элементов под каждой контактной площадкой, в слоях, лежащих ниже данного слоя, предварительно сверлят отверстия на 0,4—0,6 мм превышающие размер монтажных отверстий, как это показано на рис. 5.9,в. При необходимости соответствующие слои проводников соединяют между собой перемычками.

Метод металлизации сквозных отверстий считается наиболее перспективным. Он состоит из склейки необходимого количества слоев диэлектрика с нанесенным на них двухсторонним печатным монтажом. В полученном монолите в местах межслойных контактных площадок сверлят и металлизуют сквозные отверстия (см. рис. 5.11,з). Перед металлизацией производят подтравливание диэлектрика в отверстиях для увеличения поверхности контактируемых кромок. Изготовление МПП этим методом требует особо тщательного соблюдения установленных допусков и технологических режимов.

Общая толщина МПП, изготавливаемой методом металлизации сквозных отверстий, не должна превышать утроенного диаметра монтажных отверстий. Так, например, при отверстиях диаметром 0,5 мм общая толщина ее не должна превышать 1,5 мм, и соответственно при толщине диэлектрика 0,2 мм количество слоев не должно превышать 8.

Основным материалом для изготовления МПП служат обычные и фольгированные стеклоэпоксидные диэлектрики толщиной 0,25; 0,5 и 0,8 мм. В качестве связующих клеев используют недополимеризованные стеклоэпоксидные составы. Токпроводящим материалом служит медь, а для покрытий поверхностей используют золото, никель и оловянно-свинцовые припои.

Каждый слой печатного монтажа стремятся компоновать по функциональному признаку, например, слой с цепями питания, слой нулевого потенциала, слой сигнальных цепей и т. д. Взаимовлияние слоев и проводников снижают удалением друг от друга проводников, увеличением толщины диэлектрика межслойной изоляции или экранированием слоев. Общая толщина МПП определяется размерами ее площади и в зависимости от необходимой прочности и жесткости составляет от 1 до 3 мм. Диаметр монтажных отверстий определяется толщиной проволочных выводов у подвесных элементов.

Толщина печатных проводников должна быть не менее 25—35 мкм. Ширина их определяется значением тока и колеблется в пределах от 200 до 500 мкм. Расстояния между проводниками за-

висят от рабочего напряжения. Для наземной и корабельной аппаратуры напряжение установлено равным 30 В, при этом расстояние между проводниками не должно быть меньше 250 мкм. Для наружных слоев расстояние между проводниками обычно принимают равным 625 мкм, что соответствует рабочему напряжению 150 В при высоте над уровнем моря 3000 м и 50 В при высоте более 3000 м. Минимальное расстояние от кромки платы до проводника, размещаемого внутри слоев, не должно быть меньше 2,5 мм. При диаметре сквозного отверстия 0,5 мм диаметр контактной площадки внутреннего слоя проводников должен быть не менее 1 мм. Основные геометрические размеры проводников для МПП приведены на рис. 5.10.

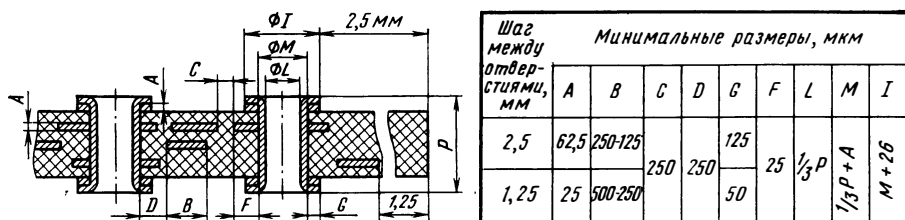


Рис. 5.10. Размеры проводников многослойных печатных плат

При высокой плотности монтажа, когда ширина проводников печатных плат и расстояние между ними не превышают 0,5 мм, верхние и нижние наружные проводники наносятся лишь в крайне необходимых случаях. Проводники, находящиеся между слоями диэлектрика, оказываются герметизированными и надежно изолированными от воздействия внешней среды, поэтому их характеристики становятся устойчивыми и более долговечными. Экраны и теплоотводы в МПП чаще всего образуют на наружных плоскостях. Плоскость проводника нулевого потенциала может служить также и теплоотводящим элементом.

Расстояния между контактными площадками в МПП с шагом 1,25 мм выполняют лишь при хорошо налаженной технологии изготовления. При этом минимальную толщину проводников делают равной 30 мкм, а ширину внутренних проводников снижают до 125 мкм с допуском ± 50 мкм. Такое увеличение плотности монтажа делает проводники весьма чувствительными к различным наводкам, искажающим сигнал. Допустимый уровень искажения в этом случае обеспечивают исполнением размеров с повышенными допусками.

Стоимость изготовления многослойных печатных плат определяется количеством слоев и плотностью монтажа. Весьма дорогими являются МПП с шагом 1,25 мм и с числом слоев 8. В настоящее время наибольшее применение получили четырехслойные МПП.

Большое значение имеет выбор метода проектирования МПП. Считается [14], что при объединении на плате до 30—40 ИМ, име-

ющих до 100 разъемных выводов, целесообразно разработку вести вручную. При объединении 40—60 ИМ на плате разработка монтажа вручную становится трудной и малопроизводительной и проводить ее целесообразнее машинным способом с помощью системы ЭВМ.

Изготовление МПП с большой плотностью монтажа требует весьма точного изготовления трафаретов или фотооригиналов (до 30 мкм). Вычерчивание оригинала печатной схемы вручную для последующего фотографирования с необходимой точностью стало уже невыполнимо. В этом случае фотооригинал с достаточной точностью и непосредственно на фотопластинке можно получить с помощью автоматического координатографа со световым лучом, управляемым ЭВМ.

При разработке МПП необходимо учитывать омическое сопротивление, индуктивность проводников и распределение емкости между ними. Методика расчета указанных параметров подробно рассматривается в литературе [2, 42].

5.7. ЭЛЕМЕНТЫ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДОВ И ЖИЛ КАБЕЛЯ

Все контактные электромонтажные соединения проводов выполняются с помощью опор, изолированных от металлического основания (корпуса). Опорами могут служить монтажные стойки, монтажные платы, зажимы или лепестки, установленные на изоляционное основание. Межблочный и межузловой электромонтаж про-

Таблица 5.2. Монтажные платы типа ПМТ

Тип	Эскиз	Количество контактов	Размеры, мм	
			L	A
ПМТ		3	44	36
		6	49	41
		7	54	46
		8	59	51
		10	69	61
		12	79	71
		16	99	91
ПМТ-1		20	119	111
		5	27	21
		6	30	24
		7	33	27
ПМТ-17		8	36	30
		10	42	36
		12	48	42
		16	60	54
		20	72	66

изводится преимущественно с помощью присоединительных плат или электрических соединителей типов ПМ, ПС, РП, ГРМП-1 и др.

Рассмотрим типоразмеры наиболее распространенных в РЭА элементов соединения — монтажных плат и электрических соединителей.

Платы монтажные (ПМ) (табл. 5.2) служат опорными контактами при соединении или коммутации монтажных проводников. Они предназначены для работы при температуре от 213 до 373 К, относительной влажности до 98% (при 313 К), давлении до 665 Па, вибрации с частотой от 5 до 200 Гц с ускорением до 30 g и одиночных ударах до 1000 g. Они используются в электроцепях постоянного и переменного токов напряжением от 150 и до 1000 В и силе тока от 2 до 6 А.

Платы соединительные (ПС) (табл. 5.3) предназначены для межблочного монтажа, а также для присоединений внешнего кабеля к приборам. Условия эксплуатации их такие же, как и для плат ПМ.

Таблица 5.3. Платы соединительные типа ПС

Тип	Эскиз	Количество контактов	Размеры, мм	
			L	A
ПС3 ПС4		3	52	42
		4	62	52
		5	72	62
		6	82	72
		8	102	92
		10	122	112
ПС12		2	22	16
		3	27,5	21,5
		4	33	27
		6	44	38
		8	55	49
		10	66	60
ПС13		4	22	19
		6	29	26
		8	36	33
		10	43	39
		12	50	46
		16	64	60

При необходимости быстрого отключения соединений вместо плат используют электрические соединители (табл. 5.4). Они состоят из двух частей: планки с гнездами (розетки) и планки с контактными штырями (вилки). Присоединение проводников к контактным элементам выполняется пайкой. Фиксирование постоянства включения контактов обеспечивается несимметричным расположением контактных пар на колодках или направляющими ключами.

Таблица 5.4. Электрические соединители внутреннего монтажа

Тип	Эскиз	Количество контактов	Размеры, мм		
			A	L	B
РП10		5	32	42,5	—
		7	45	55	—
РП10		9	58	68	—
		15	77	87	—
РП14		5	43,5	53	11
		10	43,5	53	18
		16	62	71	18
РП14		30	74	83	25

Соединители РП10 предназначены для работы в электрических цепях с напряжением до 1100 В и силой тока до 15 А. Для наружного соединения кабеля эти соединители применяются в корпусах. Усилие отключения соединителей на один контакт лежит в пределах 1—5 Н. Соединители этого типа допускают эксплуатацию при температуре от 213 до 398 К, относительной влажности 98% (при температуре 313 К), атмосферном давлении не ниже 665 Па, вибрации в диапазоне от 5 до 200 Гц с ускорением не более 10g, многократных ударах с ускорением до 35 g, одиночных ударах до 150 g и линейном ускорении до 100 g.

Соединители РП14 применяются в цепях с напряжением до 500 В и силой до 5 А. Условия эксплуатации их такие же, как и для РП10.

Соединители для плат с печатным монтажом приведены в табл. 5.5. Соединители РПС предназначены для соединений в цепях постоянного тока с напряжением до 700 В и переменного тока — 500 В, силой тока до 5 А на один контакт проводом сечением не более 0,5 мм². Они присоединяются к односторонним и двухсторонним печатным платам толщиной 1,5 и 3 мм. Условия эксплуатации их: температура от 213 до 423 К, относительная влажность 98% (при температуре 313 К), атмосферное давление не ниже 665 Па, выбирая с частотой от 5 до 200 Гц и ускорение до 10 g, удары с ускорением до 25 g и линейные ускорения до 50 g.

Низкочастотные разъемы МНР предназначены для работы в цепях низкой частоты с напряжением до 200 В и силой тока до 1 А. К розеткам припаивают провода, а вилки устанавливают и распаяют на печатную плату. Условия эксплуатации МНР такие же, как и для соединителей РПС.

Таблица 5.5. Электрические соединители для печатного монтажа

Тип	Эскиз	Количество контактов	Размеры, мм			
			A	L	L ₁	
РПС	<p>2 отв. $\Phi 3,5$ Розетка</p>	3	21	27	28	
		4	25	31	32	
		6	33	39	40	
	<p>2 отв. $\Phi 3$ Вилка I</p>	10	49	55	56	
		12	57	63	64	
		15	69	75	76	
		18	81	87	88	
		<p>2 отв. $\Phi 3$ Вилка II</p>	22	97	103	104
			28	121	127	128
	МРН	<p>2 отв. $\Phi 1,5$ Розетка</p>	4	20	28,5	28
			8	32	40,5	40
			14	50	58,5	58
<p>Вилка</p>		22	74	82,5	82	
		22	74	82,5	82	
ПС		<p>2 отв. $\Phi 3,5$ Розетка</p> <p>Вилка-печатная плата</p>	6	21	27	1,5
			8	29	31	1,5
			12	33	39	1,5
			16	41	47	1,5
			20	49	55	1,5
			24	57	63	1,5
			30	69	75	1,5
	36		81	87	1,5	
	44		97	103	1,5	
	56		121	127	3	
	60		129	135	3	
	70		149	155	3	

5.8. ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОМОНТАЖ И КАБЕЛЬНЫЕ ВВОДЫ

Для ввода внешнего кабеля в приборы используют типовые скобы, держатели, уплотнительные сальники или электрические соединители (рис. 5.11). Высокочастотные соединители применяют для ввода кабеля в приборы или непосредственно в блоки, на их лицевые панели.

Соединители для кабельных соединений приборов заключены в металлические корпуса герметичного или пыленепроницаемого исполнения. Они состоят из приборной части — вилки, устанавливаемой на прибор, и кабельной части — розетки, с арматурой для

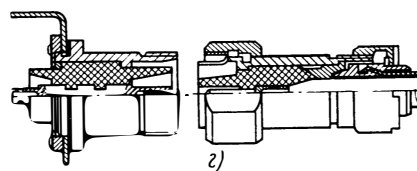
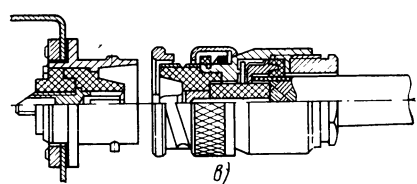
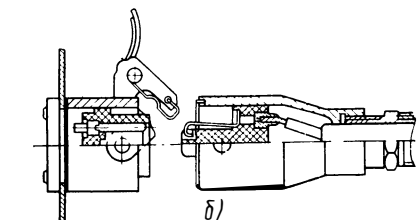
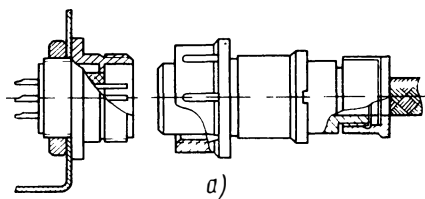


Рис. 5.11. Подключение приборов и стоек к внешнему кабелю соединителям

а — типа 2РМ; б — типа А; в — типа BTS; г — типа ВК и ГП

или угловой корпус. Могут эксплуатироваться при температуре окружающей среды от 213 до 358 К, относительной влажности до 98% (при температуре 313 К), атмосферном давлении не ниже 665 Па, вибрации в диапазоне частот 10—200 Гц с ускорением до 10 g, ударной нагрузке с ускорением до 50 g.

Высокочастотные электрические соединители BTS и РТС также состоят из двух частей — вилки и розетки. Для соединения вилки с розеткой используют переходные муфты с уплотнением, обеспечивающим пыле- и брызгозащитенность. Эксплуатация их возможна при температуре окружающей среды от 213 до 573 К, относительной влажности до 95—98% (при температуре 363 К), атмосферном давлении не ниже 1995 Па, вибрации в диапазоне частот 20—200 Гц с ускорением до 6 g, ударной нагрузке с ускорением до 25 g и центробежном ускорении до 15 g.

Корпуса соединителей обеспечивают крепление разъемных частей друг к другу, защиту контактных соединений от воздействий окружающей среды и экранировку соединительных проводников.

Для ввода в приборы высокочастотного кабеля используют соединители типов BTS, РТС, ВК, ГП и др.

Соединители 2РМ имеют корпус круглой формы с прямыми и угловыми вводами кабеля и предназначены для электрических цепей с напряжением до 500 В и силой тока до 18 А. Соединенные части закрепляются резьбовым кольцом. Внешний диаметр соединителей 2РМ зависит от числа пар контактов у вкладышей, размещенных в корпусе. Вкладыши изготавливают на 4, 7, 10, 15, 18, 19, 20, 22, 24, 32, 40 и 43 контакта.

Корпуса их защищены от пыли и брызг воды. Соединители могут работать в среде с внешним давлением не ниже 665 Па при температуре от 313 до 473 К, относительной влажности до 98% (при температуре 293 К), вибрации от 5 до 2500 Гц с ускорением до 30 g, ударах до 35 g и линейных ускорениях до 50 g.

Электрические соединители А предназначены для работы в электрических цепях с напряжением до 100—400 В и силой тока до 6 А при давлении не ниже 665 Па. Они имеют число контактных пар 6, 14, 20, прямой

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

6.1. РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ КАК СВОЙСТВО ИЗДЕЛИЯ

Ремонтопригодность есть свойство приспособленности изделия к обнаружению, устранению и предупреждению отказов и к выполнению ремонтов в течение заданного времени при полном обеспечении ремонтными средствами и запасными частями. Она является составной частью надежности. Аппаратура с высокой ремонтпригодностью позволяет проводить ее ремонты наиболее простыми средствами и с минимальными затратами со стороны обслуживающего персонала. Высокая ремонтпригодность увеличивает степень надежности аппаратуры, если время на ремонт будет меньше, чем это предусмотрено вероятностью устранения отказа.

Ремонт аппаратуры во время эксплуатации состоит из двух видов — текущего и профилактического. Текущий ремонт производится при обнаружении неисправности, которую необходимо устранить на месте для восстановления работоспособности аппаратуры.

Профилактический ремонт состоит из ряда регламентных работ, объем и сроки исполнения которых заранее предусматриваются для данной аппаратуры. Такой вид ремонта состоит из периодической регулировки, подстройки, чистки, смазки, а также замены некоторых деталей, срок службы которых истек, независимо от их фактического состояния. Во время профилактического ремонта устраняются все замеченные неисправности. Профилактический ремонт в значительной мере предупреждает текущий, а его качество оказывает большое влияние на повторяемость и среднюю продолжительность времени проведения текущего ремонта. Этими двумя видами ремонта и обуславливается техническое обслуживание аппаратуры, задачей которого является обеспечение предусмотренных для аппаратуры условий эксплуатации, устранение обнаруженных неисправностей и предупреждение их возникновения.

Ремонтопригодность определяется:

- средствами проверки функциональных и параметрических величин системы;
- временем, необходимым для отыскания места неисправности и выяснения ее характера;
- доступом к сменным узлам с минимальной затратой времени;
- взаимозаменяемостью узлов и удобством их замены;
- обеспеченностью и состоянием ремонтного инструмента и оборудования;
- укомплектованностью запасными частями и принадлежностями;
- условиями размещения аппаратуры в аппаратных помещениях (отсеках, рубках, кабинах, кузовах автомашин и т. д.).

Восстановление надежности может производиться при самых неблагоприятных условиях, например в полевых условиях при плохой погоде, на стартовых площадках при ограниченном времени готовности, на воздушных линиях в условиях временных аэродромов, на корабле в штормовую погоду, на автомашине в условиях бездорожья и т. д. Поэтому обеспечение оперативного доступа к сменным узлам аппаратуры и удобство замены вышедших из строя элементов с учетом наиболее неблагоприятных условий эксплуатации являются одной из главных задач конструктора.

Ремонтопригодность заранее не может быть задана в определенной количественной форме. Однако ее уровень уже достаточно точно может быть определен такими показателями, как вероятность отказов, готовность системы к работе и время выполнения работ по восстановлению надежности.

6.2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ

В 30-х годах весь ремонт радиоаппаратуры выполнялся самим обслуживающим персоналом с помощью несложного инструмента и общедоступных измерительных приборов. Отыскание неисправности производилось преимущественно визуально и заключалось в обнаружении перегоревших нитей накала у вакуумных ламп, перегоревших резисторов, трансформаторов, пробитых или вытекших конденсаторов. Использование измерительных приборов ограничивалось проверкой напряжения, силы тока, степени изоляции и наличия простого сигнала.

В 40-х годах внедрение в аппаратуру металлических ламп в основном не изменило положения и лишь отыскание неисправности их производилось на ощупь: холодная — значит вышла из строя, горячая — еще работает. С распространением дальней связи, радиолокации, телевидения, счетно-решающей техники, по мере усложнения РЭА вопросы обнаружения и устранения неисправности становились все более важными и трудоемкими. Это положение привело к разделению обслуживающего персонала на работников, занимающихся восстановительным ремонтом аппаратуры, и операторов, использующих аппаратуру. Стали все более необходимыми совершенная техника отыскания неисправности и опытные радиотехники, способные выполнять сложные ремонтные работы.

При внедрении миниатюризации компоновка аппаратуры стала более плотной, вместе с этим возросли и трудности обеспечения ее ремонтопригодности. Визуальные признаки неисправности стали более скрытыми, отказы элементов — зависимыми, а используемые измерительные приборы вносили разрушение в изделие. Это настолько усложнило задачу отыскания неисправности и ремонта, что вопросы ремонтопригодности вновь разрабатываемой РЭА стали на первое место. Конструкторам удалось упростить эту задачу модульным построением структуры РЭА и превращением трехмерных модульных конструкций в плоские, двухмерные. Появилась целесообразность замены не отдельных отказавших элементов, а целых

модулей и даже узлов, в которых вышел из строя хотя бы один схемный элемент. Вместе с тем стали широко внедрять централизованный контроль основных параметров и отыскание мест неисправности — вначале ручной, использующий панели с контрольными точками, потом полуавтоматический со встроенными в аппаратуру предельными измерителями и, наконец, автоматический. Эти меры позволили сократить время восстановительного ремонта и сделать реально выполнимыми качественные требования ремонтпригодности.

В процессе дальнейшей миниатюризации РЭА и совершенствования модулей на базе развития техники тонких пленок и создания вначале корпусированных, а потом и бескорпусных полупроводниковых элементов в РЭА начали широко использовать гибридные интегральные микросхемы, а вслед за ними и полупроводниковые микросхемы, выполненные на базе кристаллической техники и планарно-эпитаксиальной технологии. Изготовленные таким способом микросхемы уже не поддавались ремонту, а вышедшие из строя заменялись новыми.

Выпуск промышленностью в необходимых количествах и ассортиментах типовых ИМ, освоение технологии многослойного печатного монтажа послужили предпосылками к созданию РЭА с более высокой ремонтпригодностью. Последние анализы ее показывают, что длительность определения и поиска неисправности превышает длительность восстановительного ремонта.

6.3. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПРИЗНАКИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Уровень ремонтпригодности предусматривают на ранней стадии проектирования — при компоновке изделия и в том объеме, как это требуют технические условия. Компоновка производится с учетом основного принципа ремонтпригодности — взаимозаменяемости и доступа к сменным узлам. Там, где должен быть обеспечен общий доступ, предусматривают съемные дверцы, кожухи, откидные панели и заслонки. Доступ может оказаться ограниченным, если не будут заранее учтены углы обзора, размеры рабочей зоны и ее освещение. При наличии обзора мест ремонта с обеспечением прямой видимости выполняемых операций доступность значительно улучшается.

Используют корпуса приборов, стоек и шкафов систем РЭА унифицированной конструкции с типовым расположением в них блоков, рам или панелей. У приборных шкафов более удобными считаются съемные передние дверцы, а не закрепленные на петлях. При закрепленных дверцах крышки смежных шкафов делают открывающимися в разные стороны. На внутренней стороне дверец, в свободном и удобном для исполняющего ремонт месте, закрепляют съемники-рукоятки, схемы расположения блоков и узлов, схемы присоединения внешнего кабеля, а также необходимые для обслуживания и ремонта указания. На лицевой стороне дверец и панелей принятым шрифром наносят маркировку, поясняющую принадлежность или функциональность стойки и перечень находящихся под этой крышкой блоков. Обозначения шрифром должны точно соответствовать расшифровке, указанной в инструкции по эксплуатации. Крышки и панели унифицированной конструкции легко снимаются и переносятся одним человеком. К корпусам они закрепляются быстро раскрывающимися замками, застегками или фиксаторами. Крышки с винтовым креплением не являются быстросъемными и применяются в исключительных случаях. Необходимо учитывать также, что время, затрачиваемое на восстановительный ремонт, зависит и от различных «мелочей», например от надежности выключателей, бло-

кирующих устройств, фиксаторов, захватов, замков, защитных ограждений и т. п.

Узлы и блоки стремятся компоновать в плоскую форму, хорошо доступную для осмотра и ремонта. При размещении в блоках их располагают правильными рядами. Установку блоков в стойку удобнее выполнять с лицевой стороны в горизонтальном направлении по направляющим. В глубине корпуса стойки располагают межблочный электромонтаж и гнезда соединителей. Круговой доступ к блокам образуется при выдвинутом и раскрытом (или развернутом) состоянии. Вышедшие из строя сменные узлы, размещенные в блоках, заменяются на месте эксплуатации, как правило, без разборки элементов конструкции. Замена производится вручную или с помощью ключа-рукоятки. Удобные условия для технической диагностики и ремонта узлов, выполняющих одни и те же функции, создают размещением их в одном блоке. Узлы с различными функциями, имеющие типовую конструкцию и одинаковые посадочные места, лишают взаимозаменяемости с помощью дополнительных штифтов, устанавливаемых индивидуально. Таким способом исключается ошибочное включение их в блоке.

Электромонтаж аппаратуры не должен служить помехой при выполнении ремонта. Трассы электромонтажных жгутов укладываются в местах, доступных для ремонта. Провода предохраняют от случайных повреждений, соблюдая рекомендации, приведенные в гл. 5. В тех местах, где доступ без разборки не может быть обеспечен, контроль за состоянием проводов осуществляется с помощью контрольных точек. Длина гибких монтажных жгутов от выдвигающихся блоков на корпус прибора определяется условиями, исключающими натяжение проводов, изгиб их под острым углом или трение об острые кромки и выступы тонкостенных узлов несущей конструкции. В электрических соединителях и соединительных платах кроме контактов, занятых проводниками, предусматривают 10% свободных (запасных) контактов.

Электрические соединители устанавливают лишь там, где аппаратура должна быть быстросъемной и взаимозаменяемой. Места присоединений проводов должны хорошо просматриваться, иметь автоматическую фиксацию правильно включения, допускать возможность смены отдельных штырей и гнезд и иметь маркировку контактов.

Защита аппаратуры от разрушающего действия электрических перегрузок или коротких замыканий осуществляется использованием в цепях плавких предохранителей или выключающих автоматов, установленных на оба проводника. Элементы защиты размещают на щитах питания, в распределительных устройствах или на входе в прибор. Контроль за состоянием предохранителей осуществляется сигнальными устройствами с неоновыми лампами, устанавливаемыми на лицевых панелях. Плавкие вставки, корпуса предохранителей или автоматы используются только стандартного типа и по возможности с узкой градацией по типоразмерам. Маркировка защитных элементов производится по функциональным признакам защиты.

Безопасность ремонта, так же как и защита аппаратуры, оказывает на ремонтпригодность существенное влияние. При соблюдении всех мер безопасности в обращении с аппаратурой ее ремонт протекает спокойно и точно. Безопасность обеспечивается в первую очередь своевременным отключением напряжения питания, установкой защитных ограждений опасных мест, использованием элементов, гасящих напряжения заряда, отсутствием острых кромок и углов несущей конструкции.

6.4. КРИТЕРИИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Объем работ по восстановлению безотказности системы в достаточной степени характеризуется вероятностью отказа и средним временем ремонта, затрачиваемым на один отказ.

Если вероятность безотказной (исправной) работы системы находится в пределах $Q(t) \leq P_i(t) \leq 1$, то очевидно, что вероятность

противоположного события — вероятность отказа $Q(t)$ может быть записана в виде

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (6.1)$$

На основании теории надежности $P(t) = e^{-\lambda t}$. Поэтому

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (6.2)$$

где P — вероятность безотказной работы; λ — интенсивность отказов; t — время безотказной работы системы.

Когда задано среднее время ремонтов аппаратуры, приходящееся на один отказ, с помощью вероятности отказа можно аналитически определить то время, которое система должна находиться в состоянии ремонта. Например, предположим, что вероятность безотказной работы в течении 100 ч задана равной 0,99. Если система состоит из 1000 элементов, то в течении исходного времени, вероятно, выйдет из строя 0,01 их часть [$Q(t) = 1 - 0,99 = 0,01$], что составляет 10 элементов, которые могут вызвать 10 отказов. Если нам известно среднее время ремонта на один отказ $t_{\text{в}}$, то на устранение 10 отказов понадобится время, равное $10t_{\text{в}}$.

Таким образом, среднее время ремонтов аппаратуры на один отказ определяется общим временем ремонтов и количеством отказов за определенный промежуток времени. Эта характеристика является основным критерием ремонтпригодности.

При отказе аппаратуры восстановление ее безотказности производится исполнением ряда последовательных однотипных операций:

а) обнаружением неисправности и отключением неисправного участка с затратой времени t_1 ;

б) вскрытием доступа к неисправному участку и отысканием неисправного узла t_2 ;

в) восстановлением его работоспособности (извлечение запасного из ЗИПа, изъятие вышедшего из строя, установка запасного узла на место) t_3 ;

г) послеремонтная проверка готовности к работе t_4 ;

д) настройка, регулировка или калибровка параметров, закрытие прибора и пуск системы в работу t_5 .

Общее время, затраченное на ремонт $T_{\text{р}}$, составляет сумму времени, затраченного на перечисленные пять операций,

$$T_{\text{р}} = \sum_{i=1}^{n=5} t_i.$$

Длительность ремонта на один отказ в каждом случае не будет одинаковой. Она будет изменяться в зависимости от сложности отказавшего узла, области его доступности, трудности изъятия, сложности регулировки и проверки. Однако, если время ремонтов расчленить на ряд более простых операций, некоторые из них окажутся постоянными для всех случаев, тогда как другие операции будут зависеть лишь от типа заменяемого узла.

Анализируя результаты статистики всевозможных случаев, ремонта, можно определить среднее время восстановления безотказности аппаратуры на один отказ

$$t_{\text{в}} = \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) / n, \quad (6.3)$$

где t_i — время, затраченное на устранение i -го отказа; n — количество отказов за определенный промежуток времени.

Связь между надежностью и ремонтпригодностью характеризуется также и коэффициентом готовности аппаратуры к работе $K_{\text{Г}}$, который определяется отношением среднего времени исправной работы на один отказ T_0 к сумме этого времени и среднего времени восстановления этой системы на один отказ

$$K_{\text{Г}} = T_0 / (T_0 + t_{\text{в}}). \quad (6.4)$$

Коэффициент вынужденного простоя (бездействия) аппаратуры из-за ремонтов $K_{\text{П}}$ будет определяться отношением среднего времени восстановленного ремонта на один отказ к сумме исправной работы системы и среднего времени ее восстановления:

$$K_{\text{П}} = t_{\text{в}} / (T_0 + t_{\text{в}}), \quad (6.5)$$

при этом $K_{\text{Г}} + K_{\text{П}} = 1$.

6.5. МЕРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Наиболее совершенной надо считать конструкцию, которая одновременно с большой надежностью имеет минимальные габаритные размеры, массу и высокую ремонтпригодность. Между этими противоречивыми качествами с большим трудом можно найти соответствие, отвечающее оптимальному решению. Высокая ремонтпригодность отличается отсутствием сложных установочных манипуляций, дополнительных электромонтажных работ, длительных разборочных операций и большого количества винтовых креплений. Одним из главных качеств ремонтпригодности является несложность обслуживания, простота и оперативность операций восстановительного ремонта.

Многие конструктивные решения, обеспечивающие высокую ремонтпригодность, являются общими для РЭА, используемой на различных объектах. Требования к ремонтпригодности в этом случае будут различаться по условиям эксплуатации. Например, самолетная РЭА будет отличаться от корабельной быстросъемностью самих приборов, в то время как ремонт корабельной РЭА выполняется на месте и поэтому приборы имеют стационарное крепление.

В сложной РЭА доступ к сменным узлам осуществляется за счет предварительного исполнения различных механических операций, таких как снятие крышек, откидывание панелей, выдвигание блоков, открывание запоров, заслонок, блокировочных приспособлений. Большое количество таких действий выполняется обслуживающим персоналом быстро и безошибочно в том случае, если необходимые манипуляции обозначены в виде соответствующих поясняющих надписей, размещаемых в соответствующих местах. Надписи или указания должны быть лаконичными и ясными, например «Повернуть влево», «Откинуть на себя», «Снять с упора», «Установить фиксатор», «Затянуть тягу стопора» и т. д.

При разработке РЭА оперативный доступ к сменным узлам в обеспечении ремонтпригодности играет наиболее важную роль. Большое разнообразие конструктивных мер, направленных на обеспечение доступа, не может быть отнесено к положительным качествам аппаратуры. Разнообразие мер, выполняющих одни и те же функции, сказывается отрицательно не только на технологи-

чности изделия, но и на его ремонтпригодности, неизбежно усложняя процессы ремонта. Из большого числа разнообразно решаемых способов обеспечения доступа к сменным узлам минимальными и достаточными могут служить следующие пять (рис. 6.1).

Первый способ наиболее простой, обеспечивающий доступ к блокам без снятия их со своих мест крепления за счет съема крышек и кожухов прибора. Этот способ применяют в одноблочных приборах и приборах малого размера.

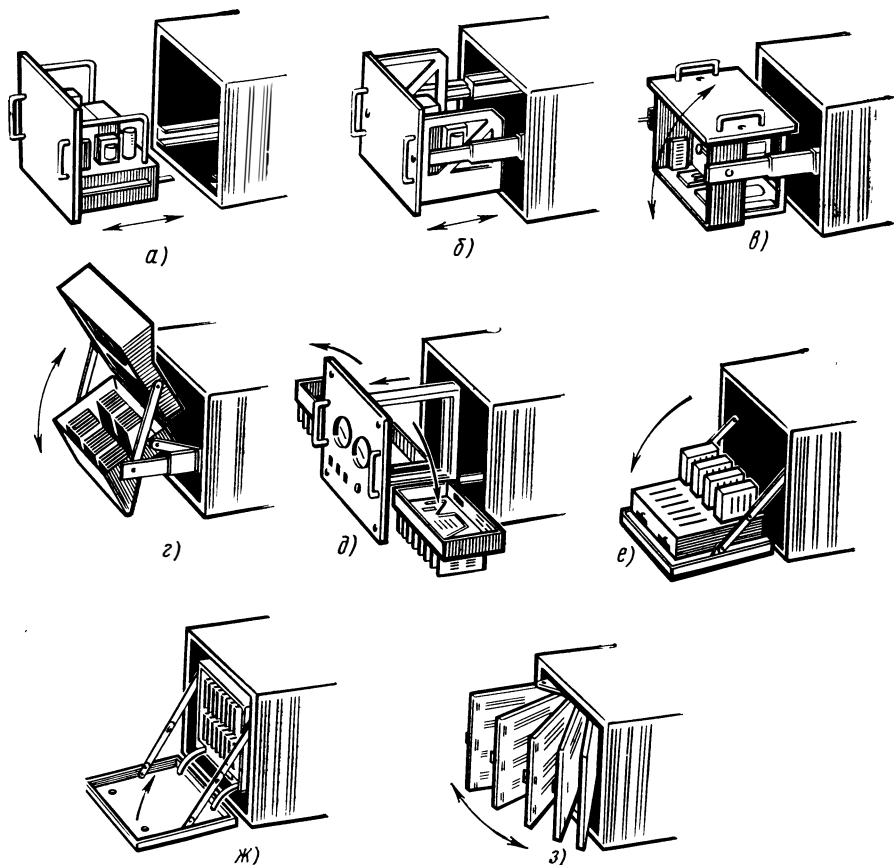


Рис. 6.1. Конструктивные способы обеспечения доступа к блокам и сменным узлам

Второй способ (рис. 6.1,а) предусматривает обеспечение доступа к элементам блоков, когда последние освобождаются от креплений и снимаются с прибора. В этом случае блоки компонуют на горизонтальных шасси или делают в касетном исполнении с электрическими соединителями на задней плоскости. Координаты установки блока и гнезд соединителей на корпусе прибора должны быть строго согласованы по базовым размерам с местом крепления вилок соединителей на блоках. Надежное совпадение гнезд и вилок и контакт в тяжелых условиях эксплуатации обеспечивают установкой дополнительных конусных штырей-фиксаторов на блоках и гнезд-ловителей на корпусе прибора.

Третий способ (рис. 6.1,б) применяют в блоках, выдвигающихся из корпуса прибора. Такие блоки устанавливают на направляющих полозах, состоящих из

двух частей. Одна часть полоза закреплена на корпусе прибора, другая — на шасси блока. Связь блоков с электрическим монтажом всего прибора осуществляют проводниками в виде гибкого жгута, который присоединяется к блоку через электрические соединители или поджимается под винты присоединительных монтажных плат.

Четвертый способ (рис. 6.1,з) применяют для группы блоков с горизонтальными шасси, которые устанавливаются в выгородках корпуса прибора на телескопических направляющих. Направляющие позволяют не только выдвигать блоки, но и разворачивать их на 90°.

При этом нижнее основание шасси блока, где в основном располагаются радиоэлементы и электрический монтаж, становится легко доступным. На боковых стенках шасси имеются цапфы или крепежные планки, которыми блоки опираются на направляющие. Блоки часто выполняют раздвигающимися, как это показано на рис. 6.1,з.

Удобный доступ к элементам может быть обеспечен и конструкцией блока, представляющего собой вертикальную раму, устанавливаемую в отсеке приборного корпуса в направляющих пазах. Субблоки, установленные по обе стороны рамы, при выдвинутом состоянии ее могут быть еще откинuty вниз на 90° (рис. 6.1,д). Каждый субблок прикреплен к раме двумя невыпадающими винтами и снизу — шарнирными винтами.

При выдвинутом блоке доступ к электроэлементам обеспечивается со всех сторон, а при откинутых субблоках оказывается открытым и весь электромонтаж с дискретными радиоэлементами. Здесь электрическая связь блока с межблочным электромонтажом осуществляется гибкими жгутами. Для предохранения блока от самопроизвольного выпадания в выдвинутом положении в направляющих пазах рамы предусмотрены ограничители.

Пятый способ (рис. 6.1,е) включает установку блоков, откидывающихся из корпуса прибора с фиксацией этого положения ограничителями. Если шасси блока соединить с лицевой панелью шарнирами, то блок можно вторично развернуть относительно панели внутрь корпуса (рис. 6.1,ж), что позволяет обеспечить доступ к этим блокам и снизу.

К этому же способу необходимо отнести также вариант откидывания блоков и субблоков, скомпонованных в виде плат, расположенных в несколько рядов один над другим (рис. 6.1,з). Каждый такой ряд установлен на шарнирных петлях; разворачивая его, открывают доступ поочередно к любой плоскости платы, как это делается с книжными листами.

Вариант конструкции приборной стойки, предусматривающий одновременный доступ к группе моноблоков, выдвинутых и развернутых в сторону относительно средней секции, показан на рис. 6.2. Моноблоки размещены в стойке по всей высоте и имеют форму параллелепипеда, сравнительно узкого по ши-

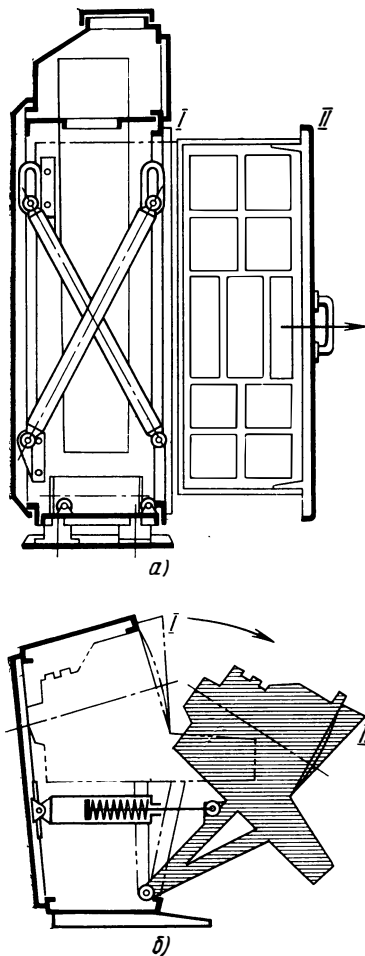


Рис. 6.2. Примеры обеспечения доступа к сменным узлам при выдвинутых моноблоках (а) и откинутой консоли пульта (б)

рине, с высотой и глубиной, определяемыми размерами стойки. Моноблоки закреплены на общей платформе, которая в свою очередь крепится к корпусу стойки двумя парами шарниров типа «ножниц».

При откидывании вниз тяжелых блоков (консолей пультов) часто используют пружинные тяги, компенсирующие массу откидываемых частей (рис. 6.2,б). Компенсаторы имеют приспособление, позволяющее момент, создаваемый пружинами, уравнивать опрокидывающим моментом блока.

Рассмотренные способы обеспечения ремонтпригодности блоков используются и при разработке доступа к сменным узлам.

6.6. СИСТЕМЫ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ И ОТЫСКАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Системы контроля и отыскания неисправностей могут быть ручными, полуавтоматическими и автоматическими, автономными или встроенными в контролируемую РЭА. Автономная система комплектуется из отдельных приборов, встроенная представляет собой конструктивно единое целое с контролируемой РЭА (рис. 6.3). Ручной контроль параметров применяется в сравнительно несложных приборах, полуавтоматический — в аппаратуре средней сложности. В сложной РЭА наиболее распространен автоматический способ контроля.

Контрольно-измерительная аппаратура должна обеспечивать исполнение всех функций контроля РЭА независимо от отказа какого-либо из ее элементов. Она охватывает контроль основных параметров РЭА, входные и выходные данные каждого сменного узла и наиболее ответственные связи. В комплекте контрольно-измерительной аппаратуры широко используют измерительные приборы, индикаторы, осциллографы, селекторные шаговые искатели и магнитоуправляемые контакты. Точки РЭА, к которым подключается контрольно-измерительная аппаратура, называются контрольными и делятся на основные, промежуточные и вспомогательные. К основным относятся

контрольные точки на входе и выходе сменных узлов, на электрических соединителях, а также на основных выносных (наружных) приборах системы. Любая неисправность, возникшая в системе, определяется без снятия каких-либо контролируемых узлов.

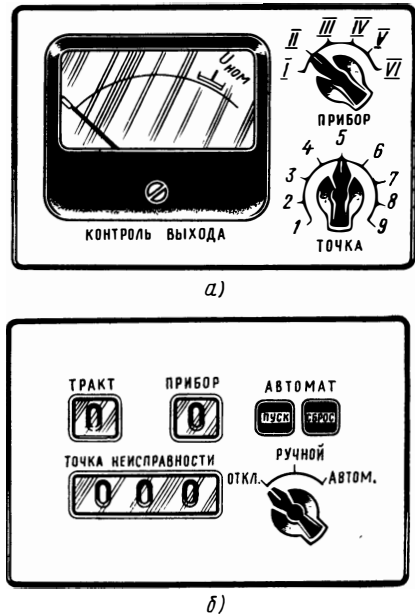


Рис. 6.3. Общий вид панели контроля и поиска неисправностей радиоэлектронных систем
а — для ручного поиска; б — для автоматического поиска

На контрольных панелях монтируют органы контроля, ручное управление и сигнальные устройства. Во время работы системы лицевые панели встроенного контроля остаются закрытыми легкими крышками или шторками, чтобы не отвлекать внимание оператора от основной его работы. Открытыми остаются лишь устройства, сигнализирующие о неисправности. На лицевой панели размещают и элементы контроля неисправности самих контрольных устройств. Для регистрации времени работы РЭА и ее простоя (во время восстановительного ремонта) на контрольных панелях устанавливают счетчики наработки и контрольные часы.

Ручной контроль применяется в несложных приборах и производится с помощью комплекта контрольно-измерительных приборов, хранящихся в ЗИП, или с помощью встроенной контрольной панели с измерительными многопозиционными переключателями, связанными с контрольными точками РЭА.

Полуавтоматический контроль применяется в РЭА средней сложности. Он запускается в работу ручным способом при наличии сигнала о неисправности, снимаемого с индикаторов. С помощью контрольной панели выполняются послеремонтные проверочные и калибровочные работы.

Автоматические устройства встроенного контроля обнаруживают вышедшие из строя узлы системы, включают взамен их резервные, регистрируют это включение в памяти, контролируют все режимы работы, обеспечивают необходимые регулировки или информируют оператора о выходе параметров за пределы допуска. Система встроенного контроля должна иметь более высокую надежность, чем основная РЭА. Ее безотказность обуславливается также количеством контролируемых точек, количеством элементов и объемом резервирования.

6.7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ АППАРАТУРЫ НА ОБЪЕКТЕ

Требования к аппаратным помещениям. Ремонтпригодность аппаратуры зависит в первую очередь от условий размещения ее в помещении и состояния окружающей среды.

Проектирование аппаратных помещений и размещение аппаратуры производятся с учетом всех факторов, способствующих успешной деятельности обслуживающего персонала. Такие помещения должны отвечать нормам эксплуатации аппаратуры, гигиены труда, требованиям инженерной психологии и технической эстетики. В задании на оборудование помещений кроме указанных требований должны быть включены требования к размещению, монтажу и закреплению приборов и оборудования на месте.

Общая площадь аппаратного помещения определяется суммой площадей всех функциональных зон. Сюда входят: зона активного управления, где располагаются пульт управления, щиты информации, приборы связи и магнитной записи; зона периодического обслуживания, занимаемая приборами записи, счетчиками,

пусковыми устройствами и т. д.; зона расположения необслуживаемых приборов; зона отдыха с журнальным столиком, креслами и телефоном; зона служебных проходов и подходов к приборам для осмотра и ремонта вместе с объемами, занимаемыми открывающимися крышками, дверцами и выдвигающимися блоками и, наконец, зона доступа для монтажа и закрепления приборов на месте.

Перечисленные зоны могут быть объединены между собой или совмещены, если один и тот же объем используют для выполнения двух или более функций.

Зона обслуживания. Всякое производство работ, связанное с техническим обслуживанием аппаратуры, требует прежде всего наличия некоторого пространства (зоны обслуживания) для обеспечения доступа к элементам конструкции.

Проходы между приборными стойками при нормальном размещении их в помещении должны быть не менее 600 мм.

Размещение аппаратуры должно способствовать поддержанию чистоты, исключить возможность травм обслуживающего персонала, учитывать степень возможных колебаний аппаратуры, установленной на амортизаторах, и т. д. Определение минимальных размеров зон обслуживания производится в зависимости от характера конструкции аппаратуры и необходимости ее ремонтов на месте, а также частоты этих ремонтов, доступа к месту присоединения кабеля, вентиляционных патрубков, амортизаторов и крепления приборов.

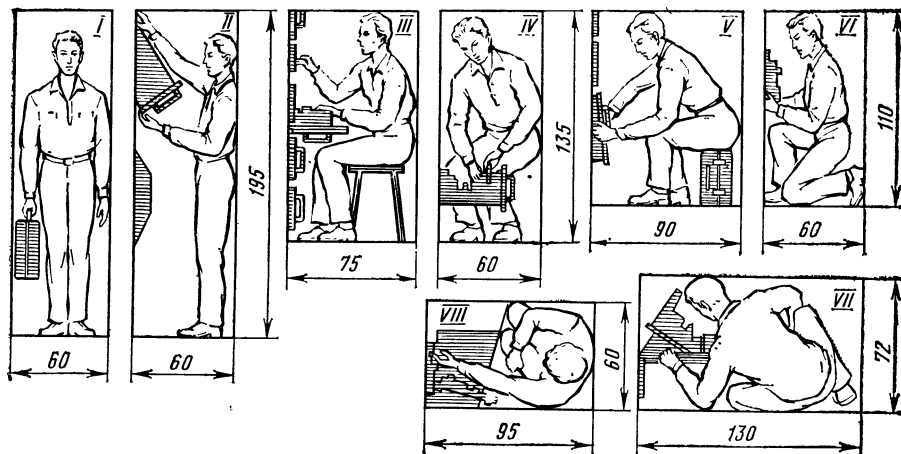


Рис. 6.4. Минимально необходимые объемы зон ремонта в зависимости от рабочего положения техника, выполняющего ремонт

При ремонте аппаратуры на месте техник может находиться в самых различных положениях, каждое из которых конкретно определяет размеры необходимой зоны обслуживания (рис. 6.4).

Сделаем выводы:

при проходе с инструментом или в положении стоя перед прибором во весь рост (поз. I, II) оператор занимает объем, примерно равный 0,9 м³;

сидя на стуле перед прибором (поз. III) — 0,6 м³;

стоя и сидя согнувшись (поз. IV, V) — 0,5 м³;

стоя на коленях (поз. VI) — 0,4 м³;

лежа на полу (поз. VII, VIII) — 0,6 м³.

Пространством обслуживания приборной стойки с лицевой стороны надо считать объем, примерно равный 0,9 м³. Однако практически этот объем следует увеличивать с учетом выдвигающихся и откидывающихся блоков в сторону зоны обслуживания.

При размещении аппаратуры в малых помещениях доступ к блокам, как правило, обеспечивают лишь спереди. При этом стремятся многократно использовать одну и ту же зону обслуживания, например зону, предусмотренную для установки прибора, выполнения ремонта, или общие проходы в помещении, образованные между приборами.

Оценка компактности размещения аппаратуры производится по коэффициенту установки η_a , определяемому отношением площади (или объема) помещения, занятого аппаратурой с учетом всех зон обслуживания; $S_{пл}$, к площади (объему), занимаемой собственно приборами, $S_{пр}$, т. е. $\eta_a = S_{пл}/S_{пр}$, или

$$\eta_a = \frac{V_a + V_a + V_{п}}{V_a} = 1 + \frac{V_a + V_{п}}{V_a}, \quad (6.6)$$

где V_a — объем аппаратуры; V_a — объем зоны обслуживания; $V_{п}$ — объем зоны, необходимой для монтажа, установки приборов и ремонта.

Коэффициент установки всегда больше единицы, что показывает, во сколько раз необходимый объем помещения будет больше объема размещаемой аппаратуры.

Размещение аппаратуры в аппаратных помещениях. Непрерывный рост сложности выполняемых РЭА функций вызывает постоянное увеличение аппаратных помещений. Так, например, для нормального размещения ЭВМ «БЭСМ-1» требовалось 100 м², а для ее улучшенного образца «БЭСМ-6» — 225 м². Или, если ЭВМ «Урал-1» ранее размещалась на площади 70 м², то ее новая модель «Урал-14Д» — на площади 180 м² и т. д. Это обстоятельство ставит по-новому вопросы рационального использования объемов или площадей, отводимых под аппаратуру.

При размещении приборов учитывают характер функциональных связей между ними, а также необходимость обеспечения наиболее экономичных и правильно чередующихся движений обслуживающего персонала при работе с аппаратурой.

Вопросы, связанные с размещением аппаратуры в аппаратных помещениях, выясняются и согласовываются на этапе разработки рабочих чертежей РЭА. Одновременно уточняются и объемы работ, которые необходимо выполнить по оборудованию помещения,

рабочих мест, подготовке площадок для крепления приборов, прокладке кабельных трасс, установке системы вентиляции, освещению, организации мест ремонта и хранения запасных частей и инструмента.

При размещении аппаратуры учитывают максимальные углы обзора, необходимые подходы к приборам для обслуживания и ремонтных работ, а также зоны отдыха. Наиболее просто решаются вопросы размещения небольшой по объему РЭА в просторном, светлом и вентилируемом помещении, как это показано на рис. 6.5. В этих условиях сравнительно простыми средствами можно создать в помещении приятный интерьер и хорошую обстановку.

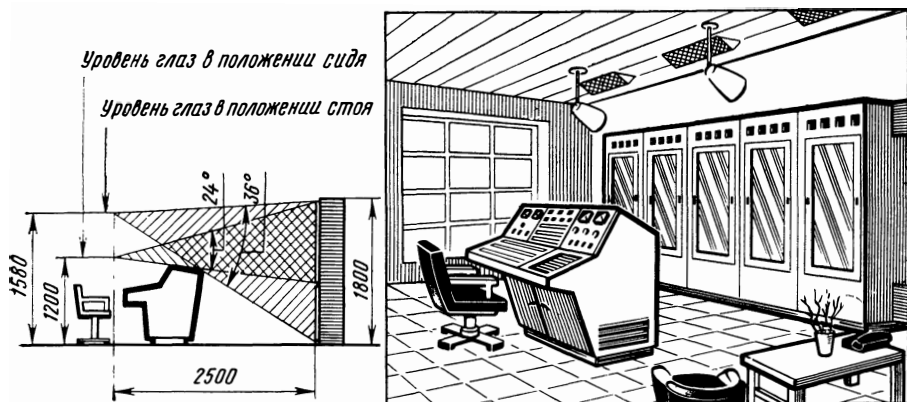


Рис. 6.5. Схема наблюдения за панелями и размещение радиоэлектронной системы в помещении при соблюдении высокой ремонтпригодности

Размещение аппаратуры, учитывающее нормальные условия эксплуатации и ремонта в тесном помещении, представляет собой более сложную задачу. Пример размещения РЭА в помещении отсека корабля приведен на рис. 6.6. В таком помещении обязательны кондиционирование воздуха, изоляция помещения от шумов, нормальное освещение и отделка, учитывающая окружающие условия. В отличие от аппаратуры, размещаемой в стационарных помещениях, на подвижных объектах ее надежно закрепляют к основанию или к переборке через амортизаторы. Так же устанавливают и дополнительное оборудование: столы, кресла, запасные части и т. д.

Возимую РЭА (измерительную, радиолокационную, телевизионную и др.) размещают в специально оборудованных закрытых кузовах или кузовах автобусного типа. Размещение РЭА, возимой в специально оборудованном для этого кузове, показано на рис. 6.7. Стойки с РЭА в кузове размещают в один ряд вдоль бортов или в центре в два ряда, обеспечивая нормальное обслуживание и ремонт аппаратуры. Применение однотипных многоблочных унифицированных конструкций перспективно при разработке

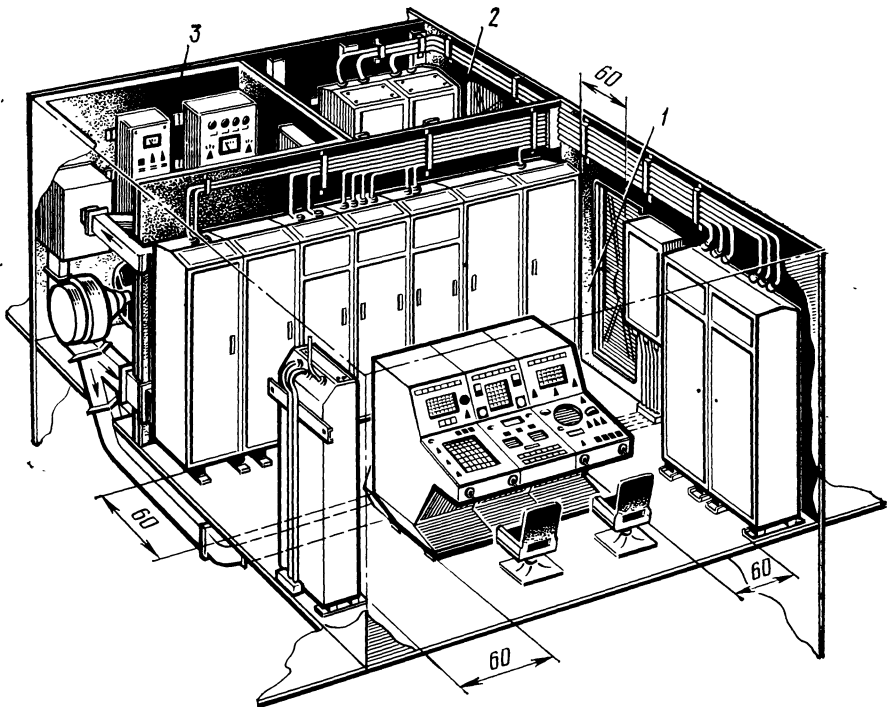


Рис. 6.6. Пример обеспечения доступа к приборам при ремонте радиоэлектронных систем, размещенных в отсеке корабля
 1 — аппаратная; 2 — генераторная; 3 — вентиляционная и ЗИП

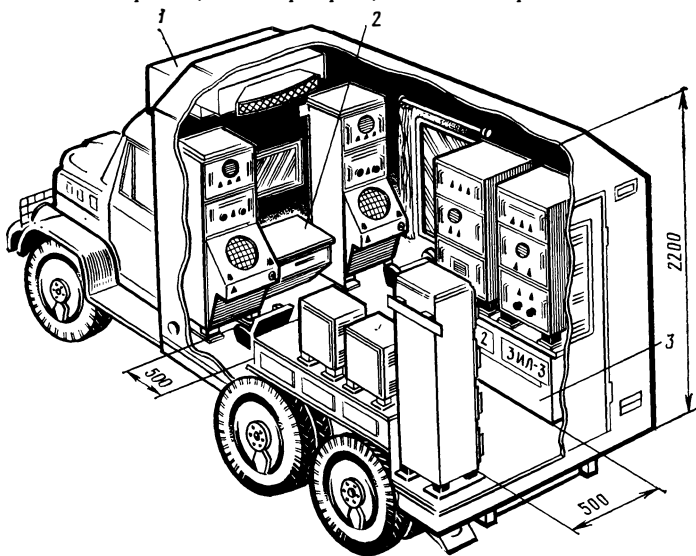


Рис. 6.7. Пример размещения комплекса РЭА в кузове автомашины для удобства ремонта:
 1 — кондиционер; 2 — рабочее место оператора; 3 — ЗИП

возимой РЭА. Максимальный полезный объем кузова автомашины может быть обеспечен до 60 м³, а масса устанавливаемой РЭА до 10 т [10].

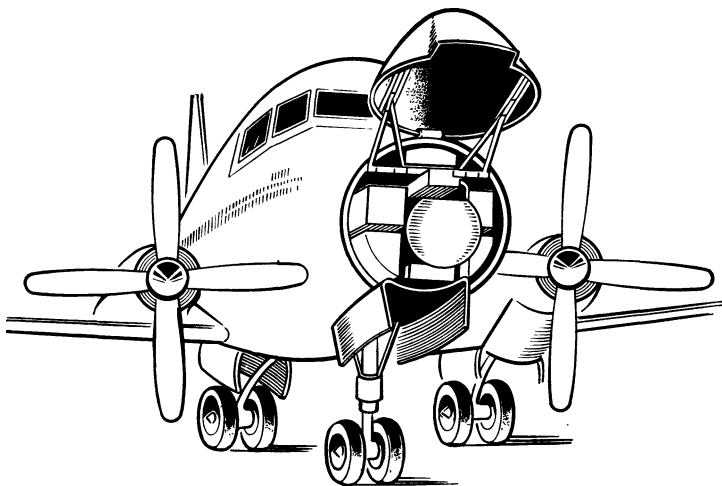


Рис. 6.8. Пример обеспечения доступа к РЭА, размещенной в носовом отсеке самолета

В самолетах РЭА размещается в служебных салонах, радиорубках или специальных отсеках. Аппаратура в централизованном исполнении размещается в контейнерах или под обтекателями (рис. 6.8). Контейнеры по своей геометрической форме повторяют обводы помещения или образуют отдельные конструктивно оправданные отсеки.

6.8. КОМПЛЕКТАЦИЯ СИСТЕМ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ, ИНСТРУМЕНТОМ И ПРИНАДЛЕЖНОСТЯМИ

Комплект запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИП) входит в состав каждой системы и обеспечивает требуемую надежность резервированием при эксплуатации аппаратуры вдали от баз снабжения.

Объем ЗИП определяется заданной надежностью и сложностью изделия. В состав ЗИП входят:

- а) сменные узлы или блоки, отдельные элементы и детали конструкции изделия;
- б) комплект общего и специального ремонтного инструмента;
- в) принадлежности, используемые во время эксплуатации и восстановительного ремонта аппаратуры;
- г) контрольно-измерительная аппаратура для регулировки или проверки режимов работы системы после восстановительного ремонта.

По назначению ЗИП делят на:

одиначный (ЗИП текущего ремонта), входящий в состав изделия и предназначенный для поддержания эксплуатационной надежности аппаратуры. Этот ЗИП размещается непосредственно с изделием и по мере использования пополняется в соответствии с его описью;

групповой (базовый), предназначенный для среднего (планового) ремонта с целью обеспечения долговечности аппаратуры. Такой ЗИП рассчитывается на группу изделий и в отличие от одиночного комплектуется укрупненными блока-

ми, узлами и деталями, предназначенными для замены изношенных и пришедших в негодность (не восстанавливаемых) частей аппаратуры:

ремонтный, предназначенный для капитального ремонта изделий, когда восстанавливаются не только пришедшие в негодность части или узлы, обеспечивающие ремонтпригодность, но и заменяются износившиеся отдельные приборы с целью увеличения долговечности всей системы.

Упаковка ЗИП должна производиться с учетом требований и правил защиты от воздействия климатических и механических факторов той аппаратуры, для которой он предназначен. Весь ЗИП размещают в укладочные ящики, стойки или футляры. Укладочные ящики внутри разбиты на гнезда, в которых размещены элементы ЗИП. На крышке ящика имеется карман для хранения описи укладываемого ЗИП. Каждому укладочному ящику присваивают свой номер по общей описи. Гнезда отдельного ящика также маркируются по описи ЗИП ящика.

При укладке запасных частей в укладочный ящик также используют отдельные коробки, пеналы и футляры. Крупногабаритные запасные части укладывают в ящики специальной конструкции.

В целях предупреждения механических повреждений от ударов и вибрации гнезда ящиков оклеивают прокладками из войлока, технического сукна, резины, пористой пластмассы и других материалов.

Запасные части, малоустойчивые к ударам, укладывают в ящики на амортизаторах. Наружную поверхность ящиков и других укладочных средств окрашивают красками и лаками в цвет, применяемый для окраски аппаратуры.

Масса отдельных ящиков с уложенными запасными частями не должна превышать 40—50 кг, в противном случае ЗИП становится малотранспортабельным и неудобным в эксплуатации.

Типовые укладочные ящики с унифицированными размерами в плане 412×361 мм имеют несколько типоразмеров по высоте от 100 до 400 мм. Ящики изготовляют из стали толщиной от 0,8 до 1,5 мм или из листового алюминиевого сплава. Крышки ящиков устанавливают на петлях и в закрытом состоянии застегивают замками.

Запасные части с большим количеством ящиков на объекте установки аппаратуры укладываются в стеллажи. Для быстрого нахождения необходимой запасной части весьма важно обеспечить и поддерживать во время эксплуатации порядок укладки ящиков в унифицированные укладочные стойки.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

7.1. ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Влияние температуры. Известно, что увеличение температуры вызывает расширение материалов, а охлаждение — сжатие. При этом однородные тела изменяют линейные размеры Δl по следующей зависимости:

$$\Delta l = \alpha_t l (T_2 - T_1),$$

где l — линейный размер тела; T_2 — температура нагретого тела, К; T_1 — начальная температура тела, К; α_t — температурный коэффициент линейного расширения.

Если при разработке несущих конструкций не будут учтены изменения линейных размеров, то при эксплуатации возможны деформации связей и заклинивания подвижных частей. Особенно опасны тепловые удары, от которых в первую очередь разруша-

ются хрупкие материалы, такие как стекло, керамика и некоторые пластмассы с залитой в них металлической арматурой.

Тепловой удар характеризуется скоростью изменения температуры элементов конструкции при резком изменении температуры окружающей среды с переходом ее через нулевое значение (по Цельсию). Скорость изменения температуры материалов конструкции зависит от их теплопроводности. Тепловое разрушение материалов происходит особенно интенсивно в неоднородных структурах.

Одновременно с механическими наблюдаются и физические изменения свойств материалов. При увеличении температуры происходят размягчение и утечка некоторых заливочных составов, вследствие чего нарушается герметичность конструкции и теряются изоляционные свойства материалов.

В результате теплового воздействия происходит интенсивное старение материалов с потерей механических и электрических свойств. При колебании температуры меняется емкость конденсаторов, снижается сопротивление изоляции, меняются собственная емкость и добротность контуров и сопротивление резисторов.

В результате нарушается настройка аппаратуры, снижается чувствительность и избирательность радиоприемных устройств. При температуре ниже 233 К некоторые компаунды и другие изоляционные материалы твердеют и растрескиваются.

Влияние влажности. Влажность атмосферного воздуха изменяется в широких пределах в зависимости от характера климата, рельефа местности или близости водной среды и создается непосредственным заполнением окружающего пространства росой, туманом, инеем, льдом и, наконец, водой.

Снижение температуры воздуха в замкнутом объеме приводит к увеличению относительной влажности и даже к выпаданию росы. Например, из кривых зависимости абсолютной влажности воздуха от температуры (рис. 7.1) видно, что при снижении температуры от точки А до точки О относительная влажность увеличивается до 100%. Дальнейшее понижение температуры до точки С вызывает уже выпадание части влаги в виде росы в количестве, определяемом разностью координат и равном 5 г/м^3 . И, наоборот, при повышении температуры в замкнутом объеме влажность воздуха снижается.

Туман образуется при конденсации водяных паров, снег или лед — при перенасыщении холодного ($t \leq 0^\circ\text{C}$) воздуха влагой.

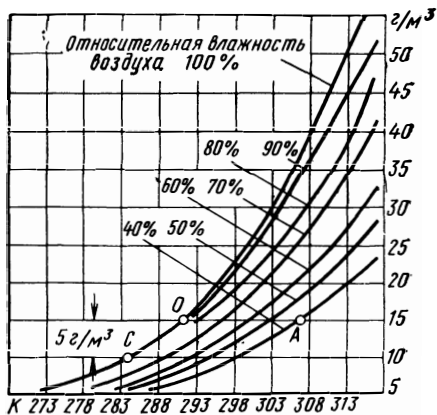


Рис. 7.1. Зависимость влажности воздуха от температуры

Обледение возникает в высокогорных заснеженных районах с наветренной стороны, при передвижении с большой скоростью в тумане или в облачных осадках при отрицательной температуре, близкой к 0°C (273 К).

Аппаратура, используемая в морских условиях на палубе, постоянно подвергается воздействию солей, содержащихся в морской воде. При погружении РЭА на большую глубину в море кроме химического воздействия имеет место высокое давление воды. Кроме того, приборы, работающие в морской воде, подвержены обростанию растительными и животными морскими организмами. Морская вода электропроводна. Она хороший электролит, усиливающий электрохимическую коррозию контактных соединений. При условии периодического пребывания металла под водой и на воздухе скорость коррозии зависит от температуры и в умеренном климате увеличивается в 2 раза и более, а в тропическом — в 4 раза.

Наиболее распространенным средством защиты РЭА от влияния влажности является герметизация. Однако следует учитывать, что полная герметизация может быть обеспечена только вакуум-плотными конструкциями. В недостаточно герметизированный объем из окружающего воздуха влага переносится диффузией через поры материала или уплотнение. При работе аппаратуры воздух в таком объеме нагревается и, расширяясь, частично выходит наружу. При остывании аппаратуры внутри такого объема выпадает конденсат, давление снижается, и поэтому окружающий влажный воздух вновь проникает туда. Каждый такой цикл изменения температуры и давления внутри недостаточно герметизированного объема вызывает конденсацию влаги, и содержание воды в нем все время увеличивается. Таким образом, происходит как бы засасывание влаги из воздуха, в то время как у негерметизированного объема это явление отсутствует.

Влияние атмосферного давления. Давление у земной поверхности подвержено климатическим изменениям. С увеличением высоты атмосферное давление снижается.

Снижение атмосферного давления уменьшает электрическую прочность воздуха, вследствие чего пробивное напряжение между разноименными контактами падает, ухудшается и поверхностное сопротивление изоляционных деталей. Низкое давление воздуха может вызывать искровые разряды, пробой, образование короны и т. д. Кроме того, при низком давлении снижается теплопроводность воздуха, вследствие чего ухудшаются условия охлаждения аппаратуры.

Влияние пыли. Пыль состоит из мелких и твердых частиц, равномерно распределенных в воздухе. Эти частицы тяжелее воздуха, медленно осаждаются на поверхности и легко проникают всюду через неплотные соединения и мелкие отверстия. В РЭА, осаждаясь на поверхности вместе с влагой, пыль создает условия для развития плесени.

Пыль состоит из органических и неорганических частиц диаметром от 0,005 до 0,2 мм. Органические частицы составляют примерно 25—35 % всего количества пыли и представляют собой мельчайшие остатки животного и растительного мира, грибковых образований, бактерий, частицы смол и волокон шерсти и хлопка. Концентрация пыли в атмосфере с высотой резко убывает и на высоте 1500 м почти в 10 раз меньше, чем у поверхности земли.

Загрязнению пылью особенно подвержены поверхности, находящиеся в полях высокого напряжения постоянного тока. Частицы пыли легко поглощают влагу и становятся проводниками электрического тока, что значительно снижает изоляцию поверхностей и часто служит причиной образования дуги, короткого замыкания или пробоя поверхности, выгорания или нарушения контакта.

При разработке конструкции необходимо предусматривать возможность простыми средствами удалять с поверхностей накопившуюся пыль. В случае особых требований пылезащитности все проемы и соединения в корпусах приборов закрываются пыленепроницаемыми уплотнениями, а вентиляционные отверстия — пылезащитными фильтрами.

Нормальные климатические условия. Нормальные климатические условия в естественной обстановке устанавливаются только на короткие промежутки времени и очень редко. Постоянными такие условия создаются обычно в закрытых помещениях, где поддержание влажности, температуры и чистоты воздуха в установленных пределах производится специальными установками — кондиционерами.

Нормальными климатическими условиями принято считать окружающий воздух, не загрязненный химическими или механическими примесями, при температуре 288—303 К (15—30°C), давлении $(8,36 \div 10,6) \cdot 10^4$ Па и относительной влажности 45—80 % при температуре 303 К.

7.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РЭА ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Сила и характер воздействующих на аппаратуру внешних механических факторов зависят от условий эксплуатации. Возникающие при этом силы могут быть значительны по величине и продолжительны по времени. Они имеют место вследствие: ускорения, возникающего при вибрации оснований; ударов при воздействии взрывных волн или падении; резкого изменения скорости и направления движения объекта; механического воздействия акустического удара.

Влияние вибрации. Вибрации подвержена аппаратура, устанавливаемая на автомобильном и железнодорожном транспорте, в производственных зданиях, на кораблях, самолетах и управляемых ракетах. Например, на кораблях основная вибрация создается ходовыми винтами и главным двигателем (сотрясение корпуса, переборки, палубы и надстроек), на самолетах — тяговыми двигателями, встречным потоком воздуха и другими причинами.

В производственных помещениях силы, возбуждающие колебания, возникают при вращении неуравновешенных масс или при возвратно-поступательном движении механизмов, связанных с ударами при ковке или штамповке. Такие силы в большинстве своем периодичны, знакопеременны и характеризуются частотой и амплитудой колебания.

Практический диапазон частот вибрации, действующей на аппаратуру, имеет широкий предел. Например, для наземной аппаратуры, переносимой или перевозимой на автомашинах, частота достигает 120 Гц при ускорении, действующем на приборы, до 6g. Для самолетной аппаратуры диапазон вибрации находится в пределах 3—3000 Гц при ускорении от 4 до 10g. Для корабельной аппаратуры вибрация достигает 35—60 Гц при ускорении 1,5—2,5g и зависит от типа корабля и его водоизмещения. Работающая в таких условиях РЭА должна обладать вибропрочностью и виброустойчивостью.

Под вибропрочностью понимают способность аппаратуры противостоять разрушающему действию вибрации в заданных диапазонах частот и при возникающих ускорениях в течение срока службы, а *под виброустойчивостью* аппаратуры — способность выполнения всех функций в условиях вибрации в заданных диапазонах частот и возникающих при этом ускорений.

При воздействии вибрации мгновенное значение перемещения прибора имеет вид $x = A \sin \omega t$, где A — амплитуда перемещения; ω — угловая частота колебания.

Вторая производная по времени от этого выражения дает величину мгновенного ускорения $\ddot{x} = A\omega^2 \sin \omega t$, где $A\omega^2$ — максимальное ускорение, действующее на прибор. Выразив угловую частоту колебания через частоту вибрации f , Гц, $\omega = 2\pi f$ для максимальной величины действующего ускорения, получим $\ddot{x} = 4\pi^2 A f^2$. Значение ускорения, действующего на РЭА, принято выражать в единицах ускорения силы тяжести, т. е. $\ddot{x} = jg$, где $g = 9,81$ м/с²; тогда действующая перегрузка в единицах ускорения силы тяжести будет иметь вид

$$j \approx 4 \pi^2 A f^2 / g = A f^2 / 250. \quad (7.1)$$

Отсюда максимальная динамическая сила, действующая на прибор весом G_m , будет составлять $P_d = jG_m$.

Влияние ударов. Ударом называют мгновенное изменение скорости движения системы на конечное значение. Во время действия на систему ударного импульса силы движение ее происходит по закону вынужденных колебаний, а после действия — по закону свободных колебаний. Формой ударного импульса в простейших случаях может быть полусинусоида, трапеция или прямоугольник с длительностью до половины периода.

Практически удар может произойти в любом направлении, а нарастание и спад его измеряются долями секунды. Удары могут быть периодические и непериодические. К периодическим относят удары, которые повторяются через равные интервалы времени, к

непериодическим — удары, повторяющиеся с различными интервалами времени (транспортная тряска) и случайные удары. В результате удара происходят колебания с большой амплитудой, действие которой и может вызвать значительные повреждения в аппаратуре, но благодаря демпфирующей способности упругих элементов они быстро затухают.

Удары могут возникнуть вследствие падения прибора, столкновения движущихся объектов, воздействия взрывной волны, приземления самолета или маневрирования вагонов железнодорожного транспорта и т. д. Мгновенно действующие нагрузки при этом достигают 1000g. Работающая в таких условиях РЭА должна обладать *ударостойкостью*, т. е. способностью противостоять разрушающему действию ударов определенного значения и после их воздействия нормально функционировать.

При воздействии на аппаратуру удара самопроизвольно срабатывают подвижные и неуравновешенные вращающиеся части механических систем (реле, муфты, фиксаторы), самоотвинчиваются крепежные детали, нарушается регулировка, ломается несущая конструкция и т. д.

Влияние линейного и центробежного ускорения. При изменении скорости на прямолинейном участке движения или при криволинейном движении установленные на объекте приборы испытывают ускорение. Практически перегрузка в долях ускорения силы тяжести в этих случаях может достигать 10—12 g и более.

Механическое воздействие шумов и акустических ударов. Сильные шумы и особенно акустические удары вызывают значительные колебания звуковой частоты. Часть энергии, высвобождающейся при работе пульсационного двигателя, например реактивного с уровнем шума свыше 140 дБ, вызывает высокочастотную вибрацию находящейся в непосредственной близости электронной аппаратуры.

Сильный шум вызывает в аппаратуре ряд нежелательных явлений, нарушающих ее нормальное функционирование. Так, возбуждается вибрация управляющих реле, усиливается процесс обгорания контактных пар и т. д. Явления резонансных колебаний в области звуковых частот могут вызвать различные неисправности и поломки в чувствительных элементах РЭА.

7.3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ НОРМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассматривая факторы воздействия окружающей среды, можно сделать выводы, что вновь разрабатываемая аппаратура в зависимости от условий эксплуатации на объекте должна обладать для защиты:

— от климатических воздействий окружающей среды — влагостойкостью, теплостойкостью, холодоустойчивостью, устойчивостью к пониженному или повышенному давлению, пыле-, брызго-, водозащищенностью, защищенностью от гололеда и инея, солнечной радиации, ионизирующего излучения, полей СВЧ;

— от механических воздействий — виброустойчивостью, вибропрочностью, удароустойчивостью и ударопрочностью, ветроустойчивостью, стойкостью к линейным и центробежным ускорениям;

— от биологических воздействий окружающей среды — грибоустойчивостью, устойчивостью к насекомым и грызунам.

Меры воздействия окружающей среды на РЭА оговариваются для каждой группы аппаратуры предельными нормами эксплуатации при максимальном (или минимальном) допустимом значении физических параметров. Эти нормы служат критерием для проверки конструкции аппаратуры в процессе ее типовых испытаний; они

Т а б л и ц а 7.1. Основные факторы воздействия окружающей среды, учитываемые при разработке РЭА

Факторы и параметры воздействий	Режим испытания для каждой группы		
	Наземная	Корабельная	Самолетная
Вибрация Частота, Гц Ускорение, <i>g</i>	10—70 1—4	0—120 1,5—2	5—2000 До 20
Ударные сотрясения Ускорение, <i>g</i> Длительность, мс	10—15 5—10	15 5—10	6—12 До 15
Одиночные удары Ускорение, <i>g</i> Длительность, мс	50—1000 0,5—10	До 1000 0,5—2	— —
Температура максимальная Рабочая, К Предельная, К	323 333	303—333 338	333—473 353—523
Температура минимальная Рабочая, К Предельная, К	233 223	233 223	213 213
Влажность относительная Насыщенность, % Температура, К	80—93 213	98—100 308—323	93—100 320—330
Акустические шумы Уровень, дБ Частота, Гц	85—125 50—1000	75—140 50—1000	130—150 50—1000
Давление атмосферное Максимальное, Па Минимальное, Па	10,6·10 ⁴ 5,7·10 ⁴	10,6·10 ⁴ 8,8·10 ⁴	10,6·10 ⁴ 0,2·10 ⁴
Линейное ускорение Замедление, <i>g</i> Центробежное, <i>g</i>	2—4 2—5	— —	4—6 4—10
Ветровая нагрузка Рабочая, м/с Предельная, м/с	До 50 До 70	До 50 До 70	— —

Примечание. В указанных пределах величина воздействия изменяется в зависимости от степени жесткости эксплуатации по каждой группе аппаратуры.

же, в конечном счете, определяют особенности конструкции каждой группы (наземной, самолетной или корабельной РЭА).

Предельные значения параметров окружающей среды, воздействующих на РЭА по каждой группе, установлены ГОСТ 16019-78, ГОСТ 17672-72 и ГОСТ 22579-77. Эти значения в каждом случае указываются в ТУ на вновь разрабатываемую аппаратуру. Обобщенные параметры внешних воздействий, в пределах которых проводят типовые испытания вновь разрабатываемой РЭА, для каждой группы приведены в табл. 7.1.

Для создания аппаратуры для ракетной техники руководствуются более жесткими требованиями к условиям эксплуатации: вибрация в диапазоне 0—500 Гц при ускорении до 20g; ударное сотрясение 5—10g с длительностью импульса действия 10—12 мс со скоростью 40—80 ударов в минуту; акустические шумы 130—170 дБ при частоте 50—1000 Гц; максимальная рабочая температура 323—473 К и минимальная 223 К; линейное ускорение от 5 до 50g; атмосферное давление до 13,3 Па.

7.4. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЛАГОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ

Влагоустойчивостью называют свойство РЭА сохранять свои параметры и работоспособность в установленных пределах во время эксплуатации или в условиях хранения в среде с повышенной влажностью.

Аппаратура считается влагоустойчивой, если после пребывания ее в окружающей среде с максимальной влажностью и в течение времени, обусловленного ТУ, ее параметры останутся неизменными, а влагозащитные свойства сохранившимися.

В целях обеспечения влагоустойчивости аппаратуры применяются:

- малогигроскопичные и коррозионностойкие материалы;
- стойкие антикоррозионные покрытия;
- покрытия, предохраняющие поверхности от плесени;
- пленочные покрытия лаками, смолами, красками и компаундами;
- пропитка материала малогигроскопичными составами;
- заливка влагостойкими компаундами на основе эпоксидных смол;
- опрессовка пресс-материалами;
- механическая герметизация узлов, блоков и приборов;
- сушение внутренней полости прибора;
- вентиляция прибора воздухом влажностью до 75 %;
- кондиционирование воздуха в аппаратных помещениях.

При разработке аппаратуры, предназначенной для работы в тяжелых климатических условиях или в агрессивной среде, используются металлы, стойкие против коррозии, такие как нержавеющая сталь, сплавы меди, титана или некоторые сплавы алюминия.

Для защиты поверхности используют цинковые, кадмиевые, никелевые или хромовые *антикоррозионные покрытия*, наносимые

гальваническим способом. Весьма широко используется способ анодирования или химического оксидирования поверхности металлов. Поверхность тонколистовой стали эффективно предохраняет от коррозии покрытие тонким слоем химически чистого алюминия.

Наиболее распространенным способом защиты металлических поверхностей от коррозии является *окраска* грунтами с последующим покрытием лакокрасочными материалами. Этот способ покрытия незаменим при защите поверхностей сложных неразъемных узлов и деталей больших габаритных размеров. (Схема окраски обычно предусматривает три основных технологических операции: грунтовку, шпаклевку и окраску. Окраска производится в несколько слоев. Грунтовка увеличивает прочность сцепления основного лакокрасочного покрытия с поверхностью окрашиваемого материала.)

От воздействия влажной среды особенно тщательно защищают аппаратуру, предназначенную для работы в условиях тропического климата. Повышенная температура и влажность воздуха в тропиках не только требуют усиленной защиты поверхности материала от коррозии, но и предусматривают меры борьбы против образования в приборах плесени и грибковых растений.

Эффективным способом борьбы с плесенью является ограничение в приборе влажности до 75 %. Подавление плесени достигается покрытием материалов противогрибковыми растворами — фунгицидами, которые уничтожают плесень или приостанавливают ее рост. При разработке аппаратуры для работы в условиях тропического климата выбор защитных покрытий должен производиться из числа предназначенных для жестких условий эксплуатации.

Пленочные покрытия образуют на поверхности материала тонкий и непрерывный слой лака. Они защищают материалы от проникновения в его поры влаги и увеличивают прочность изоляции. При пропитке или покрытии деталей используют изоляционные лаки СБ1-С, УР-231, эмали ЭП-51, ГФ-92-ХС и компаунды МБК, ЭЗК, ФК-20 и УТ-31. Пленочному покрытию изоляционными лаками и эмалями подвергаются многие функциональные узлы печатного монтажа, микромодули и микросхемы. Пропитке также подвергаются детали, изготавливаемые из гигроскопичных, пористых или волокнистых материалов, а также различные моточные изделия. Пропитка материалов производится отверждением эпоксидными смолами без наполнителей или кремнийорганическими жидкостями. Моточные изделия пропитывают фторорганическими и полиэфирными жидкостями. Условия и способы пропитки подробно рассмотрены в [4, 9].

Заливка элементов РЭА производится заливочными массами, которые при затвердевании имеют хорошую адгезию и эластичность. Они плотно обжимают залитый объем, обеспечивая узлу надежную механическую прочность. В качестве заливочных масс наибольшее применение получили эпоксидные смолы в чистом виде или с наполнителями (маршалит, тальк и др.).

В целях снижения массы залитого узла применяют пенистые заливочные материалы — так называемые пенопласты. Наиболее приемлемыми материалами для этого являются пенополиуретаны. Однако при выборе заливочного материала необходимо учитывать, что пенопласты характеризуются низкой теплопроводностью и не могут быть использованы для заливки тех узлов, которые в процессе работы требуют интенсивного охлаждения.

Опрессовка пластмасс производится при изготовлении опорных элементов РЭА, часто с металлической арматурой. Однако из-за малой адгезии пресс-материалов к металлам и длительного процесса усадки герметизация таких узлов нарушается. Для РЭА, используемой в тяжелых климатических условиях, может быть применено лишь ограниченное число марок пресс-материалов, например типа АГ-4.

Наиболее простым и надежным способом герметизации является размещение узлов или блоков в металлических кожухах с хорошо пропаянными или сварными соединениями. Электрические выводы пропускают через герметичные проходные изоляторы или устанавливают на герметичной прокладке, как это показано на рис. 7.2.

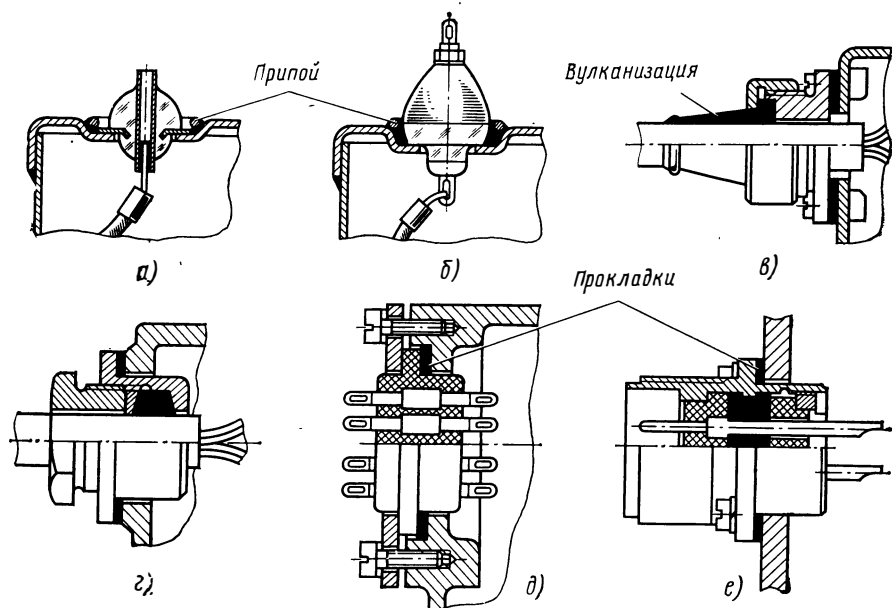


Рис. 7.2. Обеспечение герметичности выводов с помощью стеклянных (а) и фарфоровых (б) изоляторов, вулканизации кабеля (в), при использовании кабельных сальников (г), проходных колодок (д) и герметичных штепсельных разъемов (е)

Общая герметизация осуществляется герметичной конструкцией приборных корпусов. При этом все разъемные соединения в корпусе уплотняют резиновыми прокладками, а выводы управляемых

элементов или проводников — специальными уплотнителями. Неразъемные соединения выполняют преимущественно сварными с дополнительной герметизацией герметиками, в качестве которых используют пасты, замазки, пластичные пленки и клеи. Для герметизации ввода кабельных соединений применяют уплотняющие устройства, проходные контакты или герметичные разъемы.

Надо отметить, что уплотнительными прокладками, устанавливаемыми в крупных приборных корпусах, трудно обеспечить абсолютную герметичность. Однако они в достаточной мере предохраняют внутреннюю полость прибора от влажного воздуха или воды, обеспечивая более благоприятные условия работы аппаратуры во влажной среде, особенно если при этом в приборах используют средства осушения.

Осушение внутренней полости прибора производится влагопоглотителями. Наибольшее применение из них получил силикагель, который в размельченном виде помещают в футляры, патроны или мешочки, устанавливаемые внутри прибора. Осушительный патрон предусматривает замену силикагеля при полном насыщении его влагой. Контроль за влагонасыщением силикагеля производится по

изменению его цвета. Для этого силикагель окрашивают 3%-ным водным раствором хлористого кобальта, тогда при полном насыщении влагой он принимает розовый цвет, а после просушки — синий.

Герметизация разъемных соединений малогабаритной РЭА осуществляется квадратным шнуром из термостойкой резины. После укладки шнура образующиеся в разъемах пазы пропаявают герметичным швом (рис. 7.3). Резиновый шнур обеспечивает предварительную герметизацию, защищая внутреннюю полость прибора от попадания паров флюса при пайке. Размеры шнура должны быть больше ширины канавки на 0,2—0,3 мм.

Если необходимо заполнить внутреннюю полость прибора нейтральным газом (азот, гелий), то в конструкции предусматривают на крышке корпуса трубку (шенгель) для откачки воздуха и накачки газа.

При ремонте блоков паяный шов разрушается вытягиванием стальной проволоки, предварительно уложенной перед пайкой в паз. Диаметр проволоки выбирают на 0,2—0,4 мм меньше ширины канавки. Пайку соединения выполняют припоем ПОС61, при этом используют флюс ФКСп. Качество герметизации зависит от пере-

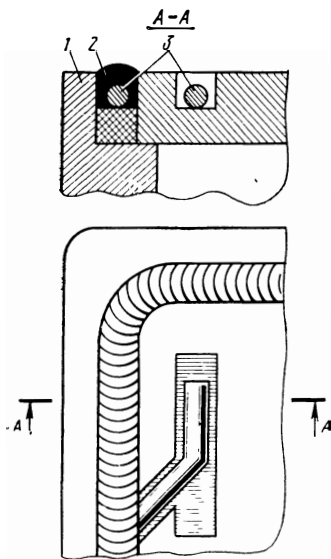


Рис. 7.3. Герметизация мест соединения корпуса с крышкой пайкой

1 — корпус; 2 — припой; 3 — проволока; 4 — резина

пада давлений между внутренней и наружной средой корпуса, а при заполнении внутреннего объема нейтральным газом от величины истечения газа D_r (газонепроницаемости), определяемой выражением $D_r = V_v \Delta p / t$, где V_v — внутренний объем, м³; Δp — перепад колебания, Па и t — срок службы и хранения блока, с.

Так, например, для герметизированного блока внутренним объемом газа 0,1—0,2 дм³ газонепроницаемость сохраняется до 8 лет.

7.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ И ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ

Теплоустойчивость характеризуется свойством аппаратуры сохранять свою работоспособность при повышенной температуре окружающей среды. Для обеспечения теплоустойчивости необходимо в первую очередь использовать теплостойкие материалы с высокой теплопроводностью. Жесткие механические связи необходимо осуществлять однородными материалами, обеспечивая минимальную разницу в их температурных коэффициентах расширения (табл. 7.2).

Таблица 7.2. Температурный коэффициент линейного расширения некоторых материалов

Материал	$\alpha \cdot 10^{-6}$	Материал	$\alpha \cdot 10^{-6}$
Инвар	0,9—1,2	Кварц	0,5
Вольфрам	3,3—3,4	Ситалл	5
Хром	5,9	Керамика	6—12
Титан	7,5—8,5	Гетинакс	17—25
Чугун	8,7—11,1	Текстолит	20—40
Сталь	10,6—12,2	Компаунды	40—150
Железо	12,2	Лавсан	50
Никель	13,3	Стеклотекстолит	50—80
Константан	15,2	Фторопласт	50—110
Медь	16,6—17,1	Стекло	60—120
Латунь	17,8—18,2	Полистирол	70
Серебро	19,6	Винилекс	70
Алюминий	23,8	Стекло органическое	80—140
Олово	23,8	Капрон	100—150
Магний	26,2	Полиэтилен	100—180
Свинец	39,5	Полиуретан	130

В точных связях часто осуществляют термокомпенсацию введением в замкнутую механическую систему звеньев с обратным знаком температурного коэффициента, компенсирующего изменение размера основного элемента.

Холодоустойчивость аппаратуры характеризуется способностью сохранять работоспособность при пониженной температуре окружающей среды.

Качество тепло- или холодоустойчивости определяется после пребывания аппаратуры в окружающей среде с максимальной и минимальной температурами поочередно. Если после пребывания

в такой среде в течение определенного времени основные параметры аппаратуры не изменились, то она может считаться тепло- и холодоустойчивой.

Для обеспечения холодоустойчивости РЭА применяют морозоустойчивые материалы (например, обычная резина, как известно, работает нормально только в диапазоне от 233 до 328 К, в случае же необходимости обеспечения морозоустойчивости выбирается специальная резина, кремнийорганическая, не теряющая свою эластичность при температуре до 173 К).

Кроме того, аппаратуру оборудуют средствами воздушного подогрева, что исключает замерзание элементов аппаратуры и предупреждает обледенение. В условиях холодного климата аппаратуру необходимо размещать в укрытиях, хорошо защищенных от непосредственного воздействия снега, дождя и ветра.

При использовании в аппаратуре элементов схемы, требующих для нормальной работы поддержания постоянной температуры окружающей среды (кварцевые стабилизаторы, контуры задающей частоты и др.), применяется термостатирование таких элементов, т. е. размещение их в небольшом объеме с автоматически поддерживаемой заданной температурой. Этот способ обеспечивает высокую стабильность параметров схемы. Регулировка температуры внутри термостата производится с помощью термоэлементов, которые управляют схемой подогрева внутреннего объема.

7.6. МЕРЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ РАБОТУ АППАРАТУРЫ ПРИ ПОНИЖЕННОМ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Аппаратура, предназначенная для работы в условиях давления, значительно ниже нормального, называется высотной.

Высотность аппаратуры характеризуется ее свойством сохранять работоспособность при пониженном атмосферном давлении. К этой группе относится аппаратура, работающая при пониженном давлении, начиная от $133 \cdot 10^2$ Па (550 мм рт. ст.): высокогорная, самолетная, вертолетная, ракетная.

Высотная аппаратура должна нормально работать как на уровне моря, так и на максимальной высоте. При создании высотной аппаратуры одной из основных задач конструктора является разработка мер, снижающих влияние на аппаратуру пониженного давления. Влияние пониженного давления можно уменьшить или вовсе исключить общей герметизацией аппаратуры, увеличением расстояния между разноименными токонесущими частями и элементами, увеличением электрической прочности и поверхностного сопротивления изоляции, заполнением внутренней полости герметичных приборов нейтральными газами или воздухом.

Однако в отличие от рассмотренных нами ранее методов герметизации в высотной вакуум-плотной аппаратуре приборному корпусу, испытывающему перепад внутреннего и наружного давления, необходимо обеспечить дополнительно механическую прочность.

7.7. ЗАЩИТА АППАРАТУРЫ ОТ ПЫЛИ, БРЫЗГ ВОДЫ И ВНЕШНЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Пылезащищенность. Пылезащищенность аппаратуры — способность не допускать попадания пыли внутрь прибора в случае нахождения его в среде с повышенной концентрацией пыли. Под такой средой подразумевается воздух, в котором содержится песок, мел и каолин в количестве, превышающем 0,1 % всего объема воздуха.

Прибор считают пылезащищенным лишь в том случае, если после обдува его запыленным воздухом со скоростью 10—15 м/с в течение 1 ч при вскрытии корпуса на поверхности элементов аппаратуры не будет обнаружено пыли. В пылезащищенных приборах все разъемные соединения в корпусах имеют фетровые или резиновые прокладки. Отверстия, через которые на лицевую панель выводят оси рукояток переключателей и других органов управления, прикрывают уплотнителями, кольцами из фетра или резины. Неразъемные соединения частей корпуса делают плотными, без щелей. Для обеспечения плотности соединений используют герметизирующие пасты и замазки.

Все вентиляционные отверстия, через которые при естественной вентиляции прибора поступает охлаждающий воздух, закрывают пылезащитными фильтрами, основным свойством которых является их способность при наименьшем сопротивлении воздушному потоку хорошо задерживать взвешенные в нем механические частицы.

Наиболее распространены воздушные пылезащитные фильтры. В качестве фильтрующего элемента в них используются лабиринтные отверстия, многослойная металлическая сетка, стекловата и другие материалы. Для лучшего улавливания частиц пыли поверхности фильтрующих элементов смачиваются веретенным маслом. Такие фильтры нуждаются в периодической чистке и промывке, поэтому их конструкция должна предусматривать легкий съем из корпуса и промывку или замену фильтрующего материала.

Брызгозащищенность. Аппаратура, сохраняющая работоспособность во время пребывания в брызгонесущей среде, называется брызгозащитной. Наиболее неблагоприятным условием брызгонесущей среды считается косой дождь или брызги интенсивностью до 5 ± 2 мм/мин. с направлением поочередно со всех четырех сторон под углом 45° к горизонту.

Брызгозащитный прибор должен выдерживать пребывание в брызгонесущей среде во включенном состоянии не менее 2 ч; при этом внутрь корпуса прибора не должна попадать вода.

Проблема брызгозащиты здесь решается преимущественно за счет конструкции корпуса прибора. Например, выводы из прибора на его лицевую панель к рукояткам управления уплотняют специальными прокладками (рис. 7.4).

Уплотнение приборных крышек, дверец и других быстросъемных частей выполняют брызгозащитными лабиринтами или рези-

новыми уплотнителями. Первый способ предусматривает устройство по периметрам разъемов брызгозащитных соединений, в которых брызги воды задерживаются в лабиринтах и, скапливаясь, сливаются вниз по наружной поверхности приборного корпуса. Второй способ осуществляется установкой резиновых прокладок

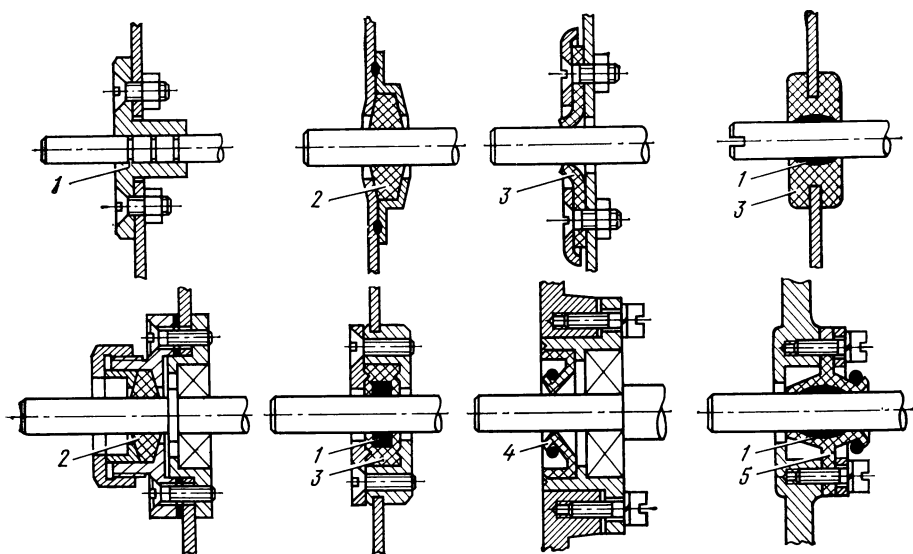


Рис. 7.4. Пыле- и брызгозащитные уплотнения проходных валиков и осей
 1 — уплотнение смазкой; 2 — промасленным фетром; 3 — резиновой прокладкой; 4 и 5 — уплотнительными кольцами

по всему периметру разъема и требует плотного прилегания плоскости разъема по всему периметру. Прижим крышек с прокладками к корпусу прибора обеспечивается накладными замками или винтовыми запорами.

Уплотняющие прокладки выполняют из мягкой шнуровой резины квадратного, прямоугольного или круглого сечения. При необходимости одновременного обеспечения экранирования разъема резиновый шнур изготавливают с экранирующей оболочкой. Прижим крышек к корпусу прибора обеспечивается накладными замками или винтовыми запорами (рис. 7.5).

Для уплотнения смотровых стекол, индикаторов или шкальных устройств используют прокладки или жгуты, сформованные из резины. В небольших приборах смотровые стекла закрепляют в корпусах пружинными кольцами, ограничительными скобами или с помощью влагостойких клеев и замазок.

Защита наружных отверстий естественной вентиляции приборов в брызгонесущей среде осуществляется с помощью жалюзи или отверстиями, углубленными внутрь корпуса и защищенными от косонаправленных дождевых брызг. Вверху прибора часто ус-

танавливают вентиляционные крышки, снабженные по периметру брызгозащитными лабиринтами.

Для уплотнения выводов на лицевых панелях приборов и управляющих элементах (тумблеры, кнопки и др.) широко используют резиновые протекторы, выполненные по форме самого элемента.

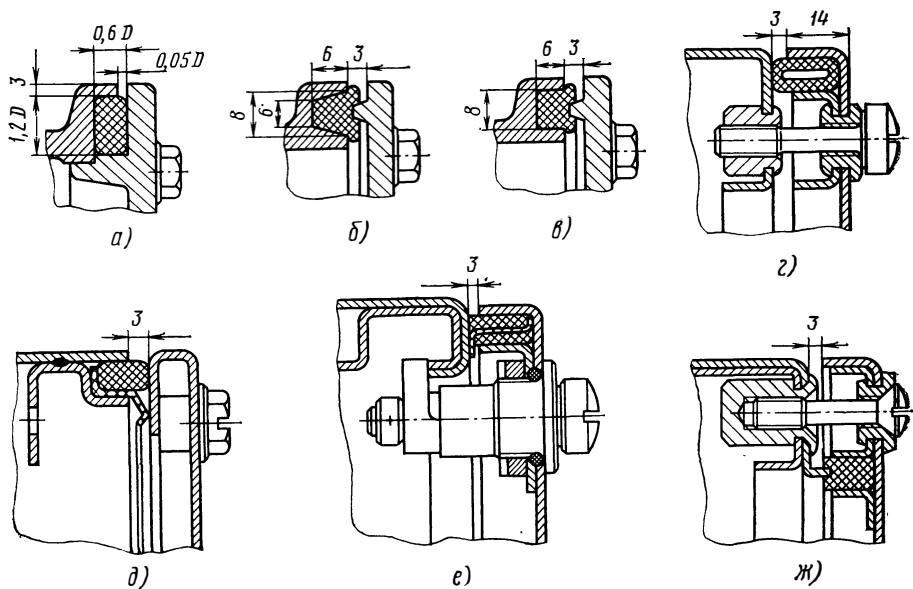


Рис. 7.5 Типовые брызго- и водозащитные уплотнения электрических соединителей в приборных корпусах: с помощью резиновых шнуров круглого (а), трапециевидного (б) и прямоугольного (в) сечений, резиновой трубкой (г), шнуром с экранирующей оплеткой (д, е) и ножевым водозащитным уплотнением (ж)

Водозащищенность. Водозащищенность аппаратуры характеризуется ее свойством сохранять работоспособность после пребывания в воде на глубине не менее чем 50 см в течение 1 ч. После вскрытия прибора внутри корпуса не должно быть просочившейся воды, а параметры его должны оставаться неизменными.

Все уплотнения корпуса водозащищенного прибора должны быть непроницаемы для воды, поэтому резиновые уплотнения в них выполняют шнуром квадратного или грушевидного сечения из более плотной резины усиленными прижимными винтами.

Герметичность приборов, находящихся под гидростатическим давлением. Герметичность морской аппаратуры определяется свойством не допускать проникновения воды внутрь прибора при длительном воздействии внешнего гидростатического давления, оговариваемого в ТУ. Прибор может быть назван герметичным в том случае, когда в течение пребывания его в рабочем состоянии в воде, под гидравлическим давлением, он работает нормально, а

при вскрытии прочного корпуса в нем не обнаруживается следов воды.

Если герметичный прибор предназначен для работы при значительном гидростатическом давлении, то его корпус и уплотнения должны обладать необходимой механической прочностью. Корпуса приборов герметичной конструкции выполняются литыми или сварными из листового проката. Качество герметизации в этом случае во многом зависит от точности изготовления уплотняемых плоскостей и правильной геометрии мест укладки резиновых прокладок. Конструкция водозащищенного уплотнения с резиной круглого и квадратного сечений показана на рис. 7.6. Геометрические размеры плотностей уплотнения приведены в табл. 7.3.

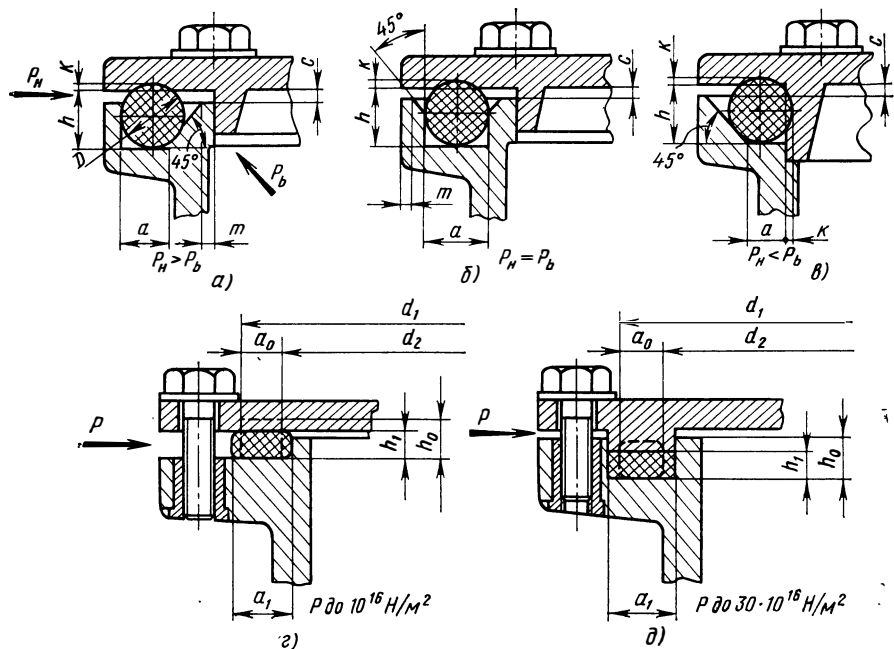


Рис. 7.6. Конструкция водозащитного уплотнения для различных давлений

Нормальное водозащитное уплотнение обеспечивается в том случае, если резиновая прокладка будет сжата по всему периметру на 25—30 %, т. е. ее относительная деформация

$$\varepsilon_{\text{д}} = (h_0 - h_1)/h_0 = 0,25 - 0,30, \quad (7.2)$$

где h_0, h_1 — соответственно высота прокладки до сжатия и после сжатия.

Известно, что величина деформации резины в первую очередь зависит от усилия сжатия (или растяжения) и твердости используемой резины. Для надежного уплотнения немалую роль играют форма и размеры уплотнительных канавок. Напряжение в рези-

Т а б л и ц а 7.3. Геометрические размеры уплотнения, выраженные в долях диаметра D уплотняющего резинового шунта (по рис. 7.7, а, б, в)

Размеры	Уплотняющее устройство		
	одностороннее	угловое	двухстороннее
h	$0,85-0,95D$	$0,85-0,95D$	$0,85-0,95D$
a	$0,6-0,9D$	$0,5D$	D
k	$0,05-0,15D$	$0,05-0,15D$	$0,05-0,15 \left(\frac{a+h}{2} \right)$
c	$0,05D$	$0,05D$	$0,05 \left(\frac{a+h}{2} \right)$
m	$0,2D$	$0,2D$	$0,2D$
l	—	—	$0,2-0,4D$

новой прокладке σ_p , Н/м^2 , будет определяться произведением ее относительной деформации и модуля сжатия с учетом трения в местах стыка и формы профиля прокладки:

$$\sigma_p = \epsilon E_{сж} (1 - 2\mu\Phi), \quad (7.3)$$

где $E_{сж}$ — модуль сжатия, равный утроенному модулю сдвига G ; $E_{сж} = (3 \div 6) 10^5 \text{ Н/м}^2$; 2μ — коэффициент трения резины в опорных поверхностях; Φ — коэффициент формы резиновой прокладки, учитывающий сложные явления сжатия прокладки.

Коэффициент трения резины о металл $\mu = 0,6$. Коэффициент формы определяется отношением площади поверхности

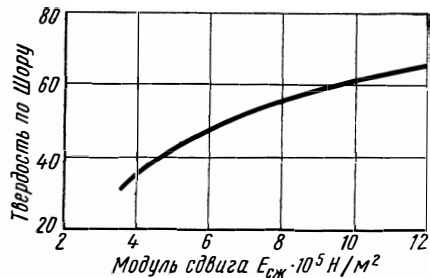


Рис. 7.7. Модуль сдвига резины в зависимости от твердости по Шору

прокладки, опирающейся в разъеме на корпус, к полной боковой поверхности. Для прокладки прямоугольной формы, изготовленной в виде кольца (рис. 7.7, г, д) коэффициент формы

$$\Phi = \frac{0,25 \pi (d_1^2 - d_2^2)}{\pi (d_1 + d_2) h_0} = \frac{0,5 a_0}{h_0}, \quad (7.4)$$

где a_0 — ширина профиля прокладки ($d_1 - d_2$); h_0 — высота ее; d_1 и d_2 — диаметры наружного и внутреннего колец прокладки.

Полное усиление сжатия $P_{сж}$ прокладки будет определяться размерами опорной площадки s :

$$P_{сж} = \sigma_p s = \sigma a_0 l. \quad (7.5)$$

Следовательно, если мы заранее выбрали форму и диаметр резьбы прижимных винтов, то допустимое усилие на каждый винт P_v позволит определить количество винтов, необходимое для обеспечения требуемого прижима прокладки: $n = P_{сж}/P_v$.

Значение модуля сдвига для выбранной марки резины может быть определено по графику на рис. 7.7. Подставляя в выражение (7.4) утроенное его значение, последовательно выполняем весь расчет уплотнения резиной.

Форма канавки под уплотняющую резину прямоугольного сечения для перепада давления до $30 \cdot 10^6$ Н/м² (рис. 7.7, д) определяется максимально допустимым сжатием резины (в пределах 25—30 % по высоте), т. е. $h_1 = (0,65 \div 0,85) h_0$, тогда $a_1 h_1 = (0,7 \div 0,75) a_0 h_0$, откуда $a_1 = (0,5 \div 0,65) a_0$.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК

8.1. СПОСОБЫ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ ВИБРАЦИИ И УДАРОВ

Известно, что в приборах, не защищенных от вибрации и ударов, узлы, чувствительные к динамическим перегрузкам, выходят из строя. Делать такие узлы настолько прочными, чтобы они выдерживали максимальные (действующие) динамические перегрузки, нецелесообразно, так как увеличение прочности в конечном счете приводит к увеличению массы, а вследствие этого и к неизбежному возрастанию динамических перегрузок (см. § 7.2). Поэтому считают более целесообразным использовать другие средства для снижения воздействия перегрузок. Основным способом изоляции РЭА от вибрации и ударов является установка ее на упругие опоры. В качестве таких опор используют резиновые, металлорезиновые или металлопружинные амортизаторы.

Амортизаторы подразделяются на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные. У низкочастотных амортизаторов частота собственных колебаний в нагруженном состоянии не превышает 4, для среднечастотных находится в пределах 8—12 и у высокочастотных — в пределах 20—30 Гц. Низкочастотные амортизаторы виброизолируют частоты возмущающих колебаний, лежащие в диапазоне 5—600, среднечастотные — в диапазоне 15—600 и высокочастотные в диапазоне 35—2000 Гц [21].

Между амортизаторами, изолирующими вибрацию, и амортизаторами, изолирующими удары, имеется существенная разница. Если первые (мягкие опоры) призваны изолировать от перегрузки колебательную систему, обеспечив ей собственную частоту ниже

частоты вынужденных колебаний, то вторые (жесткие опоры) призваны изолировать систему, обеспечив ей собственную частоту выше частоты вынужденных колебаний. Поэтому при изоляции вибрации в большинстве случаев используют среднечастотные амортизаторы, в то время как для изоляции ударов используют высокочастотные амортизаторы.

Однако РЭА может подвергаться одновременно вибрациям и ударам. В этих случаях в условиях сравнительно слабой вибрации и частых ударов используют противоударные амортизаторы. Если же преобладают вибрации со сравнительно редкими ударами, используют виброизолирующие амортизаторы. (Необходимо отметить, что аппаратура, защищенная от вибрации, сравнительно легко переносит одиночные удары, в то время как защищенная от ударов она не выдерживает вибрации. Этим объясняется использование для амортизации преимущественно виброизолирующих амортизаторов.)

В приборах, имеющих небольшое количество узлов (блоков), нуждающихся в защите от вибрации и ударов, целесообразно амортизировать только такие узлы. В особо сложных случаях возникает необходимость амортизировать одновременно и приборы и установленные в них узлы.

Амортизаторы используют также и для звуковой изоляции оснований от шумящих объектов. При этом изоляция звуковых колебаний широкого диапазона частот иногда требует последовательного соединения амортизаторов с различными жесткостями.

Основные параметры амортизационной системы. Основными параметрами амортизационной системы являются: собственные и вынужденные частоты колебания; максимальные амплитуды собственных и вынужденных колебаний; жесткость упругих опор; коэффициент демпфирования, коэффициент виброизоляции и коэффициент эффективности виброизоляции.

Отношение частоты вынужденных колебаний ω_B к собственной частоте системы ω_0 называют коэффициентами расстройки

$$\gamma = \omega_B / \omega_0. \quad (8.1)$$

Прибор с амортизаторами, навешенный на стену или установленный на основание, по схеме, приведенной на рис. 8.1, представляет собой колебательную систему с определенной жесткостью C и демпфированием D . В случае колебания основания по гармоническому закону ($x_B = A_B \sin \omega_B t$) амортизированная система будет совершать свободные гармонические колебания с частотой вынужденных колебаний. Амплитуда свободных колебаний при этом определяется выражением $x = A_0 \sin(\omega t + \alpha)$. Здесь A_B и A_0 — максимальные амплитуды соответственно вынужденных и свободных колебаний.

Из дифференциального уравнения движения колебательной системы при частном решении вида $x = A_0 \sin(\omega t + \alpha)$ амплитуда свободных колебаний определяется выражением

$$A_0 = A_B \sqrt{h^2 \omega_B^2 + C^2} / (m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_B^2) + 4n^2 \omega_B^2}), \quad (8.2)$$

где h — коэффициент сопротивления; C — жесткость системы; $2n$ — коэффициент затухания свободных колебаний; m — масса.

Так как $2n/\omega_0 = D$, $\omega_0^2 m = C$, $h = nm$, то после подстановки их в уравнение (8.2) и соответствующих преобразований значение амплитуды свободных колебаний напишется в виде

$$A_0 = A_B \sqrt{\frac{1 + D^2 \gamma^2}{(\gamma^2 - 1)^2 + D^2 \gamma^2}}. \quad (8.3)$$

Полученное выражение характеризует зависимость свободных колебаний амортизированного прибора от возбуждающих колебаний основания.

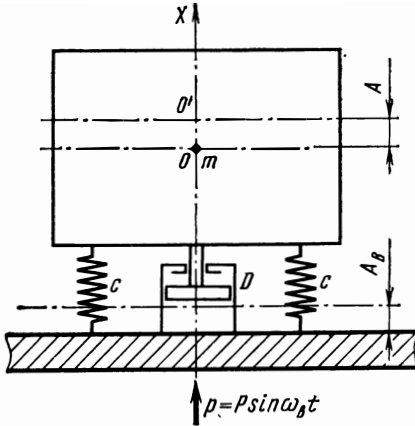
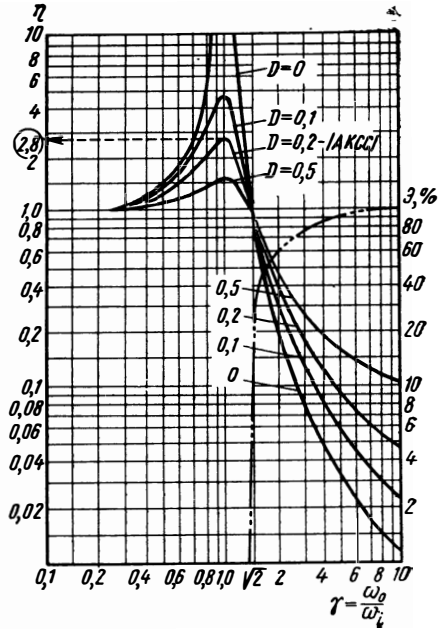


Рис. 8.1. Схема амортизации прибора с одной степенью свободы

Рис. 8.2. Частотные характеристики амортизированной системы в зависимости от коэффициента демпфирования D , коэффициента виброизоляции γ и коэффициента расстройки η



Виброизоляция системы оценивается отношением амплитуды колебания основания к амплитуде колебания амортизированного прибора. Это отношение называют коэффициентом виброизоляции η и определяют по формуле

$$\eta = \frac{A_B}{A_0} = \sqrt{\frac{(\gamma^2 - 1)^2 + D^2 \gamma^2}{1 + D^2 \gamma^2}}. \quad (8.4)$$

Степень виброизоляции часто оценивается величиной, обратной коэффициенту виброизоляции, и называется коэффициентом передачи ε

$$\varepsilon = \frac{1}{\eta} = \frac{A_0}{A_B} \sqrt{\frac{1 + D^2 \gamma^2}{(\gamma^2 - 1)^2 + D^2 \gamma^2}}. \quad (8.5)$$

Как видно из этого выражения, при $\varepsilon=1/\eta=1$ коэффициент расстройки будет равен $\sqrt{2}$ или 0, а при $D=0$ $\varepsilon=1/(\gamma^2-1)$.

Из рассмотрения частотных характеристик амортизированных систем, приведенных на рис. 8.2, видно, что виброизолирующие свойства проявляются лишь в области, лежащей выше $\sqrt{2}$, и что демпфирование существенно снижает перегрузку только тогда, когда система находится в условиях резонанса. На рисунке пунктиром показана кривая КПД виброизоляции, называемая эффективностью виброизоляции \mathcal{E} , при $D \approx 0$

$$\mathcal{E} = (1 - \gamma^2) 100\%. \quad (8.6)$$

Практически для амортизированной системы условия виброизоляции обеспечиваются, если коэффициент расстройки находится в пределах 2—5. Нижний предел приближает систему к резонансу. Верхний предел увеличивать бесполезно, так как при этом эффективность виброизоляции остается постоянной.

Для заданного значения коэффициента виброизоляции коэффициент демпфирования определяется выражением

$$D = \sqrt{\frac{(\gamma^2 - 1)^2 - \eta^2}{(\eta^2 - 1)\gamma^2}}. \quad (8.7)$$

Коэффициент передачи указывает, во сколько раз амплитуда колебания системы больше или меньше амплитуды колебания основания. Вдали от резонанса для определения этого коэффициента можно пользоваться упрощенным его выражением

$$\varepsilon = A_0/A_B = 1/\eta = 1/(\gamma^2 - 1).$$

Расчет амортизации системы с одной степенью свободы. Система амортизации оказывается с одной степенью свободы в случае воздействия на нее вибрации в виде вертикальных гармонических колебаний. Расчет параметров такой амортизированной системы может быть выполнен, если заданы габаритные размеры и масса прибора, координаты центра тяжести (ЦТ), число амортизаторов N , координаты их установки l_x, l_y, l_z , амплитуда или частота возмущающих колебаний и допустимая перегрузка, действующая на прибор.

Расчетом определяются максимальная амплитуда колебаний амортизированного прибора, линейная жесткость системы и ее отдельных амортизаторов, статический прогиб амортизаторов и собственная частота системы.

Максимальная амплитуда колебания системы находится из выражения (7.1)

$$A_0 = 250 j/f_B^2 \text{ при } c \ll m\omega^2. \quad (8.8)$$

Максимальная динамическая сила, действующая на прибор,

$$P = jG = AG f_B^2/250. \quad (8.9)$$

Собственная частота амортизированного прибора

$$f_0 = 0,16 \sqrt{C/m}. \quad (8.10)$$

Жесткость системы C определяет жесткости отдельных равнонагруженных амортизаторов $c_i = C/N$.

Считаем, что колебание системы с одной степенью свободы происходит по синусоидальному закону с интервалами времени $T = 2\pi/\omega_0$. Отсюда собственная частота системы является величиной, обратной T , и ее значение запишется в виде

$$f_0 = 1/T = \omega_0/(2\pi) = [1/(2\pi)] \sqrt{C/m} = 0,16\sqrt{Cg/G}.$$

Пример 1. Прибор весом $G_m = 40 \cdot 10$ Н должен быть установлен на 4 амортизаторах. Амортизаторы расположены на днище прибора симметрично относительно осей X и Y . Центр тяжести прибора совпадает с геометрическим центром и с началом координат. Частота вынужденных колебаний 24 Гц. Допустимая перегрузка, действующая на прибор, 4 g . Необходимо выбрать амортизаторы (см. § 8.7), определить коэффициенты расстройки и передачи и эффективность виброизоляции.

Максимальную амплитуду колебания прибора находим, используя выражение (8.8), $A_0 = 250 \cdot 4/24^2 = 1,74$ мм = $1,74 \cdot 10^{-3}$ м.

Суммарная жесткость амортизаторов системы

$$C = G_m/A_0 = 40 \cdot 10/(1,74 \cdot 10^{-3}) = 23 \cdot 10^4 \text{ Н/м}.$$

Тогда нагрузка на один амортизатор будет $p_i = 40 \cdot 10/4 = 100$ Н и жесткость амортизатора $c_i = 23 \cdot 10^4/4 = 5,75 \cdot 10^4$ Н/м.

Из этих условий выбираем амортизаторы типа АП-3-11,75 (см. табл. 8.1). Собственную частоту системы находим из выражения (8.10).

$$f_0 = \sqrt{23 \cdot 10^4/(40 \cdot 40)} = 12 \text{ Гц}.$$

Коэффициент расстройки $\gamma = 24/12 = 2$, т. е. удовлетворяет условию $\gamma = 2 \div 5$. Пренебрегая демпфированием как малой величиной, находим коэффициент передачи

$$\varepsilon = 1/(2^2 - 1) = 0,33.$$

Эффективность виброизоляции находим из выражения (8.6):

$$\mathcal{E} = (1 - 0,33) 100 = 66$$

Для определения параметров η , γ или \mathcal{E} можно использовать и график, приведенный на рис. 8.2.

В системе с одной степенью свободы получают однонаправленные колебания, поэтому статические нагрузки амортизаторов p_i образуют систему параллельных сил, удовлетворяющих условию

$$\sum_{i=1}^N p_i = G; \quad \sum_{i=1}^N p_i l_x = 0; \quad \sum_{i=1}^N p_i l_y = 0$$

и дополнительному уравнению

$$\sum_{i=1}^N p_i l_x l_y = 0.$$

8.2. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ

При воздействии на амортизированную систему произвольно направленных гармонических колебаний в ней в зависимости от характера распределения нагрузки между амортизаторами или различными параметрами их жесткости могут возникать взаимосвязанные колебания. При этом поступательные колебания по од-

ной из трех осей могут вызвать поступательные и угловые перемещения по двум другим осям с определенными амплитудами и частотами.

В системе прямоугольных координат X , Y и Z величину перемещений при поступательном движении вдоль осей обозначим x , y , z и при угловых перемещениях вокруг этих осей φ_x , φ_y , φ_z .

Каждая из шести степеней свободы системы может иметь свою собственную частоту колебаний, и совпадение одной из них с частотой вынужденных колебаний способствует появлению в системе частного резонанса. При отсутствии демпфирования и при сравнительно малых перемещениях движение системы в общем случае можно описать шестью взаимосвязанными линейными однотипными дифференциальными уравнениями. Подстановкой частных решений в такую систему уравнений получают основную систему алгебраических уравнений [19]

$$\begin{cases} (C_x - m \omega^2) x + R_{xz} \varphi_y - R_{xy} \varphi_z = 0; \\ (C_y - m \omega^2) y + R_{xy} \varphi_z - R_{yz} \varphi_x = 0; \\ (C_z - m \omega^2) z + R_{zy} \varphi_x - R_{zx} \varphi_y = 0; \\ (C_{xx} - I_x \omega^2) \varphi_x - R_{yz} y + R_{zy} z - C_{zx} \varphi_z - C_{xy} \varphi_y = 0; \\ (C_{yy} - I_y \omega^2) \varphi_y - R_{zx} z + R_{xz} x - C_{xy} \varphi_x - C_{yx} \varphi_z = 0; \\ (C_{zz} - I_z \omega^2) \varphi_z - R_{xy} x + R_{yx} y - C_{yz} \varphi_y - C_{zx} \varphi_x = 0, \end{cases} \quad (8.11)$$

где c_x , c_y , c_z — жесткости каждого i -го амортизатора, соответствующие направлению осей X , Y и Z ; l_x , l_y , l_z — координаты размещения амортизаторов относительно центральных осей; I_x , I_y , I_z — моменты инерции системы относительно осей X , Y и Z ; n — число амортизаторов в системе.

Для постоянных коэффициентов при x , y , z , φ_x , φ_y , φ_z , характеризующих жесткостные параметры, примем следующие обозначения:

$$C_x = \sum_1^n c_x; \quad C_y = \sum_1^n c_y; \quad C_z = \sum_1^n c_z$$

— суммарные жесткости амортизаторов вдоль координатных осей;

$$R_{xy} = \sum_1^n c_x l_y; \quad R_{yx} = \sum_1^n c_y l_x; \quad R_{zx} = \sum_1^n c_z l_x;$$

$$R_{xz} = \sum_1^n c_x l_z; \quad R_{yz} = \sum_1^n c_y l_z; \quad R_{zy} = \sum_1^n c_z l_y$$

— линейно-поворотные жесткости относительно каждой из трех координатных плоскостей системы;

$$C_{xx} = \sum_1^n (c_y l_z^2 + c_z l_y^2); \quad C_{yy} = \sum_1^n (c_x l_z^2 + c_z l_x^2);$$

$$C_{zz} = \sum_1^n (c_x l_y^2 + c_y l_x^2)$$

— крутильные жесткости системы при перемещении ее вокруг координатных осей;

$$C_{xy} = \sum_1^n c_z l_x l_y; \quad C_{yz} = \sum_1^n c_x l_y l_z; \quad C_{xz} = \sum_1^n c_y l_x l_z$$

— центробежные моменты жесткости, отнесенные к единице поступательного перемещения в направлении координатных осей.

Система уравнений (8.11) позволяет получить уравнение шестой степени относительно ω^2 :

$$A(\omega^2)^6 + R(\omega^2)^5 + C(\omega^2)^4 + D(\omega^2)^3 + E(\omega^2)^2 + F(\omega^2) - 0. \quad (8.12)$$

Корни этого уравнения $\omega_{01}, \omega_{02}, \dots, \omega_{06}$ являются собственными частотами амортизированной системы.

Рассмотренный случай в практической разработке РЭА встречается крайне редко. Однако из уравнений (8.11) вытекают все частные случаи определения собственных частот реальных амортизированных систем, рассматриваемых ниже.

8.3. СХЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПОДВЕСКИ ПРИБОРОВ НА АМОТИЗАТОРАХ

Схемы амортизации. При значительном интервале между наибольшей и наименьшей из шести собственных частот колебательной системы трудно избежать резонанса в силу возросшей вероятности совпадения одной из частот, лежащей в этом интервале, с частотой возбуждающих колебаний. Поэтому при выборе схемы амортизированной системы предусматривают меры по сужению спектра собственных частот и снижению до минимума угловых колебаний.

Система амортизации значительно упрощается, если:

а) амортизаторы равнонагружены, имеют одинаковую жесткость, а нагрузка каждого равна или несколько ниже нормально-го номинала, указанного в ТУ;

б) центр тяжести прибора находится в плоскости крепления амортизаторов и совпадает с центром жесткости (ЦЖ);

в) крепление амортизаторов относительно координатных плоскостей симметричное, ЦТ прибора совпадает с началом координат, ЦЖ амортизаторов лежит на одной из осей, а расстояние между ЦТ и ЦЖ минимальное;

г) амортизаторы установлены симметрично относительно плоскостей, образованных главными осями инерции YX , YZ и XZ , а начало координат совпадает с ЦТ прибора;

д) амортизаторы установлены на жесткой плоскости, а плоскость установки выверена соответствующими прокладками;

е) амортизаторы имеют ограничители, препятствующие отрыву прибора от фундамента при разрушении упругих элементов.

Совмещение ЦТ с ЦЖ амортизированной системы. При совмещении в колебательной системе ЦТ с ЦЖ пропадает взаимосвязанность колебаний и задача определения собственных частот уп-

рошается. Применяя способ наклона опор амортизаторов (рис. 8.3), можно создать условия, идентичные совмещению ЦТ и ЦЖ. Для этого все амортизаторы устанавливаются на наклонных опорах так, чтобы их продольные жесткости c_1 были направлены к ЦТ амортизируемого прибора. Место пересечения продольных жесткостей амортизаторов называют фокусированным ЦЖ.

При поступательном перемещении системы вдоль какой-либо из координатных осей в амортизаторах появляются реакции сил не только в направлении этой оси, но и одновременно в направлении другой оси, совпадающей с жесткостью c_2 и направленной в плоскости установки амортизаторов.

Наклоном опорной плоскости амортизаторов можно подобрать такое положение, при котором статические моменты реакции амортизаторов при поступательном перемещении прибора будут равны нулю. Это также относится и к угловым перемещениям прибора при равенстве нулю суммы составляющих реакций амортизаторов в проекции их на оси X , Y и Z . Колебания линейные и угловые здесь делаются независимыми друг от друга, поэтому появляется возможность раздельного подбора их частот.

Жесткости системы в направлении осей Y и Z определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} C_y &= c_1 \sin^2 \varphi + c_2 \cos^2 \varphi; \\ C_z &= c_1 \cos^2 \varphi + c_2 \sin^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (8.13)$$

Собственные частоты в направлении указанных осей находят обычным способом, как для несвязанных колебаний.

8.4. КРЕПЛЕНИЕ НА ПРИБОРАХ АМОРТИЗАТОРОВ И ЭЛАСТИЧНЫХ СВЯЗЕЙ

Установка и крепление амортизаторов. Как правило, амортизаторы крепятся на жестком основании прибора и к фундаменту. Установка их производится на выверенной плоскости, а обнаруженное отклонение — неплоскостность компенсируют установкой прокладок или шайб. Этими мерами обеспечивается одинаковый прогиб амортизаторов (равнонагруженность). Наконец, там, где это возможно или необходимо, крепление амортизаторов дополняется так называемыми страховыми элементами, препятствующими отрыву прибора от фундамента в случае непредвиденного

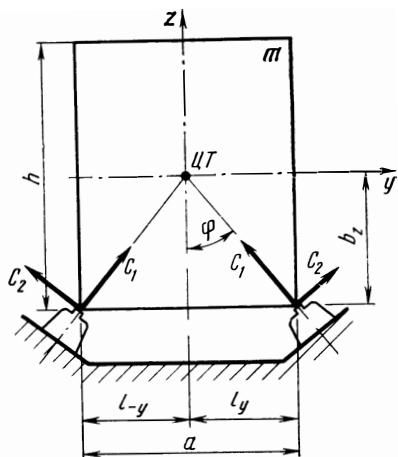


Рис. 8.3. Схема расположения наклонных амортизаторов

разрушения упругих элементов. Конструктивно страховка отрыва прибора от фундамента выполняется в виде ограничительных шайб, упоров или замков. У некоторых стандартных амортизаторов элементы страховки предусмотрены конструкцией (рис. 8.4).

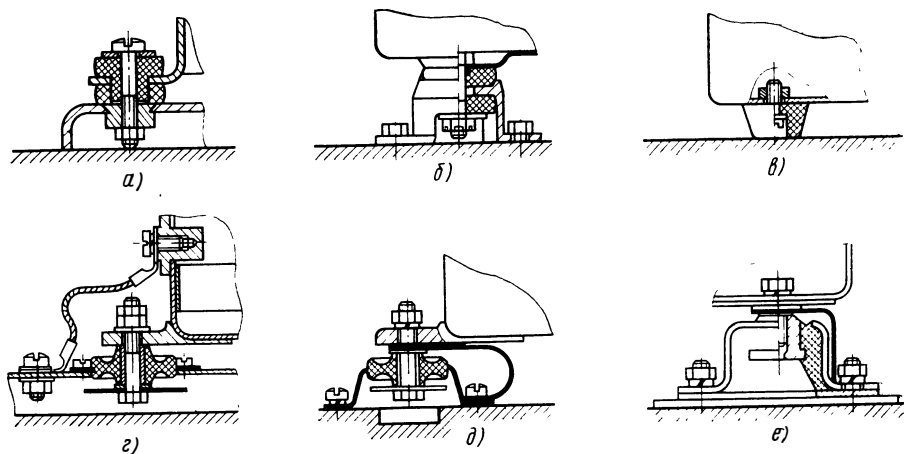


Рис. 8.4. Крепление приборов на амортизаторах к фундаменту с использованием резиновых втулок (а, б), амортизаторов: типа АО (а), АП (з), АЧ (д) и типа АКСС (е)

Приборы устанавливаются на трех и более амортизаторах. Если ЦТ прибора расположен на высоте, превышающей наименьшее расстояние между крайними амортизаторами, установленными в горизонтальной плоскости, то верхнюю часть прибора дополнительно крепят к вертикальной переборке двумя и более амортизаторами.

При амортизации систем амортизаторы используют в параллельном и последовательном соединениях. При параллельном соединении жесткость системы увеличивается прямо пропорционально количеству амортизаторов. При последовательном соединении амортизаторов жесткость системы снижается, а общий статический прогиб увеличивается [34].

Установка амортизаторов на приборах должна учитывать возможность смены и удобного крепления их к основанию без разборки.

Внешние связи амортизированного прибора. Присоединение к прибору электрических кабелей, волноводных звеньев, трубопроводов, воздуховодов вентиляционной системы, заземления и тому подобных конструкций может значительно изменить жесткость системы амортизации. Избежать этого можно использованием эластичных вводов в амортизированный прибор. Считают что все внешние механические связи прибора не должны превышать 8—10 % общей жесткости установленных на нем амортизаторов.

Гибкость связей достигается применением мягких марок кабеля или соединительных жгутов, гибких волноводов, эластичных присоединительных звеньев в вентиляционных воздуховодах, гибких шлангов трубопроводов, мягких шин или канатиков для заземления и т. д.

Перед вводом в прибор кабеля из него образуют петлю, размер которой определяется диаметром кабеля и допускаемым наименьшим радиусом его изгиба по ТУ. Присоединение прибора к вентиляционной системе выполняют резиновыми или брезентовыми патрубками, заземление корпуса — гибкими перемычками из бронзы или плетеным проводом с припаянными наконечниками. Присоединение трубопровода для подачи в прибор под давлением масла, воды или охлаждающих смесей производится с помощью гибких дюритовых патрубков в виде петель или спиралей. Присоединение волноводного тракта выполняется гофрированными участками.

8.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ РЕАЛЬНЫХ АМОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Графическое определение собственных частот. График зависимости отношения связанной частоты собственных колебаний f_0 к несвязанной f_z от отношения жесткостей c_x/c_z и c_y/c_z , приведенный на рис. 8.5, позволяет определить собственные частоты амортизированной системы графическим способом [19].

Пример 2. Определим собственные частоты прибора, установленного на 4 амортизаторах, по схеме, указанной на графике. Координаты: $l_x=20$ см, $l_y=15$ см, $l_z=17$ см. Размеры прибора: $a=50$ см, $b=40$ см, $h=30$ см. Масса прибора по объему распределена равномерно. Система симметричная относительно осей X и Y .

Собственная частота по оси Z $f_z=10$ Гц. Жесткости по осям X и Y равны, а отношение жесткостей $c_y/c_z=2/3$.

Определяем радиус инерции прибора относительно оси Y

$$\rho_y = \sqrt{(a^2 + h^2)/12} = \sqrt{5^2 + 3^2}/12 = 1,68 \text{ см};$$

численное значение для параметра $l_z/\rho_y=1,7/1,68=1,01$ и аргумента $(\rho_y/l_x) \sqrt{c_y/c_z} = (1,68/20) \sqrt{2/3}=0,68$.

По графику находим, что $(\rho_y/l_x) (f_{01}/f_z)=0,55$ и $1,35$. Разделим эти числа на $\rho_y/l_x=0,84$ и получим отношение частот f_{01}/f_z , равное $0,65$ и $1,60$. Абсолютное значение этих частот $f_{01}=0,65f_z=0,65 \cdot 10=6,5$ Гц; $f_{02}=1,6f_z=1,6 \cdot 10=16$ Гц.

Также находим другую пару связанных частот f_{03} и f_{04}

$$\rho_x = \sqrt{4^2 + 3^2}/12 = 1,44 \text{ см}; l_z/\rho_x = 1,7/1,44 = 1,18.$$

Так как $c_x=c_y$, то $(\rho_x/l_y) \sqrt{c_x/c_z} = (1,44/15) \sqrt{2/3}=0,79$. По графику для этого аргумента и значения $l_z/\rho_x=1,18$ находим $(\rho_x/l_y) (f_{0,34}/f_z)=0,4$ и $1,7$. Делим эти числа на $\rho_x/l_y=0,96$, получим отношение частот $f_{0,34}/f_z$, равное $0,42$ и $1,77$.

Тогда абсолютное значение f_{03} и f_{04} будет определяться как

$$f_{03} = 0,42 f_z = 0,42 \cdot 10 = 4,2 \text{ Гц} \text{ и } f_{04} = 1,77 f_z = 1,77 \cdot 10 = 17,7 \text{ Гц}.$$

Из полученных частот выбираем максимальное значение $17,7$ Гц и определяем минимальную частоту вынужденных колебаний, при которой будет обеспечиваться виброизоляция $f_{в} = 17,7 \sqrt{2} = 25$ Гц.

Определим теперь собственные частоты аналитически. Для этого рассмотрим частотные случаи.

Случай 1 (рис. 8.6). Центр жесткости амортизаторов совпадает с ЦТ прибора, масса которого равномерно распределена по объему, и началом координатных осей X, Y, Z . Они одновременно являются главными центральными осями инерции.

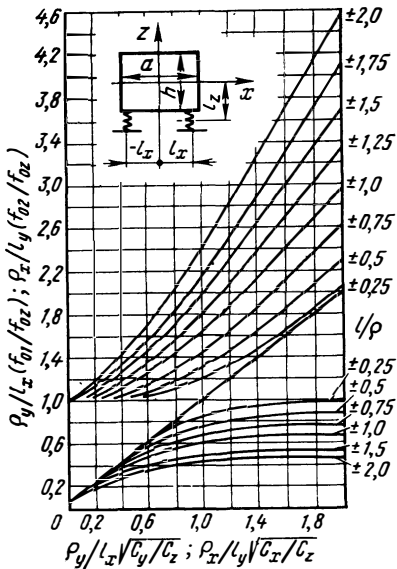


Рис. 8.5. График зависимости отношения связанной частоты собственных колебаний к несвязанной частоте от отношения жесткостей C_x/C_z

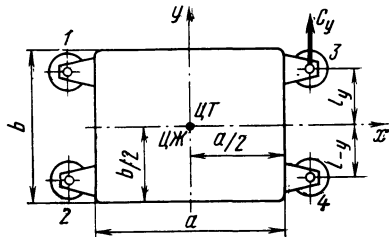
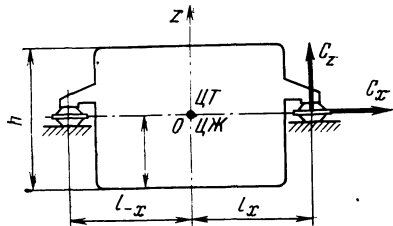


Рис. 8.6. Схема виброизоляции прибора (к рассмотрению случая 1)

Для такого случая все шесть степеней свободы оказываются независимыми, так как линейно-поворотные жесткости и центробежные моменты равны нулю. Тогда система уравнений (8.11) в алгебраической форме будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 (C_x - m\omega^2)x &= 0; & (C_{xx} - I_x\omega^2)\varphi_x &= 0; \\
 (C_y - m\omega^2)y &= 0; & (C_{yy} - I_y\omega^2)\varphi_y &= 0; \\
 (C_z - m\omega^2)z &= 0; & (C_{zz} - I_z\omega^2)\varphi_z &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{8.14}$$

Решая систему относительно ω и подставляя $\omega = 2\pi f$, находим значение для всех шести собственных частот системы:

$$\left. \begin{aligned}
 f_{0x} &= 0,16 \sqrt{C_x/m}; & f_{0y} &= 0,16 \sqrt{C_y/m}; & f_{0z} &= \sqrt{C_z/m}; \\
 f_{\varphi x} &= 0,16 \sqrt{C_{xx}/I_x}; & f_{\varphi y} &= 0,16 \sqrt{C_{yy}/I_y}; \\
 f_{\varphi z} &= 0,16 \sqrt{C_{zz}/I_z}.
 \end{aligned} \right\}
 \tag{8.15}$$

Из этих уравнений видно, что при равенстве линейных жесткостей и моментов инерции относительно трех осей все собственные частоты системы будут равны между собой.

Коэффициенты I_x, I_y, I_z, m характеризуют инерционность амортизированной системы относительно осей X, Y, Z . Для прибора, имеющего форму параллелепипеда,

$$I_x = m(b^2 + h^2)/12; \quad I_y = m(a^2 + h^2)/12; \quad I_z = m(a^2 + b^2)/12;$$

где a — ширина прибора (плоскость Y, Z); b — глубина его (плоскость X, Z); h — высота (плоскость X, Y).

Пример 3. Для рассмотренного случая определим собственные частоты прибора с формой параллелепипеда весом $40 \cdot 10$ Н, установленного на амортизаторах АП-3-11,25 (см. табл. 8.1). Жесткость амортизаторов $c_x = c_y = 16 \cdot 10^4$ Н/м, $c_z = 7 \cdot 10^4$ Н/м. Размеры прибора: ширина $a = 0,5$ м, глубина $b = 0,4$ м и высота $h = 0,3$ м.

Расстояние от амортизаторов до центральных осей:

		1	2	3	4
По оси X	$I_x, \text{ м}$	—0,3	—0,3	0,3	0,3
По оси Y	$I_y, \text{ м}$	—0,15	0,15	—0,15	0,15
По оси Z	$I_z, \text{ м}$	0	0	0	0

Определим вначале все постоянные коэффициенты уравнения (8.14):

$$C_x = C_y = 4 \cdot 16 \cdot 10^4 = 64 \cdot 10^4 \text{ Н/м};$$

$$C_z = 4 \cdot 7 \cdot 10^4 = 28 \cdot 10^4 \text{ Н/м};$$

$$C_{xx} = 4 \cdot 7 \cdot 10^4 \cdot 0,15^2 = 0,63 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$C_{yy} = 4 \cdot 7 \cdot 10^4 \cdot 0,30^2 = 2,52 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$C_{zz} = 4 \cdot 16 \cdot 10^4 \cdot 0,15^2 + 0,30^2 = 7,2 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Масса прибора $m = 40 \cdot 10/9,81 \approx 40$ кг.

Моменты инерции относительно осей X, Y и Z :

$$I_x = (40/12)(0,4^2 + 0,3^2) = 0,833 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2;$$

$$I_y = (40/12)(0,5^2 + 0,3^2) = 1,13 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2;$$

$$I_z = (40/12)(0,5^2 + 0,4^2) = 1,37 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2.$$

Собственные частоты определяем, используя выражения (8.15):

$$f_{0x} = f_{0y} = 0,16 \sqrt{64 \cdot 10^4 / 40} \approx 20 \text{ Гц};$$

$$f_{0z} = 0,16 \sqrt{28 \cdot 10^4 / 40} \approx 13 \text{ Гц};$$

$$f_{\varphi x} = 0,16 \sqrt{0,63 \cdot 10^4 / 0,833} \approx 13,9 \text{ Гц};$$

$$f_{\varphi y} = 0,16 \sqrt{2,52 \cdot 10^4 / 1,13} \approx 24 \text{ Гц};$$

$$f_{\varphi z} = 0,16 \sqrt{7,2 \cdot 10^4 / 1,37} \approx 37,4 \text{ Гц}.$$

При максимальной собственной частоте 37,4 Гц минимальная частота для обеспечения виброизоляции должна быть не менее $f_b = 37,4 \sqrt{2} = 52,7$ Гц.

Случай 2. Амортизаторы крепятся к основанию прибора в одной плоскости и симметрично относительно плоскостей XZ и YZ (рис. 8.7). Координаты осей являются главными центральными

осями моментов инерции, а ЦТ прибора и начало координат находятся на высоте l_z от плоскости, проходящей через ЦЖ системы, параллельной плоскости $X, 0, Y$. В этих условиях $R_{xz}=R_{yz}$ и

$$R_{xy}=R_{yx}=C_{yz}=C_{xy}=C_{xz}=C_{zy}=C_{yx}=C_{zx}=0.$$

При подстановке заданных для этого случая значений в исходную систему уравнений (8.11) последняя распадается на четыре независимые группы:

$$\begin{aligned} 1. & (C_z - m\omega^2)z = 0; & 2. & (C_{zz} - I_z\omega^2)\varphi_z = 0; \\ 3. & (C_x - m\omega^2)x + R_{xz}\varphi_y = 0; & 4. & (C_y - m\omega^2)y + R_{yz}\varphi_x = 0. \end{aligned} \quad (8.16)$$

$$(C_{yy} - I_y\omega^2)\varphi_y + R_{xz}x = 0; \quad (C_{xx} - I_x\omega^2)\varphi_x + R_{yz}y = 0.$$

Частоты ω_{0z} и $\omega_{\varphi z}$ находим из первых двух уравнений, частоты ω_{0x} , $\omega_{\varphi x}$ и ω_{0y} , $\omega_{\varphi y}$ — из третьего и четвертого уравнений:

$$\begin{aligned} mI_y\omega^4 - (mC_{yy} + I_yC_x)\omega^2 + C_xC_{yy} - R_{xz}^2 &= 0; \\ (\omega^2)^2 &= A_1(\omega^2) + B_1 = 0; \\ mI_x\omega^4 - (mC_{xx} + I_xC_y)\omega^2 + C_yC_{xx} - R_{yz}^2 &= 0; \\ (\omega^2)^2 - A_2(\omega^2) + B_2 &= 0. \end{aligned} \quad (8.17)$$

Решение этих уравнений относительно ω^2 не вызывает затруднений. Численные же значения постоянных коэффициентов определяют заранее в виде

$$\begin{aligned} A_1 &= (mC_{yy} + I_yC_x)/mI_y; & B_1 &= (C_xC_{yy} - R_{xz}^2)/mI_y; \\ A_2 &= (mC_{xx} + I_xC_y)/mI_x; & B_2 &= (C_yC_{xx} - R_{yz}^2)/mI_x. \end{aligned}$$

Тогда решение уравнений (8.17) для $\omega_{0,1,2}$ и $\omega_{0,4,5}$ напишется в виде

$$\begin{aligned} \omega_{0,1,2} &= \sqrt{0,5(A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4B_1})}; \\ \omega_{0,4,5} &= \sqrt{0,5(A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4B_2})}. \end{aligned}$$

Пример 4. Определим для этого случая собственные частоты системы, состоящей из прибора, установленного на четырех амортизаторах АКСС-10М по схеме, приведенной на рис. 8.7. Вес и размеры прибора возьмем из примера 3. Расстояние от плоскости, проходящей через ЦЖ амортизаторов, до плоскости XOY координатных осей прибора, являющихся одновременно и главными центральными осями инерции, равно 0,2 м. Жесткости амортизаторов, ориентированных по координатным осям, равны: $c_x=17 \cdot 10^4$ Н/м, $c_y=10 \cdot 10^4$ Н/м и $c_z=12,5 \cdot 10^4$ Н/м.

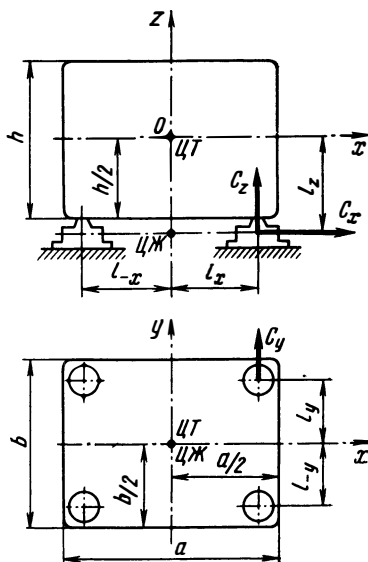


Рис. 8.7. Схема виброизоляции прибора (к рассмотрению случая 2)

Положение каждого амортизатора относительно координатных осей задано следующей таблицей:

			1	2	3	4	
Расстояние до оси:	X	$l_x, \text{ м}$	. . .	-0,2	-0,2	0,2	0,2
	Y	$l_y, \text{ м}$	. . .	-0,15	0,15	-0,15	0,15
	Z	$l_z, \text{ м}$	. . .	0,2	0,2	0,2	0,2

В целях обеспечения равной жесткости по осям X и Y амортизаторы парно разворачиваем в плоскости их установки относительно друг друга на угол 90° .

Определяем вначале постоянные коэффициенты уравнений (8.16):

$$\begin{aligned} C_x &= 2 \cdot 17 \cdot 10^4 + 2 \cdot 10 \cdot 10^4 = 54 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; \\ C_y &= 2 \cdot 10 \cdot 10^4 + 2 \cdot 17 \cdot 10^4 = 54 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; \\ C_z &= 4 \cdot 12,5 \cdot 10^4 = 50 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; \\ C_{xx} &= 54 \cdot 10^4 \cdot 0,2^2 + 50 \cdot 10^4 \cdot 0,15^2 = 3,28 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ C_{yy} &= 54 \cdot 10^4 \cdot 0,2^2 + 50 \cdot 10^4 \cdot 0,15^2 = 4,16 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ C_{zz} &= 54 \cdot 10^4 \cdot 0,15^2 + 54 \cdot 10^4 \cdot 0,2^2 = 3,37 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ R_{xz} &= R_{yz} = 54 \cdot 10^4 \cdot 0,2 = 10,8 \cdot 10^4 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Значения моментов инерции I_x, I_y, I_z берем из примера 3.

Из первой группы уравнений (8.16) находим ω_{0z} , из второй группы — $\omega_{\varphi z}$, одновременно, подставляя $\omega_0/2\pi = f_0$, получаем:

$$f_{0z} = 0,16 \sqrt{54 \cdot 10^4 / 40} = 17,8 \text{ Гц}; \quad f_{\varphi z} = 0,16 \sqrt{33,7 \cdot 10^4 / 13,7} = 25 \text{ Гц}.$$

Частоту связанных колебаний ω_{0x} в плоскости XZ и ω_{0y} в плоскости YZ находим из уравнений (8.16) и (8.17).

Определим постоянные коэффициенты уравнений (8.17):

$$\begin{aligned} A_1 &= (40 \cdot 4,16 \cdot 10^4 + 1,13 \cdot 54 \cdot 10^4) / (40 \cdot 1,13) = 5,04 \cdot 10^4; \\ B_1 &= [54 \cdot 10^4 \cdot 4,16 \cdot 10^4 - (10,8 \cdot 10^4)^2] / (40 \cdot 1,13) = 2,38 \cdot 10^8; \\ A_2 &= (40 \cdot 3,28 \cdot 10^4 + 0,833 \cdot 54 \cdot 10^4) / (40 \cdot 0,833) = 5,43 \cdot 10^4; \\ B_2 &= [54 \cdot 10^4 \cdot 3,28 \cdot 10^4 + (10,8 \cdot 10^4)^2] / (40 \cdot 0,833) = 8,82 \cdot 10^8. \end{aligned}$$

Подставим в уравнения (8.17) числовые значения коэффициентов

$$\begin{aligned} \omega^4_x - 5,04 \cdot 10^4 \omega^2_x + 2,38 \cdot 10^8 &= 0; \\ \omega^4_y - 5,43 \cdot 10^4 \omega^2_y + 8,32 \cdot 10^8 &= 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\omega_{0x, \varphi x} = \sqrt{0,5 [5,05 \cdot 10^4 \pm \sqrt{(5,05 \cdot 10^4)^2 - 4 \cdot 2,38 \cdot 10^8}]}$$

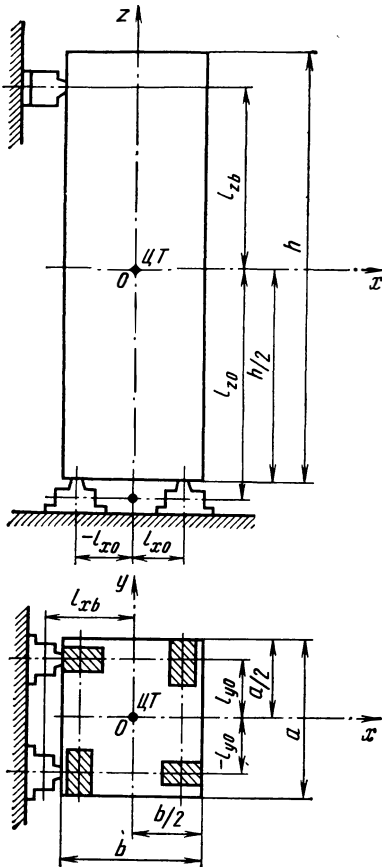
Тогда собственная частота для f_{0x} и $f_{\varphi x}$ определится:

$$\begin{aligned} f_{0x} &= 0,16 \sqrt{(5,05 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4) / 2} = 11,2 \text{ Гц}; \\ f_{\varphi x} &= 0,16 \sqrt{(5,05 \cdot 10^4 + 4 \cdot 10^4) / 2} = 39,9 \text{ Гц} \end{aligned}$$

и для ω_{0y} и $\omega_{\varphi y}$:

$$\begin{aligned} \omega_{0y, \varphi y} &= \sqrt{0,5 [5,43 \cdot 10^4 \pm \sqrt{(5,43 \cdot 10^4)^2 - 4 \cdot 8,82 \cdot 10^8}]}; \\ f_{0y} &= 0,16 \sqrt{(5,43 \cdot 10^4 - 2,36 \cdot 10^4) / 2} = 23,8 \text{ Гц}; \\ f_{\varphi y} &= 0,16 \sqrt{(5,43 \cdot 10^4 + 2,36 \cdot 10^4) / 2} = 44,4 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

Рис. 8.8. Схема виброизоляции прибора (к рассмотрению случая 3)



Случай 3. Амортизированная система (рис. 8.8) симметрична относительно плоскости, образованной координатными осями X, Z . Начало координат совмещено с ЦТ системы, а оси X, Y, Z одновременно являются и главными центральными осями инерции. Система уравнений движения со связанными колебаниями (8.11) в этом случае распадается на две группы не связанных между собой уравнений. Первая группа уравнений описывает симметричные колебания, происходящие в плоскости симметрии XZ , вдоль осей X и Z и вокруг оси Y . Вторая группа уравнений описывает колебания, происходящие в плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии, с поступательным движением оси Y и угловыми колебаниями вокруг осей X и Z .

В рассматриваемом случае $R_{xy} = R_{zy} = C_{xy} = C_{yz} = 0$, и система алгебраических уравнений (8.11) примет вид

$$\left. \begin{aligned} (C_x - m\omega^2)x + R_{xz}\varphi_y &= 0; \\ (C_z - m\omega^2)z - R_{zx}\varphi_y &= 0; \\ (C_{yy} - I_y\omega^2)\varphi_y + R_{xz}x - R_{zx}z &= 0; \end{aligned} \right\} 1 \quad (8.18)$$

$$\left. \begin{aligned} (C_y - m\omega^2)y + R_{yz}\varphi_x - R_{yz}\varphi_x &= 0; \\ (C_{xx} - I_x\omega^2)\varphi_x - R_{yz}y - C_{zx}\varphi_z &= 0; \\ (C_{zz} - I_z\omega^2)\varphi_z + R_{yx}y - C_{zx}\varphi_x &= 0. \end{aligned} \right\} 2$$

Каждая из этих групп представляет собой уравнение третьей степени относительно ω^2 :

$$\left. \begin{aligned} A_1\omega^6 + B_1\omega^4 + C_1\omega^2 + D_1 &= 0; \\ A_2\omega^6 + B_2\omega^4 + C_2\omega^2 + D_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.19)$$

Решением этих уравнений можно получить все шесть частот свободных колебаний системы. Коэффициенты уравнений составляют:

$$A_1 = I_y m^2;$$

$$\begin{aligned}
 B_1 &= -(C_{yy} m^2 + C_z I_y m + C_x I_y m); \\
 C_1 &= C_z C_{yy} m + C_x C_{yy} m + C_x C_z I_y - R_{xz}^2 - R_{zx}^2 m; \\
 D_1 &= C_z R_{xz}^2 + C_x R_{zx}^2 - C_x C_z C_{yy}; \\
 A_2 &= I_x I_z m;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_2 &= -(C_{zz} I_x m + C_{xx} I_z m + C_y I_x I_z); \\
 C_2 &= C_{zz}' I_x' m + C_{zz} C_y I_x + C_{zz} C_y I_z + R_{yx}^2 I_x - R_{yz}^2 I_z - C_{zx}^2 m; \\
 D_2 &= C_y C_{zx}^2 + C_{zz} R_{yz}^2 + C_{xx} R_{yx}^2 - 2R_{yz} C_{zx}' R_{yx} - C_y C_{xx} C_{zz}.
 \end{aligned}$$

Уравнения (8.19) можно представить в более простой форме, удобной для решения корней методом подстановки:

$$\left. \begin{aligned}
 (\omega^2)^3 + \alpha_1 (\omega^2)^2 + \beta_1 (\omega^2) + \delta_1 &= 0; \\
 (\omega^2)^3 + \alpha_2 (\omega^2)^2 + \beta_2 (\omega^2) + \delta_2 &= 0,
 \end{aligned} \right\} \quad (8.20)$$

где постоянные коэффициенты определяются выражениями

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= B_1/A_1; \quad \beta_1 = C_1/A_1; \quad \delta_1 = D_1/A_1. \\
 \alpha_2 &= B_2/A_2; \quad \beta_2 = C_2/A_2; \quad \delta_2 = D_2/A_2.
 \end{aligned}$$

Уравнения (8.20) решаются подстановкой

$$\omega_{0;1;2} = \sqrt{x - \alpha_{1;2}/3},$$

тогда

$$x^3 + 3px + 2q = 0,$$

где

$$p = \beta_1/3 - \alpha_1^2/9; \quad q = \alpha_1^3/27 - \alpha_1 \beta_1/6 + \delta_1/2,$$

откуда

$$\begin{aligned}
 x_1 &= -2\sqrt{|p|} \cos \varphi/3; \\
 x_2 &= 2\sqrt{|p|} \cos (60 - \varphi/3); \\
 x_3 &= 2\sqrt{|p|} \cos (60 + \varphi/3).
 \end{aligned}$$

В этих уравнениях $\cos \varphi = q/(\pm p \sqrt{p})$, где знак «+» или «-» при $p \sqrt{p}$ должен совпадать со знаком при q , а сумма значений

$$x_1 + x_2 + x_3 = 0.$$

8.6. ИЗОЛЯЦИЯ АППАРАТУРЫ ОТ УДАРОВ

При испытании РЭА на ударостойкость наиболее часто используют форму ударного импульса в виде полуволны синусоиды с максимальной амплитудой ускорения a и длительностью $t_n = T/2$. Тогда ускорение в любой момент времени может быть выражено уравнением

$$\ddot{z} = a \sin \omega_n t \quad \text{при } 0 \leq t \leq \pi/\omega_n = t_n, \quad (8.21)$$

где $\omega_n = \pi/t_n$ — условная частота ударного импульса.

С момента прекращения действия ударного импульса, когда $t=t_n$, для рассматриваемой системы вступает в силу закон свободных колебаний с собственной частотой ω_0 .

Наиболее важным параметром ударостойкости РЭА является статическая прочность элементов конструкции и их связей. Величина прочности вытекает из заданной для аппаратуры перегрузки jg .

Так же как и в случае виброизоляции, для ослабления действующего на аппаратуру удара используют упругие элементы с демпфирующими свойствами. Благодаря инерции массы прибора и деформации ее упругих элементов энергия удара гасится, и свободные колебания амортизированной системы быстро затухают.

Целью расчета изоляции удара является определение необходимых параметров амортизаторов из максимально допустимого для прибора действующего ускорения, перемещения прибора на амортизаторах относительно основания с учетом свободных колебаний системы вдали от резонанса.

Из дифференциального уравнения движения амортизированной системы с массой m без учета сопротивления трения (рис. 8.9) определяется ускорение системы u или перегрузка jg , действующая на прибор [19],

$$u = \frac{a \omega_0 \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \sqrt{2(1 + \cos \omega_0 t_n)} \sin\left(\omega_0 t - \frac{\omega_0 t_n}{2}\right). \quad (8.22)$$

Максимальное ускорение наступает при $t = \pi/(2\omega_0) + t_n/2$ и будет иметь вид

$$u_{\text{макс}} = \frac{a \omega_n \omega_0}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \sqrt{2(1 + \cos \omega_0 t_n)}, \quad (8.23)$$

тогда коэффициент изоляции удара определится выражением

$$\eta = \frac{u_{\text{макс}}}{a} = \frac{\omega_n \omega_0}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \sqrt{2(1 + \cos \omega_0 t_n)} = \frac{2\gamma}{\gamma^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\gamma}, \quad (8.24)$$

где $\gamma = \omega_n/\omega_0$ — коэффициент расстройки, равный $T/2t_n$; $T = 2\pi/\omega_0$ — период свободных колебаний системы.

График зависимости коэффициента амортизации удара от коэффициента расстройки, полученный с помощью уравнения (8.24), показан на рис. 8.10. Используя этот график, можно найти ускорение амортизированного прибора, если известны длительность ударного импульса, собственная частота системы и максимальное ускорение, возникающее при ударе основания.

Необходимо отметить, что $\eta \rightarrow 0$ при $\gamma \rightarrow 0$ и $\eta = \pi/2$ при $\gamma = 1$. Тогда действующее ускорение $u_{\text{макс}} = \eta a$. При учете демпфирования коэффициент изоляции удара достигает максимального значения при $\gamma = 0,72$.

Выражение для скорости \dot{z} смещения прибора определяется по формуле

$$\dot{z} = \frac{2a \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \cos \frac{\omega_0 t_n}{2} \left[\cos \frac{\omega_0 t_n}{2} - \cos \left(\omega_0 t_n - \frac{\omega_0 t}{2} \right) \right], \quad (8.25)$$

а для смещения z — по формуле

$$z = \frac{2a\omega_H}{\omega_H^2 - \omega_0^2} \cos \frac{\omega_0 t_H}{2} \left[t_H \cos \frac{\omega_0 t_H}{2} - \frac{1}{\omega_0} \sin \frac{\omega_0 t_H}{2} - \frac{1}{\omega_0} \sin \left(\omega_0 t_H - \frac{\omega_0 t}{2} \right) \right]. \quad (8.26)$$

Пример 5. Прибор, рассмотренный нами в примере 2, подвергается непериодическим ударам с ускорением $100 g$ и длительностью ударного импульса $t_H = 5$ мс. Направление удара перпендикулярно плоскости крепления прибора. Надо определить максимальное ускорение, действующее на прибор.

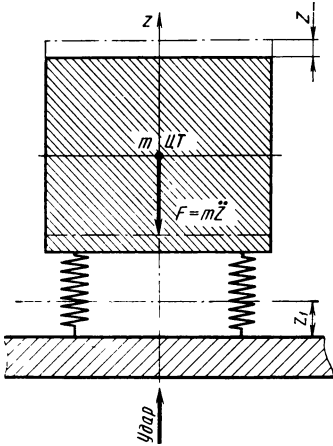
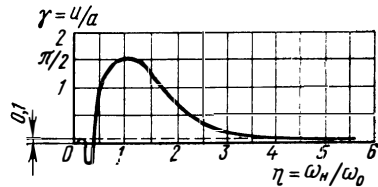


Рис. 8.9. Схема воздействия на прибор удара

Рис. 8.10. График зависимости коэффициента удара от коэффициента расстройки частоты



Вначале определим период ударного импульса:

$$T_H = 2 t_H = 2 \cdot 0,005 = 0,01 \text{ с.}$$

Тогда условная частота импульса определится из соотношения

$$\omega_H = 2 \pi / T_H = 2 \cdot 3,14 / 0,01 = 628 \text{ рад/с.}$$

Отсюда определяется и коэффициент расстройки

$$\gamma = \omega_H / \omega_0 = 628 / 116 = 5,42.$$

Ускорение, действующее на прибор, определяем из выражения (8.24)

$$u_{\max} = \frac{2 a \gamma}{\gamma^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2 \gamma} = 100 \frac{2 \cdot 5,42}{5,42^2 - 1} \cos \frac{3,14}{2 \cdot 5,42} = 11,2 g.$$

Результаты расчета подтверждает, что амортизаторы, подобранные для виброизоляции прибора, рассмотренного в примере 2, удовлетворяют условиям изоляции его от ударов.

Рассмотрим не менее важный случай ударного воздействия в результате свободного падения (приземление, приводнение, сброс или случайное падение) контейнера с прибором, установленным в нем на амортизаторах (рис. 8.11).

Из дифференциального уравнения движения тела массой m до удара при $t=0$ получаем $z_0 = g/\omega_0^2$; так как $h_1 = h - z_0 = h - g/\omega_0^2$, то скорость в момент соприкосновения контейнера с опо-

рой будет определяться выражением $\dot{z} = \sqrt{2gh}$. Движение контейнера с прибором после момента удара имеет вид:

$$Z = \sqrt{\frac{2gh}{\omega_0^2} + \left(\frac{g}{\omega_0^2}\right)^2} \sin(\omega_0 t - \varphi), \quad (8.27)$$

где $\varphi = \arctg g/(\omega_0 \sqrt{2gh})$.

Максимальная перегрузка в единицах g , действующая на прибор, запишется в виде

$$j = \frac{z_{\max}}{g} = \frac{\omega_0^2}{g} \sqrt{\frac{2gh}{\omega_0^2} + \left(\frac{g}{\omega_0^2}\right)^2} = \sqrt{\frac{2h\omega_0^2}{g} + 1}. \quad (8.28)$$

Решая это уравнение относительно ω_0^2 и C , получаем:

$$\omega_0^2 = (j^2 g)/(2h); \quad C = m\omega_0^2. \quad (8.29)$$

Статическое z_0 и динамическое z_d смещение прибора, подвешенного на пружинах в контейнере, определим из выражений:

$$z_0 = G/C; \quad z_d = \sqrt{2gh/\omega_0^2}. \quad (8.30)$$

Пример 6. Прибор весом $100 \cdot 10$ Н, подвешенный в упаковочном ящике на пружинах, выдерживает без разрушений ускорение $20 g$. Определим жесткость пружин, статическое и динамическое смещение прибора, обеспечивающее безопасное падение его в упакованном виде с высоты $1,5$ м. Количество пружин 8 шт.

Из уравнения (8.29) определяем квадрат собственной частоты системы

$$\omega_0^2 = (20^2 \cdot 981)/(2 \cdot 150) = 1310 \text{ рад}^2/\text{с}^2$$

и жесткость амортизирующих пружин

$$C = (1310 \cdot 100 \cdot 10)/981 = 1333 \text{ Н/см}.$$

Жесткость каждой пружины $c_i = C/8 = 1333/8 = 166$ Н/см, и статическое сжатие этих пружин $z_0 = 100 \cdot 10/1333 = 0,75$ см.

И, наконец, определяем динамическое смещение (максимальное сжатие) пружин.

$$z_d = (2 \cdot 981 \cdot 150)/1310 \approx 15 \text{ см}.$$

В условиях воздействия удара наиболее существенную роль в ударостойкой конструкции играют прочность и пластичность материала. Детали, изготовленные из материала с повышенной пластичностью (пределом текучести), обладают большей ударостойкостью.

Хрупкие материалы (чугун, литевой алюминий, фарфор, силикатное стекло и др.) разрушаются при незначительных деформациях и плохо противостоят ударам. Поэтому в ударостойких конструкциях стремятся хрупкие материалы заменять на материалы с повышенной пластичностью, напри-

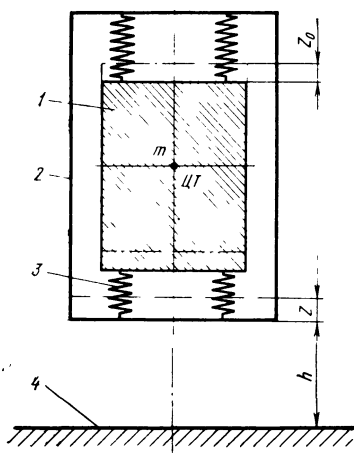


Рис. 8.11. Схема падения контейнера с прибором, установленным на амортизаторах

Z — смещение основания; z_0 — смещение прибора; h — высота падения
1 — прибор; 2 — контейнер; 3 — амортизаторы; 4 — фундамент

мер чугунное литье и литье из хрупких алюминиевых сплавов — на тонколистовой прокат стали или алюминиевых сплавов, изоляционный фарфор — на пластические смолы, силикатное стекло — на органическое и т. д.

8.7. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИБОРНЫХ АМОРТИЗАТОРОВ

Широко используемые приборные амортизаторы, выпускаемые нашей промышленностью, состоят из двух групп.

В первую группу входят амортизаторы металлорезиновые, у которых между металлическими деталями, предназначенными для крепления их к прибору и основанию, запрессован упругий элемент из специальной резины. К достоинствам таких амортизаторов надо отнести компактность конструкции, простоту изготовления и сравнительно малую стоимость. Однако использование резины в качестве упругого материала имеет и свои недостатки. Например, допустимые деформации резины при сохранении ее основных параметров малы, собственная частота амортизаторов меняется с изменением нагрузки, модуль упругости резины увеличивается с понижением температуры и, наконец, под воздействием высокой температуры и солнечной радиации происходит быстрый процесс ее старения.

Ко второй группе относятся амортизаторы металлопружинные. Они представляют собой комбинированные устройства, в которых упругим элементом является пружина в соединении с демпфирующими элементами и другими ограничителями. Эта группа амортизаторов допускает значительное изменение рабочих температур; они долговечны, а их параметры сохраняют свое постоянство длительное время и обеспечивают лучшие условия для изоляции приборов от вибрационных и ударных перегрузок.

Рассмотрим кратко основные параметры, конструкцию и размеры приборных амортизаторов, наиболее часто применяемых для защиты РЭА от динамических нагрузок.

Амортизаторы плоские АП и чашечные АЧ приведены в табл. 8.1. Первые имеют квадратный фланец, резиновый массив, армированный крепежной втулкой. У вторых вместо фланца резиновой той же формы и марки армировано чашкообразное основание. Оба амортизатора имеют одинаковые нагрузочные характеристики и различаются между собой установочными размерами.

Амортизаторы корабельные со страховкой АКСС-М и АКСС-И приведены в табл. 8.2. Они одинаковы по конструкции и различаются между собой эластичностью резины. Статические, динамические и ударные жесткости их приведены в табл. 8.3. При температуре от 293 до 333 К жесткость этих амортизаторов снижается на 20—30%. Шумоизолирующие свойства амортизаторов обеспечивают перепад уровня шумов до 15—20 дБ.

Опорные амортизаторы АО используются в переносных приборах как упругие опоры, закрепляемые к основанию винтами с шайбой. Размеры и нагрузочные характеристики их приведены в табл. 8.4.

Амортизаторы пространственного нагружения АПН (табл. 8.5) относятся к группе металлопружинных равночастотных. Они гасят колебания с ускорением до 15 g при частоте от 0 до 1500 Гц и снижают ударные ускорения в 2,8 раза, также удовлетворительно работают в условиях пониженного давления при перепаде температуры от 213 до 423 К.

Амортизаторы типа ДК (табл. 8.6) имеют упругую металлическую структуру с демпфирующими свойствами. Динамическая жесткость этих амортизаторов является функцией амплитуды колебания A_0 и составляет $C_0 = a/A_0$. Коэффициент a указывается в ТУ.

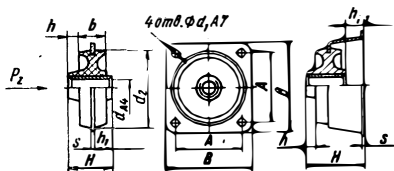
Амортизаторы тросовые АТ обеспечивают виброизоляцию при частоте от 5 до 2000 Гц с ускорением до 10 g, рассчитаны на многократные удары с ускорением до 15 g и одиночные удары с ускорением до 1000 g. Размеры, нагрузка и жесткость их даны в табл. 8.7.

Для защиты отдельных узлов РЭА от воздействия вибрации и ударов широко применяют амортизаторы сборные из втулок, шайб и прокладок. Мате-

Таблица 8.1. Амортизаторы плоские АП и чашечные АЧ

Тип АП

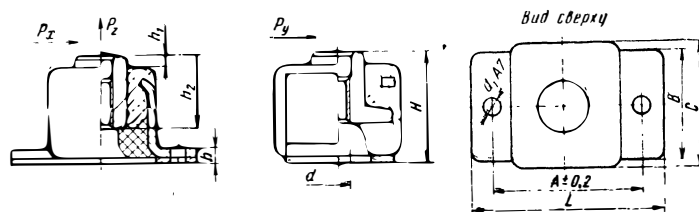
Тип АЧ



Обозначение для АП и АЧ	Номинальная нагрузка P_z , Н	Предельная нагрузка P_z , Н	Размеры, мм										
			B	A	H	h	h_1	d	d_1	d_2	b	s	Масса, кг
АП-1-0,45	4,5	280	$\frac{32}{42}$	$\frac{25}{35}$	$\frac{10}{18}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{2,5}{8}$	$\frac{4,2}{4,2}$	$\frac{3,6}{3,6}$	$\frac{25}{25}$	$\frac{5,6}{5,6}$	$\frac{0,8}{0,6}$	$\frac{0,007}{0,010}$
АП-1-0,90	9,0												
АП-1-1,35	13,5												
АП-1-1,80	18,0												
АП-1-2,25	22,5												
АП-2-0,90	9,0	800	$\frac{45}{60}$	$\frac{35}{50}$	$\frac{16}{30}$	$\frac{4,5}{4,5}$	$\frac{6}{13,5}$	$\frac{6,2}{6,2}$	$\frac{4,8}{4,8}$	$\frac{38}{38}$	$\frac{9,5}{9,5}$	$\frac{1,2}{0,8}$	$\frac{0,025}{0,085}$
АП-2-1,80	18,0												
АП-2-2,70	27,0												
АП-2-3,60	36,0												
АП-2-4,50	45,0												
АП-2-5,40	54,0												
АП-3-4,50	45,0	1500	$\frac{57}{76}$	$\frac{45}{64}$	$\frac{25}{38}$	$\frac{4,5}{4,5}$	$\frac{10,5}{13,0}$	$\frac{10,2}{10,2}$	$\frac{6,0}{6,0}$	$\frac{50}{50}$	$\frac{18}{18}$	$\frac{1,5}{1,0}$	$\frac{0,076}{0,135}$
АП-3-6,75	67,5												
АП-3-9,00	90,00												
АП-3-11,25	112,5												
АП-3-15,75	157,5												

Примечание. Прогиб амортизаторов дан при номинальной нагрузке $1,6 \pm 0,4$ мм. Интервал рабочих температур от 228 до 353 К. Собственная частота при амплитуде колебания до 0,5 мм по оси Z от 12 до 200 Гц и в плоскости основания от 30 до 40 Гц. Размеры в числителе даны для амортизаторов АП, в знаменателе — для АЧ. Для амортизаторов АЧ в обозначении вместо АП указывается АЧ.

Таблица 8.2. Амортизаторы корабельные со страховкой АКСС-М и АКСС-И



Обозначение	Номинальная нагрузка, Н			Прогиб от нагрузки по оси Z, мм	Размеры, мм										Масса, кг
	P_z	P_x	P_y		L	A	B	C	H	d	d_1	h	h_1	h_2	
АКСС-10М	100	100	50	0,6	70	54	35		40	M8	7	5	8	27	0,172
АКСС-15М	150	150	100	0,7			40					0,213			
АКСС-25М	250	200	100	0,9			40					0,332			
АКСС-40М	400	400	150	0,7	85	68	55		46	M10	9	8	10	32	0,433
АКСС-60М	600	600	250		100	80	65		50	M12			9	35	0,702
АКСС-85М	850	850	350		120	100	70		60	M14			11	42	1,155
АКСС-25И	250	200	100	1,0	70	54	40	48	40	M8	7	6	8	27	0,240
АКСС-40И	400	400	150	1,2	85	68	55	63	46	M10	9		10	32	0,440
АКСС-60И	600	600	250		100	80	65	73	50	M12			10	35	0,750
АКСС-85И	850	850	350	1,0	120	100	70	80	60	M14	11	8	11	42	1,200

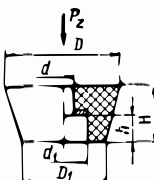
Примечание. Предельная статическая нагрузка по оси Z равна $15P_z$, предельное сжатие 7—12 мм; резина маслостойкая; интервал рабочих температур от 268 до 343 К; гарантийный срок 3 года.

Таблица 8.3. Статические, вибрационные и ударные жесткости амортизаторов АКСС-М и АКСС-И в направлении осей X, Y и Z

Тип амортизатора	Жесткость в направлении осей, Н/мм									Максимальное сжатие, мм		
	статическая			вибрационная			ударная					
	C_z	C_x	C_y	C_z	C_x	C_y	C_z	C_x	C_y	δ_z	δ_x	δ_y
АКСС-10М	125	170	100	550	800	300	600	1700	500	8	7	7
АКСС-15М	150	250	130	650	1150	450	700	2500	750	8	7	7
АКСС-25М	220	500	210	1100	1200	650	1200	2600	1600	8	7	7
АКСС-40М	400	600	350	1650	1700	1000	1900	3900	1700	10	9	9
АКСС-60М	640	800	600	2200	1700	900	2800	4000	1900	10	10	10
АКСС-85М	850	900	620	3100	1900	1000	4000	4900	2100	11	9	9
АКСС-25И	250	250	200	500	700	300	650	1400	800	8	7	7
АКСС-40И	400	700	300	650	900	400	850	1800	850	8	7	7
АКСС-60И	650	1000	350	1000	1200	500	1400	2400	1100	10	10	10
АКСС-85И	800	1200	350	1350	1700	550	1500	3400	1300	11	9	9

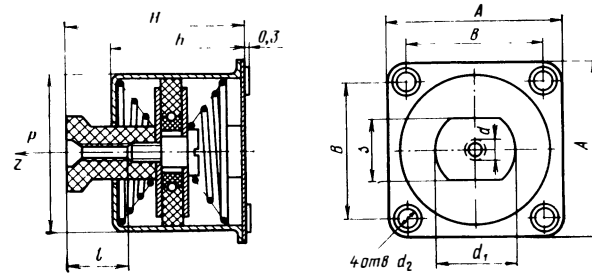
Примечание. Среднее значение коэффициента демпфирования 0,2—0,25. Жесткости указаны для температуры 288—298 К. При температуре окружающей среды 313—333 К указанные жесткости снижаются на 20—30%.

Таблица 8.4. Амортизаторы опорные АО

Эскиз	Обозначение	Номинальная нагрузка, Н	Размеры, мм						Масса, 10^{-3} кг
			H	h	D	D ₁	d	d ₁	
	АО-10	100	9	15	14	12	3,5	7	1
	АО-30	300	13	7,5	28	24	4,8	9	10
	АО-40	400	18	11	32	24	6	11	15
	АО-60	600	25	12	50	36	7	13	50

Примечание. Прогиб амортизаторов при номинальной нагрузке равен $1,6 \pm 0,6$ мм. Интервал рабочих температур от 233 до 353 К. Предельная статическая нагрузка $10P_z$.

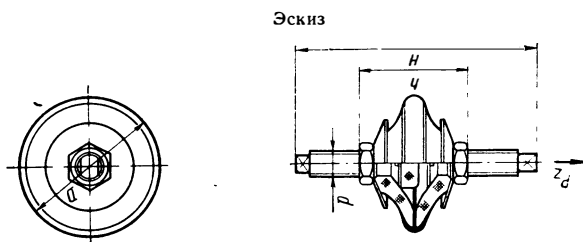
Таблица 8.5. Амортизаторы пространственного нагружения АПН



Типо-размер	Нагрузка P_2, H	Размеры, мм										Масса, кг
		H	h	A	B	D	d	l	d_1	d_2	s	
АПН-1	0,05—0,10	39	29	38	29	33	M4	10	14	4,2	11	0,050
АПН-2	0,10—0,25	47	35	44	35	40	M5	10	17	4,2	14	0,085
АПН-3	0,20—0,50	46	35	44	35	40	M5	10	17	4,2	14	0,092
АПН-4	0,40—0,70	56	40	52	41	47	M6	12	20	5,2	17	0,145
АПН-5	0,60—1,00	56	40	52	41	47	M6	12	20	5,2	17	0,160
АПН-6	0,90—1,50	60	45	59	47	44	M8	12	23	7	19	0,240

Примечание. Интервал рабочих температур от 213 до 423 К.

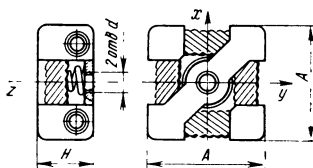
Таблица 8.6. Амортизаторы ДК



Тип амортизатора	Предельная нагрузка P_z , Н	Коэффициент жесткости a , Н/мм ^{0,5}	Размеры, мм				Масса, г
			D	d	H	h	
ДК-I-1	5	6	32	М6	47	18	0,9
ДК-I-2	20	10					1,4
ДК-I-3	30	14					1,8
ДК-II-1	50	20	38	М8	47	21	2,4
ДК-II-2	100	25					3,2
ДК-II-3	150	30					4,0
ДК-III-1	200	45	53	М10	88	36	9,5
ДК-III-2	300	50					12,7
ДК-III-3	400	84					19,1
ДК-IV-2	500	75	74	М12	108	52	42
ДК-IV-3	700	160					52,5

Примечание. Коэффициент демпфирования для амортизаторов от 0,4 до 0,5. Динамическая жесткость, Н/мм, $C_d = a/h_d^{0,5}$, где h_d — деформация амортизатора, мм

Таблица 8.7. Амортизаторы АТ



Тип	Нагрузка P_z , Н	Жесткость C , Н/мм	Размеры, мм		
			A	H	d
АТ-5	50	25	50	26	М6
АТ-10	100	80	56	30	М8
АТ-15	150	140	63	32	М8

риалом для упругих элементов служит маслостойкая и морозоустойчивая эластичная резина или губчатая листовая резина.

В качестве амортизаторов также используются пластины и прокладки из упругих материалов — поролон, пробки, волокна и структуры из металлической сетки. Такие материалы в зависимости от нагрузки на единицу площади меняют собственную частоту. Жесткость их при снижении удельной нагрузки возрастает. Собственная частота таких упругих материалов зависит также от толщины прокладки, и при толщине, соизмеримой с длиной волны, виброизоляция совсем пропадает.

Прокладки из упругих материалов используют преимущественно на сжатие. Они особенно эффективны при изоляции ударов. Коэффициенты демпфирования используемых материалов приведены в табл. 8.8. Такие упругие прокладки часто используют совместно с типовыми амортизаторами или пружинами.

Таблица 8.8. Предельные нагрузки и коэффициент демпфирования пластин некоторых упругих материалов

Материал	Нагрузка, кг/м ²	Коэффициент демпфирования
Поролон, плотность 30—40 кг/м ³	0,8—1,0	—
Полиуретан упругий, плотность 350 кг/м ³	20	0,08
Резина губчатая, плотность 127 кг/м ³	3,0	0,12
Резина мягкая	8,0	—
Резина жесткая, плотность 1,2·10 ³ кг/м ³	30—40	0,1
Пробка натуральная	15—20	0,127
Плиты из пробковой крошки	0,6—1,0	—
Войлок мягкий	2—3	0,18
Войлок жесткий прессованный	14	—
Подушки из стальной проволоки ЭИ708: Ø 0,15 мм,		
плотность структуры 6·10 ² кг/м ³	30	0,3
уд. вес структуры 1·10 ³ кг/м ³	50	—
уд. вес структуры 1,65·10 ³ кг/м ³	80	—

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

9.1. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И ИСТОЧНИКИ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА

Одним из основных вопросов, определяющих эксплуатационную надежность РЭА, является вопрос создания в приборе таких температур, при которых длительная работа используемых в нем элементов осуществлялась бы в пределах, предусмотренных для них ТУ.

Основная задача обеспечения необходимого теплового режима заключается в создании таких условий, при которых количество тепла, рассеянного в окружающую среду, будет равным мощности тепловыделения аппаратуры. Тогда температура нагретой зоны в

приборе перестает нарастать и тепловые параметры при всех прочих равных условиях стабилизируются. Такое состояние называют установившимся тепловым режимом, его можно получить при постоянстве всех параметров, участвующих в процессе теплопередачи.

Все схемные элементы РЭА делят на две группы. К первой относят источники тепла, или термоактивные элементы (электронные лампы, полупроводниковые приборы, резисторы и др.), которые при работе рассеивают тепло в окружающую среду. Ко второй группе относятся схемные элементы, которые при работе не выделяют тепла и часто обладают сравнительно низкой термостойкостью (кварцевые стабилизаторы, термосопротивления, конденсаторы и др.). Такие элементы, нагретые от соседних источников тепла, могут изменить свои параметры или вообще выйти из строя.

В РЭА из всей потребляемой мощности электрической энергии на полезное преобразование расходуется лишь незначительная часть, преобладающая часть ее преобразуется в тепловую и нагревает внутреннюю зону прибора и окружающую среду.

9.2. СПОСОБЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В АППАРАТУРЕ

Основные процессы переноса тепла. Физический перенос тепла от нагретых элементов к холодным и в окружающую среду осуществляется теплопроводностью, тепловым излучением и тепловой конвекцией.

Теплопроводность имеет место при передаче тепла внутри одного тела или к другому телу, находящемуся с ним в контакте. Этот процесс передачи тепла определяется законом Фурье и для количественного значения переносимого теплового потока Q_T выражается соотношением

$$Q_T = \frac{\lambda}{l_T} (T_1 - T_2) S_T, \quad (9.1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); l_T — длина пути теплового потока, м; S_T — теплопроводящая площадь, м²; T_1, T_2 — соответственно температура нагретого и холодного тела, К.

Из этого выражения следует, что при разработке РЭА необходимо теплопроводящие системы выполнять короткими, в соединениях деталей обеспечивать тепловой контакт по всей площади, а материалы выбирать с большим коэффициентом теплопроводности.

Тепловое излучение представляет собой передачу тепловой энергии в виде электромагнитных колебаний. Вначале тепловая энергия нагретого тела переходит в лучистую энергию и распространяется в окружающее пространство. Далее при встрече с другим телом лучистая энергия нагревает его, превращаясь в тепло.

Теплопередача излучением Q_L определяется законом Стефана—Больцмана и в общем виде выражается соотношением

$$Q_L = \alpha_L (T_K - T_C) S_L, \quad (9.2)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент теплопередачи излучением, Вт/(м²·К); $T_{\text{к}}$, $T_{\text{с}}$ — соответственно температура излучающей и нагреваемой поверхности, К; $S_{\text{л}}$ — площадь излучающей поверхности, м².

Коэффициент теплопередачи излучением определяется выражением

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \varepsilon \frac{(T_{\text{к}}/100)^4 - (T_{\text{с}}/100)^4}{T_{\text{к}} - T_{\text{с}}}, \quad (9.3)$$

где 5,67 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К); ε — степень черноты излучающей поверхности (табл. 9.1).

Таблица 9.1. Степень черноты материалов, используемых при изготовлении несущей конструкции РЭА

Материал	Состояние поверхности	Температура, К	Степень черноты
Алюминий	Полированная	273—873	0,04—0,06
	Окисленная	308—773	0,20—0,31
Алюминиевый сплав	Прокат	323—623	0,37—0,41
	Литье	373—773	0,33—0,31
Золото	Полированная	498—908	0,02—0,04
Краски	Глянцевая (для всех цветов)	293—373	0,92—0,96
	Алюминиевая	373	0,28
	Бронзовая	373	0,51
Лак	Черная матовая	313—373	0,92—0,96
	Черная глянцевая	298	0,875
	Белая полуматовая	296	0,906
Латунь	Тусклая	323—623	0,22
	Полированная	373	0,075
	Прокат	295	0,06
Никель	Полированная	498—648	0,07—0,08
	Матовая	473—873	0,37—0,48
Серебро	Полированная	498—898	0,02—0,03
Сталь	Прокат	363	0,07—0,085
	Полированная	373	0,066
	Окисленная	298	0,8—0,82
	Литье необработанное	298	0,9
Хром	Глянцевая	398	0,64—0,67
Эмаль (всех цветов)	Полуматовая	373	0,92—0,96

Подставляя в (9.2) значение (9.3), получаем полное выражение закона излучения тепла:

$$Q_{\text{л}} = 5,67 \varepsilon [(T_{\text{к}}/100)^4 - (T_{\text{с}}/100)^4] S_{\text{л}}. \quad (9.4)$$

Лучистая энергия не только поглощается поверхностью, но и отражается ею. Степень поглощения или отражения зависит от состояния излучающей или поглощающей поверхности.

При тепловом излучении, направленном от одной плоскости к другой, приведенная степень черноты $\epsilon_{\text{п}}$ определяется выражением

$$\epsilon_{\text{п}} = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1}. \quad (9.5)$$

Если $\epsilon_1 \gg \epsilon_2$, то $\epsilon_{\text{п}}$ определяется меньшей степенью черноты $\epsilon_{\text{п}} = \epsilon_2$, и наоборот. При высокой степени черноты у обеих плоскостей (ϵ_1 и ϵ_2 не менее 0,8) приведенная степень черноты определяется их произведением, т. е. $\epsilon_{\text{п}} = \epsilon_1 \epsilon_2$. При излучении тепла поверхностью тела в неограниченное пространство учитывается только степень черноты излучающей поверхности. Если же излучение тепла происходит с поверхности S_1 тела, которое ограничено другой замкнутой поверхностью тела S_2 , приведенная степень черноты будет составлять

$$\epsilon_{\text{п}} = \left[\frac{1}{\epsilon_2} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \frac{S_1}{S_2} \right]^{-1}. \quad (9.6)$$

Как видно из выражения (9.3), при большой разнице в температурах нагретой и холодной поверхностей эффективность теплоотвода излучением увеличивается.

Отвод тепла излучением широко используют в РЭА. Так, например, в целях защиты теплочувствительных пассивных элементов от перегрева в блоках устанавливают теплопоглощающие или теплоотражающие экраны. Первые имеют матовую, оксидированную поверхность черного цвета или окрашенную эмалью или масляными красками. Вторые имеют глянцевую поверхность светлых тонов, зеркальную или полированную. Использование экранов позволяет не только снижать местные перегревы в блоках, но и выравнивать температурное поле внутри прибора.

Теплопередача конвекцией происходит в среде газа, воздуха или жидкостей, соприкасающихся с нагретыми или охлажденными поверхностями твердого тела.

Процесс теплопередачи конвекцией определяется законом Ньютона

$$Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} (T_{\text{к}} - T_{\text{с}}) S_{\text{к}}, \quad (9.7)$$

где $Q_{\text{к}}$ — мощность, передаваемая в виде тепла, Вт; $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м²·К); $S_{\text{к}}$ — площадь теплоотводящей поверхности, м²; $T_{\text{к}}$ — температура нагретого тела, К; $T_{\text{с}}$ — температура окружающей среды, К.

Различают конвекцию свободную (естественную) и принудительную.

Свободная конвекция имеет место при нагреве частиц газа или жидкости, находящихся в непосредственном контакте с нагретым телом, и их естественном перемещении вверх за счет изменения плотности в сравнении с плотностью более холодных частиц. Таким образом, нагретые частицы постоянно заменяются более холодными, отчего происходит непрерывное перемешивание среды.

Искусственная конвекция относится к принудительному виду охлаждения и происходит за счет интенсивного перемешивания теплоносущей среды или механического замещения ее.

Для случая естественной конвекции коэффициент теплопередачи может быть представлен как функция $\alpha_k = f(T_k, T_c, \beta, \lambda, c_p, \nu, a, g, \phi)$, где T_k — температура нагретой поверхности твердого тела, К; T_c — температура холодной среды (газа, жидкости), К; β — коэффициент объемного расширения среды, 1/К; λ — коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К); c_p — удельная теплоемкость среды, Дж/(кг·К); ν — коэффициент кинематической вязкости среды, м²/с; a — коэффициент температуропроводности жидкости, м²/с; g — ускорение силы тяжести, м/с²; ϕ — размер охлаждаемого тела и состояние поверхности.

Как видно, число этих параметров сравнительно велико, и влияние их на конвективное охлаждение оценивать весьма сложно. Поэтому коэффициенты теплопередачи удобнее определять не этими параметрами, а связанными с ними критериальными уравнениями, полученными из теории подобия.

Критериальные уравнения. Процесс теплообмена в пограничном слое между твердым телом и воздухом (газом, жидкостью) характеризует *критерий Нуссельта*:

$$Nu = \alpha_k l_0 / \lambda. \quad (9.8)$$

Здесь l_0 — определяющий размер тела, обтекаемого потоком хладагента (для труб величина, эквивалентная диаметру и равная $4F/p$), где F — площадь поперечного сечения, м², а p — ее периметр).

Критерий Рейнольдса дает численное значение взаимосвязи между силами инерции и вязкости охлаждаемой среды:

$$Re = vl/\nu, \quad (9.9)$$

где v — скорость потока охлаждающей среды, м/с.

Критерий Грасгофа дает соотношения между подъемной силой и силой вязкости:

$$Gr = \beta g l^3 (T_k - T_c) / \nu^2, \quad (9.10)$$

где β для воздуха принимают 1/ T_c , 1/К.

Критерий Пекле дает численное значение отношения между конвекционными и кондукционными потоками тепла:

$$Pe = v l / a. \quad (9.11)$$

Критерий Прандтля характеризует теплофизические свойства вещества:

$$Pr = \nu / a = Pe / Re. \quad (9.12)$$

Конвекционный теплообмен в РЭА характеризуют три критерия: Nu , Gr , Pr , и зависимость между их параметрами выражается в виде критериального уравнения

$$Nu = m (Gr \cdot Pr)^n, \quad (9.13)$$

где m и n — эмпирические коэффициенты, значения которых в зависимости от режима движения нагреваемой жидкости или газа приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2. Значения коэффициентов m и n в формуле (9.13)

Режим	(Gr·Pr)	m	n
Пленочный	$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	1
Ламинарный	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
Переходный	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
Турбулентный	$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

Значения физических параметров, входящих в (Gr, Pr), выбирают для средней арифметической температуры $t_m = 0,5(T_K + T_C)$.

Принудительная конвекция охлаждающих газов или жидкостей в охладительной системе может протекать при ламинарном, переходном или турбулентном режиме.

При ламинарном режиме частицы жидкости или газа движутся спокойно и параллельно друг другу. В этом случае численное значение Re не превышает 2300. Этот режим имеет место при небольших скоростях движения и соответствует закону 1/8, согласно которому коэффициент теплоотдачи неограниченных цилиндров определяется формулой

$$\alpha_K = A_1 [(T_K - T_C)/d^5]^{1/8}, \quad (9.14)$$

где A_1 — коэффициент, учитывающий физические параметры среды (определяется по табл. 9.3); d — диаметр цилиндра, м.

Переходный режим движения от ламинарного к турбулентному имеет место при омывании газом или жидкостью плоских и цилиндрических поверхностей (малых и средних по высоте приборов и элементов). В этом случае коэффициент теплопередачи рассчитывается по закону 1/4, если определяющая высота h плоскости охлаждения и перепад температур удовлетворяют неравенству

$$T_K - T_C \leq (840/h)^3. \quad (9.15)$$

Тогда коэффициент теплопередачи конвекции будет иметь вид: для вертикальной плоскости высотой h или горизонтально ориентированного цилиндра диаметром d

$$\alpha_{KH} = A_2 [(T_K - T_C)/h]^{1/4}; \quad (9.16)$$

для горизонтальной плоскости, нагретой стороной обращенной вниз к охлаждающей среде,

$$\alpha_{KH} = 0,7 A_2 [(T_K - T_C)/b]^{1/4}; \quad (9.17)$$

для горизонтальной плоскости, нагретой стороной обращенной вверх к охлаждающей среде,

$$\alpha_{KH} = 1,3 A_2 [(T_K - T_C)/b]^{1/4}. \quad (9.18)$$

Таблица 9.3. Значения коэффициентов A_1 , A_2 и A_3 в зависимости от определяющей температуры $T_{оп}$ для воздуха и воды

Кoeffици- ент	Среда	T, К									
		243	263	273	283	293	303	313	323	333	353
A_1	Воздух	0,27	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,32
	Вода	—	—	9,35	11,2	13,1	14,7	15,7	17,4	19,0	20,0
A_2	Воздух	1,50	1,46	1,44	1,40	1,38	1,36	1,34	1,32	1,31	1,29
	Вода	—	—	68,0	90,0	105	127	149	161	178	205
A_3	Воздух	1,81	1,73	1,69	1,65	1,61	1,57	1,53	1,49	1,45	1,39
	Вода	—	—	102	145	198	142	290	332	363	425

Значения A_2 для определяющей температуры $T_{оп}=0,5(T_k-T_c)$ указаны в табл. 9.3. При расчете коэффициента теплопередачи с горизонтальных плоскостей определяющим становится размер b наименьшей стороны плоскости.

Турбулентный режим движения газов или жидкостей характеризуется большими скоростями протекания с завихрениями. Этот режим является наиболее интенсивным по теплообмену и наблюдается вдоль плоскостей с большими высотами, которые уже не удовлетворяют условию (9.15). В этом случае расчет коэффициента теплопередачи производится по закону $1/3$:

— для вертикально ориентированных плоскостей

$$\alpha_{кв} = A_3 (T_k - T_c)^{1/3}; \quad (9.19)$$

— для горизонтально ориентированных плоскостей, нагретой зоной обращенных вниз к охлажденной среде,

$$\alpha_{кн} = 0,7 A_3 (T_k - T_c)^{1/3}; \quad (9.20)$$

— для горизонтально ориентированных плоскостей, нагретой стороной обращенных вверх к охлаждающей среде,

$$\alpha_{кв} = 1,3 A_3 (T_k - T_c)^{1/3}. \quad (9.21)$$

Здесь коэффициент A_3 по определяющей температуре берется из табл. 9.3.

При разработке охлаждательных устройств наибольшее предпочтение отдают турбулентному режиму движения газов или жидкостей.

Общий случай теплопередачи. Для получения уравнения теплопередачи в общем случае используют закон сохранения тепловой энергии, рассеиваемой активными элементами внутри прибора, передаваемой стенкам приборного корпуса и от стенок в окружающую среду. Термическим сопротивлением, приведенным в (9.1)

для тонких стенок с большим коэффициентом теплопроводности, пренебрегают, поэтому уравнение в общем случае примет вид

$$Q = \alpha_3 S_3 (T_3 - T_R) = \alpha_R S_R (T_R - T_C). \quad (9.22)$$

Здесь теплоотводящую площадь S_R поверхности прибора определяют размеры его горизонтальных a , b и вертикальных h плоскостей. Эти же плоскости с учетом коэффициента заполнения K_3 прибора блоками в соответствии с (4.1) образуют площадь s_3 поверхности условно нагретой зоны [36]

$$S_R = 2ab + 2(a + b)h, \quad S_3 = 2ab + 2(a + b)hK_3. \quad (9.23)$$

Произведение коэффициента теплопередачи и теплоотводящей площади называют тепловой проводимостью σ . Тогда $\sigma_R = \alpha_R S_R$, и выражение (9.22) можно написать в следующем виде:

$$Q = \sigma_3 (T_3 - T_R) = \sigma_R (T_R - T_C). \quad (9.24)$$

Это уравнение раскрывает связь между температурой нагретой зоны T_3 , температурой стенок прибора T_R и температурой окружающей среды T_C , которая может быть выражена в виде

$$T_R = T_C + Q/\sigma_R; \quad (9.25)$$

$$T_3 = T_R + Q/\sigma_3 = T_C + Q/\sigma_3 + Q/\sigma_R; \quad (9.26)$$

$$T_3 - T_C = (T_R - T_C) (1 + \sigma_R/\sigma_3) = (T_3 - T_R) (1 + \sigma_3/\sigma_R). \quad (9.27)$$

Значение тепловой проводимости между нагретой зоной и стенками прибора, а также между поверхностью приборного корпуса и окружающей средой при значении черноты поверхности не ниже 0,8 в первом приближении принимают равной [16]

$$\sigma_3 = 23 S_R; \quad \sigma_R = 8 S_R. \quad (9.28)$$

Температура нагретой зоны определяется из максимально допустимой температуры для наименее теплостойких элементов РЭА.

9.3. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ АППАРАТУРЫ

Естественное охлаждение. К естественному охлаждению относится охлаждение наружной средой поверхности прибора, вентиляция естественно протекающим через полость прибора окружающим воздухом и естественно-испарительное охлаждение фитильными испарителями (тепловыми трубками).

Естественное охлаждение прибора осуществляется за счет свободной конвекции окружающего воздуха, омывающего наружные стенки приборного корпуса. Естественная вентиляция осуществляется за счет свободной конвекции окружающего воздуха, поступающего во внутреннюю полость прибора через вентиляционные отверстия, расположенные снизу и сверху прибора. Отверстия закрывают сеткой, перфорированным листом или жалюзи (рис. 9.1).

Схемы естественной вентиляции приборных стоек с оптимальными и нормальными вентиляционными отверстиями приведены на рис. 9.2. В сравнении с другими видами охлаждения естествен-

ная вентиляция благодаря своей простоте имеет значительное преимущество. Однако возможности такой вентиляции ограничены рассеянием тепла с единицы поверхности прибора. Кроме того, способ естественного охлаждения применим лишь в том случае, если внешнее давление окружающей среды будет не ниже $5,6 \cdot 10^4$ Па (420 мм рт. ст.).

Принудительное охлаждение. К принудительному охлаждению относятся принудительная продувка внутренней зоны прибора

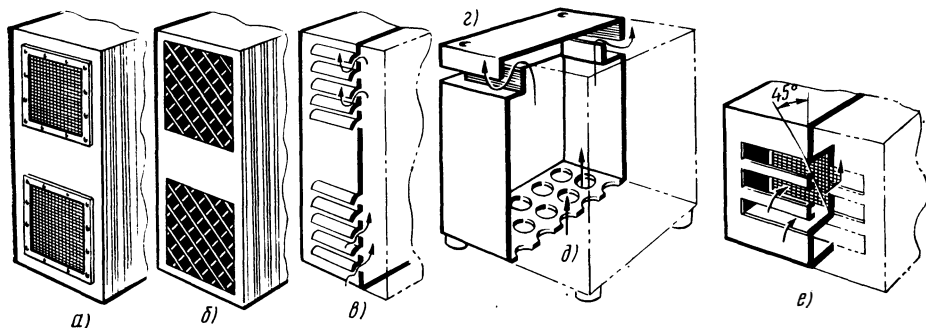


Рис. 9.1. Образование вентиляционных отверстий в приборном корпусе

a — металлической сеткой; *b* — перфорацией листового материала; *в* — штамповкой жалюз; *г* — созданием вентиляционных «грибков»; *д* — штамповкой отверстий в днище корпуса; *e* — созданием на стенках корпуса брызгозащитных отверстий

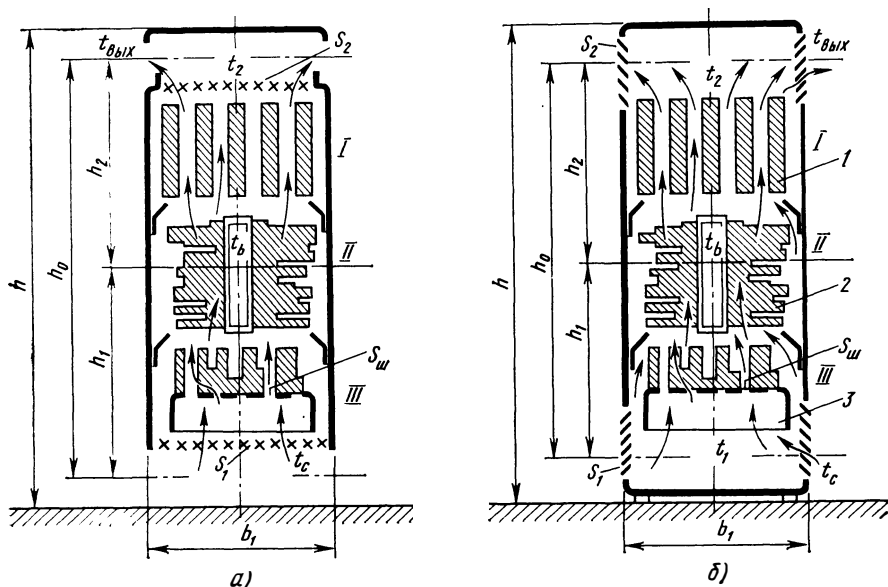


Рис. 9.2. Схемы естественной вентиляции приборных стоек

a — с максимальной площадью вентиляционных отверстий; *б* — с нормально установленной площадью
I — шасси кассетного типа; *2* — блок с вертикальным шасси; *3* — блок с горизонтальным шасси

воздухом, наружный обдув его поверхности, перемешивание воздуха внутри герметичного прибора (рис. 9.3). Более эффективным средством отвода тепла является использование микрохолодильников, термоэлектрических батарей, жидкостных и воздушно-испарительных систем.

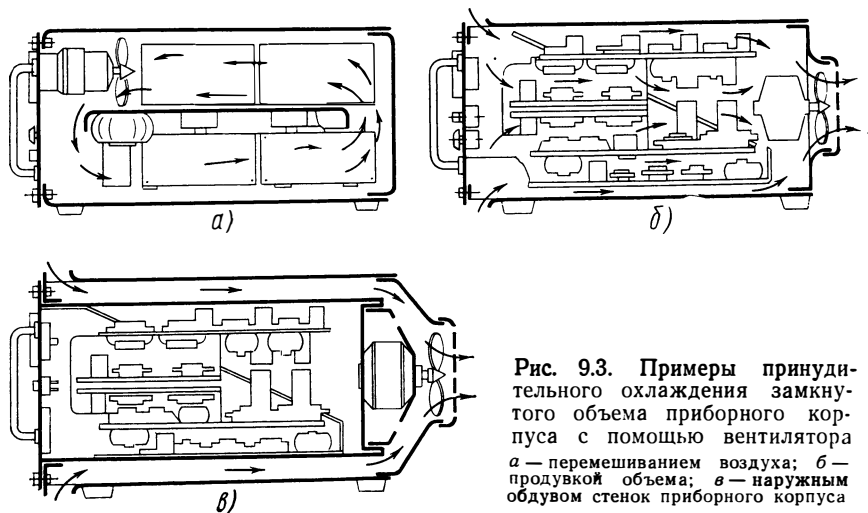


Рис. 9.3. Примеры принудительного охлаждения замкнутого объема приборного корпуса с помощью вентилятора а — перемешиванием воздуха; б — продувкой объема; в — наружным обдувом стенок приборного корпуса

Принудительная вентиляция осуществляется потоком холодного воздуха с необходимым скоростным напором. Напор воздуха создается вентиляторами или встречным потоком воздуха при движении объекта с установленной на нем аппаратурой. Такая вентиляция может быть местной или общей. Первая осуществляется вентилятором, установленным внутри прибора в местах наибольшего выделения тепла или непосредственно у входных или выходных вентиляционных отверстий стойки, вторая — при подключении комплекса приборных стоек к общей вентиляционной системе. Патрубки вентиляционной системы и воздухопроводы в стойках снабжают специальными заслонками, которые позволяют распределять поток охлаждающего воздуха по приборам или стойкам, а в стойках — по блокам.

Приборные корпуса принудительно вентилируемых приборов должны иметь надежное уплотнение всех разъемов и крышек, которое исключало бы неорганизованное засасывание воздуха в приборы или утечку охлаждающего воздуха из прибора.

По характеру работы принудительная вентиляция подразделяется на приточную, вытяжную и приточно-вытяжную (рис. 9.4).

Приточная вентиляция осуществляется нагнетанием в прибор охлаждающего воздуха, очищенного от пыли и нормальной влажности. При этом нагретый воздух вытесняется из прибора естественно через выходное отверстие в помещение или атмосферу.

Вытяжная вентиляция осуществляется вытяжкой нагретого воздуха из прибора со свободным замещением его более холодным. При этом воздух, поступающий снаружи, должен быть очищен от пыли, для чего входные вентиляционные отверстия прибора прикрывают специальными пылезащитными фильтрами.

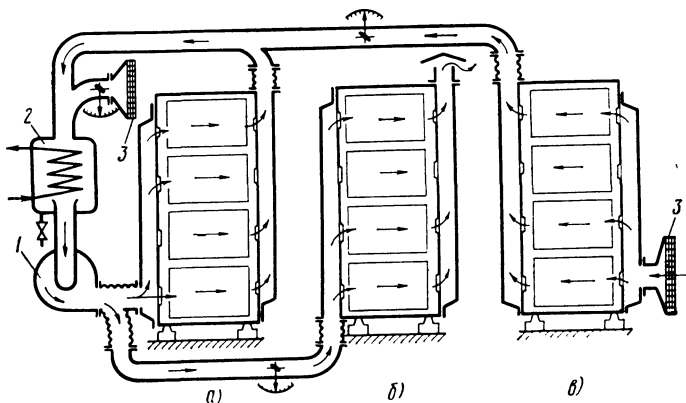


Рис. 9.4. Схемы принудительной вентиляции приборных стоек
 а — приточно-вытяжной; б — приточной; в — вытяжной
 1 — вентилятор общей сети; 2 — охладитель; 3 — фильтр

Необходимо отметить, что приточная вентиляция в сравнении с вытяжной имеет некоторое преимущество. Оно заключается в том, что при нагнетании воздуха в прибор вентилятор работает в среде холодного и, стало быть, более плотного воздуха, отчего КПД вентиляционной установки будет несколько выше.

Приточно-вытяжная вентиляция осуществляется нагнетанием в прибор охлаждающего воздуха с одновременной вытяжкой из него нагретого воздуха. Такая вентиляция хорошо управляема и экономична. Она позволяет регулировать температуру охлаждающего воздуха, перераспределять по приборам воздух в необходимом количестве и исключает опасность запыления аппаратуры.

Жидкостно-испарительные системы охлаждения являются наиболее эффективными. Охлаждение производится за счет циркуляции охлаждающей жидкости через специальные каналы в шасси блоков, через радиаторы и рубашки, образованные в корпусах приборов.

Охлаждение воздушно-испарительными системами производится с помощью испаряемых жидкостей с низкой температурой кипения. Одна из таких систем показана на рис. 9.5. Она состоит из системы принудительной циркуляции воздуха внутри прибора и через охлаждающий радиатор, в котором находится легко испаряющаяся жидкость.

Жидкостно-испарительные системы используются и для охлаждения отдельных мощных источников тепла, установленных в приборе. Охлаждающая жидкость в этом случае подводится не-

посредственно к нагреваемому элементу и под небольшим давлением прокачивается через специальные охлаждающие каналы. Охлаждение жидкости в охлаждающих системах иногда производится дополнительным хладагентом. Для жидкостно-испарительного охлаждения используются такие жидкости, как спирт, фреон, кремнийорганические и фтороорганические соединения, трансформаторные масла и др.

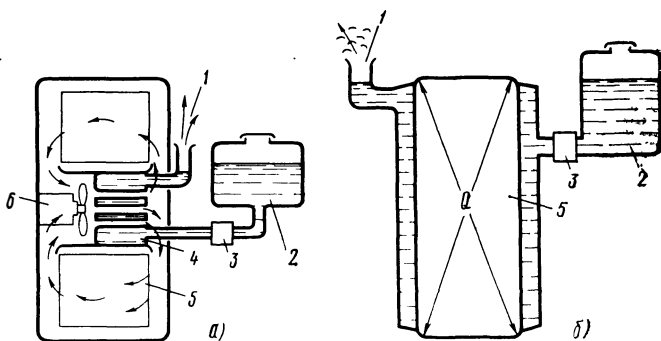


Рис. 9.5. Схемы жидкостно-испарительного охлаждения приборов

a — воздушно-испарительное; *б* — жидкостно-испарительное
 1 — выброс паров; 2 — бак с испаряющейся жидкостью; 3 — регулятор подачи хладагента;
 4 — радиатор охлаждения; 5 — блоки РЭА; 6 — вентилятор

Жидкостно-испарительная система охлаждения обладает высоким КПД, не зависит от условий окружающей среды, позволяет проектировать приборы с большой удельной мощностью тепловыделения, в сравнении с системой принудительной вентиляции выгодно отличается по своим габаритным размерам и массе. Однако стоимость таких систем значительно выше.

Выбор способа охлаждения. Точный расчет тепловых режимов связан с большими затратами времени на вычисления [16]. Такой расчет больше относится к области теплотехники и выполняется ее специалистами. Конструктора РЭА вполне удовлетворяет более краткий (прикидочный) расчет с точностью до 10—15%, основанный на принципе подобия.

Поверхность охлаждения блока образуется наружной площадью его нагретой зоны, а поверхность охлаждения прибора — площадью наружных стен, дна и крышки корпуса. Весьма важно уже вначале конструирования выявить значения удельной мощности тепловыделения прибора с тем, чтобы иметь возможность заранее выбрать наиболее целесообразный способ охлаждения.

Под удельной мощностью тепловой нагрузки q понимают мощность теплового рассеяния Q с единицы площади охлаждения S , т. е. $q = Q/S$. Если известны удельная мощность тепловыделения и перепад температуры $T_z - T_c$, то выбор способа охлаждения в первом приближении может быть выполнен с помощью диаграммы, приведенной на рис. 9.6.

При разработке системы охлаждения в приборах необходимо:

а) между нагревающимися элементами обеспечивать эффективную циркуляцию воздуха с минимальными аэродинамическими потерями;

б) в вентилируемой полости прибора избегать закрытых участков, где при обдуве могут создаваться зоны застоя воздуха;

в) для перераспределения охлаждающего воздуха внутри приборов устанавливать направляющие щитки (диффлекторы) и патрубки;

г) особо нагревающиеся элементы снабжать ребрами охлаждения;

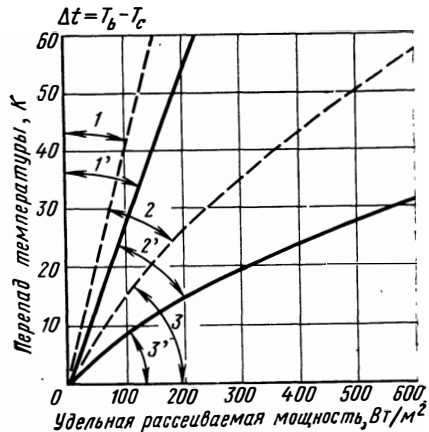


Рис. 9.6. График приближенного определения необходимого способа охлаждения прибора

Интервалы 1, 2 и 3 даны для вертикально расположенных блоков, а интервалы 1', 2' и 3' — для горизонтально расположенных блоков. Интервалы 1-1' — без вентиляции, 2-2' — для естественной вентиляции и 3-3' — для принудительной вентиляции

д) элементы, наиболее чувствительные к перегреву, изолировать от непосредственного воздействия теплового потока экранами;

е) при значительном числе охлаждаемых блоков в приборе поток охлаждающего воздуха делить на ряд параллельных участков;

ж) узлы и блоки с меньшим тепловыделением располагать в потоке охлаждающего воздуха первыми, а нагревающиеся элементы размещать наибольшей плоскостью вдоль потока и в шахматном порядке;

з) между источниками тепла и поверхностями охлаждения обеспечивать надежный тепловой контакт.

9.4. РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Тепловой режим задается исходными параметрами с такой погрешностью, при которой расчет его с большой точностью теряет смысл [36]. Предельные и условные максимумы и минимумы исходных параметров и принятые допущения создают достаточные запасы, увеличивающие вероятность обеспечения рассчитываемого теплового режима. При рассмотрении тепловых расчетов ограничимся обобщенными примерами компоновки РЭА для трех основных случаев:

а) герметичный прибор с естественным охлаждением стенок;

б) прибор с перфорированным корпусом, охлаждаемый естественной вентиляцией;

в) герметичный прибор с принудительной вентиляцией.

Обобщение по признакам этих трех основных тепловых режимов не вносит в расчеты большой погрешности, однако процесс расчетов существенно упрощается.

Естественное охлаждение внешней поверхности приборов, суммарная тепловая мощность которой рассеивается в окружающую среду, происходит за счет конвективного отвода тепла и излучения $Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}$. Мощность, рассеиваемая за счет теплопроводности в приборе, установленном на теплоизоляционном основании (резиновые амортизаторы, столы, деревянные опоры и т. д.), настолько мала, что в тепловых расчетах приборов ею пренебрегают.

На тепловое рассеяние прибора или блока существенное влияние оказывает их форма. При одинаковых объемах площади поверхности могут сильно отличаться, что сказывается на удельной мощности тепловыделения.

В расчетах тепловых режимов примем допущение, что температура нагретой зоны, а также стенок приборного корпуса в любой точке одинакова. Исходными данными для расчета приборов с естественным охлаждением стенок его корпуса являются:

геометрические размеры охлаждаемой поверхности a , b , h ;
 суммарная мощность теплового рассеяния блоков в приборе Q ;
 максимально допустимая температура внутри прибора T_3 ;
 максимально возможная температура окружающей среды T_c .

Из выражений (9.7) и (9.16) — (9.21) мощность рассеяния тепловой энергии за счет конвекции с поверхности прибора вертикальными стенками площадью S_h и горизонтальными стенками площадью $2S_r$ будет равна

$$Q_{\text{к}} = A_2 \left(\frac{S_h}{h^{1/4}} + \frac{2S_r}{b^{1/4}} \right) (T_{\text{к}} - T_c)^{5/4} \quad (9.29)$$

или для приборов, по размерам не удовлетворяющих условию (9.15)

$$Q_{\text{к}} = A_3 (S_h + 2S_r) (T_{\text{к}} - T_c)^{4/3}. \quad (9.30)$$

Эти уравнения справедливы для нормального внешнего давления. При пониженном давлении конвективный теплообмен ухудшается. Это учитывается поправочным множителем $\sqrt{P/P_0}$, где P — давление внешней среды; P_0 — нормальное давление.

Общая мощность рассеяния тепла в окружающую среду будет представлять собой сумму мощностей лучистой энергии и рассеяния за счет конвекции и на основании (9.6), (9.30) и (9.31) для законов $1/4$ и $1/3$ будет составлять:

$$Q = 5,67 \varepsilon S_{\text{к}} [(T_{\text{к}}/100)^4 - (T_c/100)^4] + A_2 \left(\frac{S_h}{h^{1/4}} + \frac{2S_r}{b^{1/4}} \right) (T_{\text{к}} - T_c)^{5/4}; \quad (9.31)$$

$$Q = 5,67 \varepsilon S_{\text{к}} [(T_{\text{к}}/100)^4 - (T_c/100)^4] + A_3 (S_h + 2S_r) (T_{\text{к}} - T_c)^{4/3}. \quad (9.32)$$

Расчет теплового режима обычно производится методом последовательного приближения. Выбор температуры стенок приборно-

го корпуса в первом приближении можно делать исходя из предположения, что перепады температур между нагретой зоной и стенками корпуса прибора и между стенками прибора и окружающей средой одинаковые, т. е. $T_3 - T_k = T_k - T_c$, тогда $T_k = 0,5(T_3 + T_c)$, и в этом случае теплопроводности одинаковые $\sigma_3 = \sigma_k$. При этом следует отметить, что наиболее эффективное поддержание теплового режима осуществляется, когда перепад температур составляет не менее 10° .

Пример 1. Определим максимально допустимую мощность теплового рассеяния блоков, размещаемых в приборной стойке высотой 1,50, шириной 0,48, и глубиной 0,40 м. Корпус изготовлен из тонколистового проката толщиной 2 мм, окрашен полуматовой эмалью светло-серого цвета и установлен на резиновых амортизаторах. Коэффициент заполнения стойки блоками 0,75. Температура нагретой зоны в стойке не более 333 К. Максимальная температура в помещении 303 К. Давление среды нормальное.

1. Устанавливаем в первом приближении температуру стенок приборного корпуса $T_k = 0,5(333 + 303) = 318$ К.

2. Используя неравенство (9.15), выясняем закон, применяемый при расчете теплопередачи конвекцией для прибора высотой 1,5 м,

$$318 - 303 \leq (840/1500)^3 \text{ или } 15 \leq 0,18.$$

Как видно, неравенство не соблюдается, поэтому теплообмен подчиняется закону $1/3$ и расчет ведем по формуле (9.32).

3. Из табл. 9.3 по определяющей температуре $T_{оп} = 0,5(318 + 303) = 307,5$ К, находим $A_3 = 1,55$, из табл. 9.1 — степень черноты поверхности для заданной окраски 0,92. Площадь тепловыделяющей поверхности стойки заданных размеров состоит:

$$S_k = 2 \cdot 0,48 \cdot 0,4 + 2(0,48 + 0,4)1,5 = 3,02 \text{ м}^2.$$

Подставляя полученные исходные данные в уравнение (9.32), определяем мощность тепловыделения разрабатываемой приборной стойки:

$$Q = 5,67 \cdot 0,92 [(318/100)^4 - (303/100)^4] 3,02 + 1,55 \cdot 3,02 (3,18 - 303)^{4/3} = 284 + 172 = 456 \text{ Вт}.$$

4. Для полученной мощности проверим температуру нагретой зоны. Определим площадь поверхности нагретой зоны в соответствии с (9.23)

$$S_3 = 2 \cdot 0,48 \cdot 0,4 + 2(0,48 + 0,4)1,5 \cdot 0,75 = 2,36 \text{ м}^2.$$

По определяющей температуре $T_{оп} = 0,5(333 + 318) = 325$ К из табл. 9.3 находим $A_3 = 1,48$. Определяем коэффициенты теплопередачи для конвекции и излучения, используя формулы (9.3) и (9.19),

$$\alpha_k = 1,48(333 - 318)^{1/3} = 3,66 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_l = 5,67 \cdot 0,92 [(333/100)^4 - (318/100)^4] (333 - 318) = 7,31 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Общая тепловая проводимость представляет собой сумму проводимостей конвективной и излучения, т. е.

$$\sigma_3 = S_3(\alpha_k + \alpha_l) = 2,36(3,66 + 7,31) = 25,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

На основании (9.26) определяем температуру нагретой зоны

$$T_3 = 318 + 465/25,9 = 335,7 \text{ К}.$$

Температура нагретой зоны оказалась выше заданной. Принятая нами первоначально температура стенок приборного корпуса была несколько завышена. Поэтому задаемся меньшим значением температуры корпуса $T_k = 307$ К и тем же способом определяем более точное значение его теплового рассеивания $Q' = 5,67 \cdot 0,92 [(317/100)^4 - (303/100)^4] 3,02 + 1,55 \cdot 3,02 (317 - 303)^{4/3} = 425 \text{ Вт}.$

Коэффициенты теплопередачи конвекцией и излучением с учетом поправки определяются как

$$\alpha'_{\kappa} = 1,48 (333 - 317)^{1/3} = 3,72 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha'_{\lambda} = 5,67 \cdot 0,92 [(333/100)^4 - (317/100)^4] (333 - 317) = 7,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тогда

$$\sigma'_3 = (3,72 + 7,5) 2,36 = 26,48 \text{ Вт}/\text{К}$$

и температура нагретой зоны

$$T_3 = 317 + 425/26,48 = 333 \text{ К}.$$

Полученный результат удовлетворяет условию задачи.

Пример 2. Определим температуру нагретой зоны блоков и способ ее охлаждения, если мощность тепловыделения в блоках 600 Вт. Размеры приборного корпуса и температура окружающей среды те же, что и в предыдущем примере.

Из уравнений (9.26) и (9.28) находим в первом приближении температуру нагретой зоны

$$T_3 = 303 + 600/(23 \cdot 2,36) + 600/(8 \cdot 3,02) = 338,7 \text{ К}.$$

При $T_3 - T_c = 338,7 - 303 = 35,7$ и удельной мощности тепловыделения $q = 600/3,02 \approx 200 \text{ Вт}/\text{м}^2$ с помощью графика, приведенного на рис. 9.11, находим, что в данном случае можно принять естественную вентиляцию стойки.

Охлаждение естественной вентиляцией стойки производится восходящим потоком воздуха, нагревающегося внутри прибора. При этом большая часть тепловой энергии Q_e выносится из прибора через вентиляционные отверстия и общая мощность теплового рассеяния будет составлять

$$Q = Q_{\lambda} + Q_{\kappa} + Q_e.$$

При расчете естественной вентиляции учитывают, что температура нагреваемых стенок перфорированного приборного корпуса в сравнении с неперфорированным снижается [16], т. е.

$$T'_{\kappa} - T_c = 0,75 (T_{\kappa} - T_c). \quad (9.33)$$

В целях упрощения расчета теплового режима естественной вентиляцией принимают следующие допущения:

- воздух, естественно протекающий через прибор, нагревается только за счет конвективного переноса тепла;
- коэффициент теплоотдачи внутри прибора и температура стенок приборного корпуса для всех участков одинаковы;
- температура воздуха, протекающего внутри прибора снизу вверх, изменяется по линейному закону.

Эти допущения существенных погрешностей в расчеты не вносят.

Тепловая энергия нагретой зоны блоков передается протекающему внутри прибора воздуху прямо пропорционально произведению его количества G_e в единицу времени, удельной теплоемкости воздуха c_p и разности температур воздуха, находящегося в верхней и нижней полостях прибора $(T_2 - T_1)$, т. е.

$$Q_e = c_p G_e (T_2 - T_1). \quad (9.34)$$

Воздух из окружающей среды с более низкой температурой T_c через вентиляционные отверстия (см. рис. 9.2) площадью S_1 поступает в нижнюю полость прибора. Поднимаясь вверх за счет разности температурных напоров и проходя через нагретую зону, он попадает в верхнюю полость, откуда через верхние вентиляционные отверстия площадью S_2 выходит наружу нагретым до температуры $T_{\text{вых}}$.

Центральную часть нагретой зоны блоков примем за линию, разделяющую нижнюю и верхнюю внутренние области, средние температуры которых будут определяться по формулам

$$T_1 = 0,5(T_3 + T_c); \quad T_2 = 0,5(T_3 + T_{\text{вых}}); \quad (9.35)$$

тогда перепад температуры внутри прибора может быть выражен через температуру среды и температуру выходящего воздуха

$$T_2 - T_1 = 0,5(T_{\text{вых}} - T_c). \quad (9.36)$$

Количество протекающего через прибор воздуха зависит от скорости протекания v и площади вентиляционных отверстий

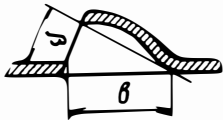
$$G_e = v S_v. \quad (9.37)$$

Здесь скорость восходящего потока воздуха

$$v = \mu \sqrt{2g \gamma_c \Delta P}, \quad (9.38)$$

где μ — коэффициент расхода воздуха, зависящий от формы вентиляционных отверстий (для круглой и прямоугольной формы $\mu = 0,65$, а для отверстий типа жалюзи его можно выбрать из табл. 9.4); g — ускорение свободного падения; ΔP — перепад давления на рассматриваемом участке, Н/м^2 ; γ_c — плотность воздуха.

Таблица 9.4. Зависимость коэффициента μ от формы жалюзи

β°	μ			Эскиз жалюзи
	$b/l=1/1$	$b/l=1/2$	$b/l=1/\infty$	
15	0,27	0,23	0,18	
30	0,43	0,39	0,33	
45	0,54	0,50	0,45	
60	0,60	0,56	0,54	
90	0,64	0,62	0,62	

Примечание. l — длина щели жалюзи.

Подставляя значение (9.38) в (9.37), получаем величину расхода воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$, которая при установившемся тепловом режиме для всех участков в приборе одинакова,

$$G_e = \mu S_v \sqrt{2g \gamma_c \Delta P}. \quad (9.39)$$

Для отсчета перепада давления положение центральной оси нижнего вентиляционного отверстия принимаем за начало отсчета,

где $P_0=0$. Тогда разность давлений между наружным избыточным давлением среды P_c и давлением в нижней внутренней части корпуса прибора будет составлять $P_1 = P_c - P = -P_c$.

Перепад давления на уровне центральной оси верхних вентиляционных отверстий составит разность между давлением внутри прибора $P_{2в}$ и снаружи его $P_{2н}$, т. е.

$$P_{2в} = P_1 - \gamma_1 h_1 - \Delta P_{ш} - \gamma_2 h_2; \quad P_{2н} = 0 - \gamma_c (h_1 + h_2) = -\gamma_c (h_1 + h_2),$$

тогда

$$\Delta P_2 = P_{2в} - P_{2н} = P_1 - \gamma_1 h_1 - \Delta P_{ш} - \gamma_2 h_2 + \gamma_c (h_1 + h_2).$$

Выразим плотность воздуха верхней и нижней областей прибора γ_1 и γ_2 через абсолютную температуру и плотность воздуха окружающей среды γ_c :

$$\gamma_1 = T_c \gamma_c / T_1; \quad \gamma_2 = T_c \gamma_c / T_2.$$

Найдем количество воздуха, протекающего внутри прибора:

$$G_e = \mu_1 S_v \gamma_c T_c \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\frac{h_1 + h_2}{T_c} - \frac{h_1}{T_1} - \frac{h_2}{T_2}}{T_c + T_{ш} \left(\frac{s_1}{s_{ш}}\right)^2 + T_{вых} \left(\frac{s_1}{s_2}\right)^2}}. \quad (9.40)$$

Как видно из рис. 9.2, а, максимальная величина вентиляционных отверстий s_2 и s_1 может быть равна площади основания прибора.

Оптимальные условия охлаждения естественной вентиляцией создаются, когда общая площадь вентиляционных отверстий в корпусе прибора будет составлять 20—30% площади его поверхности. Вентиляционные отверстия площадью, равной основанию прибора (см. рис. 9.2, а), с отношением сторон основания прибора к высоте в пределах от 1/1 до 1/3, удовлетворяют этому условию, так как $s_1 + s_2 = (0,2—0,3)s_0$. Дальнейшее расширение вентиляционных отверстий к существенному увеличению отвода тепла не приводит. Одновременно размеры проходных вентиляционных отверстий в блоках, через которые протекает охлаждающий воздух, должны составлять 5—10% поверхности нагретой зоны, или не менее 10—15% площади основания прибора.

Пример 3. Определим мощность тепловыделения, допустимую для устанавливаемых в приборную стойку блоков (см. рис. 9.2, б). На боковых стенках стойки расположены жалюзи с углом наклона их козырьков на 45° и с отношением сторон $b/l=1/\infty$. Площади входных и выходных вентиляционных отверстий равны и составляют $0,16 \text{ м}^2$. Площадь отверстий в блоках $0,024 \text{ м}^2$. Расстояние от центра нагретой зоны до центров верхних и нижних вентиляционных отверстий $0,6 \text{ м}^2$. Температура нагретого воздуха, выходящего из стойки, 323 К , входящего в стойку — 303 К . Остальные параметры те же, что даны в примере 1.

Вначале для этого примера определим исходные данные. По табл. 9.4 для жалюзи находим $\mu=0,45$, по табл. 9.5 — теплоемкость воздуха $c_p = 10^2 \text{ Дж}/(\text{Н} \cdot \text{К})$. Плотность воздуха при температуре 308 К будет $11,46 \text{ Н}/\text{м}^3$. Среднюю температуру в нижней и верхней частях стойки определяем из выражения (9.35)

$$T_1 = 0,5 (333 + 303) = 318 \text{ К}; \quad T_2 = 0,5 (333 + 323) = 328 \text{ К}.$$

Т а б л и ц а 9.5. *Физические параметры сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении*

T, K	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\mu \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\nu \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
223	1,584	1010	2,04	14,9	9,23	0,728
233	1,515	1010	2,12	15,5	10,04	0,728
243	1,453	1010	2,20	11,6	10,80	0,723
253	1,395	1010	2,28	16,5	11,60	0,716
263	1,342	1010	2,36	17,0	12,43	0,712
273	1,293	1000	2,44	17,5	13,28	0,707
283	1,247	1000	2,51	18,0	14,16	0,705
293	1,205	1000	2,60	18,5	15,06	0,703
303	1,165	1000	2,68	19,0	16,00	0,701
313	1,128	1090	2,76	19,5	16,96	0,699
323	1,093	1000	2,83	20,0	17,95	0,698
333	1,060	1000	2,90	20,5	18,97	0,696
343	1,029	1000	2,97	21,0	20,02	0,694
353	1,000	1000	3,05	21,5	21,09	0,692
363	0,972	1000	3,13	21,9	22,01	0,690
373	0,946	1000	3,21	22,3	23,13	0,688
393	0,989	1000	3,34	23,3	25,45	0,686

Обозначения: γ — плотность; c_p — удельная теплоемкость; λ — коэффициент теплопроводности; μ — коэффициент динамической вязкости; ν — коэффициент кинематической вязкости; Pr — критерий Прандтля.

Значения абсолютных температур в заданных условиях составляют:

$$T_c = 303 \text{ K}, T_{\text{вых}} = 323 \text{ K}, T_{\text{ш}} = 333 \text{ K}, T_1 = 318 \text{ K} \text{ и } T_2 = 328 \text{ K}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (9.40), определяем количество воздуха, протекающего через прибор в единицу времени,

$$G_e = 0,45 \cdot 0,16 \cdot 11,46 \cdot 303 \sqrt{2g} \sqrt{\frac{1,2}{303} - \frac{0,6}{318} - \frac{0,6}{328}} \sqrt{303 + 333 \left(\frac{0,16}{0,024} \right)^2 + 323} = 14,2 \cdot 10^2 \text{ Н/с}.$$

Температура перегрева перфорированного корпуса прибора составляет

$$T'_k - T_c = 0,75 (317 - 303) = 10,5 \text{ K}.$$

Тогда температура стенок перфорированного корпуса составит

$$T'_k = 10,5 + 303 = 313,5 \text{ K}.$$

Мощность теплового рассеяния для каждого вида теплопередачи определяем из выражений (9.6), (9.32) и (9.36):

$$Q_{\text{л}} = 0,92 \cdot 5,67 [(313,5/100)^4 - (303/100)^4] 3,02 = 193,9 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{к}} = 1,53 \cdot 3,02 (313,5 - 303)^{4/3} = 101,4 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{е}} = 10^2 \cdot 14,2 \cdot 10^{-2} (323 - 303) = 284 \text{ Вт}.$$

Общая мощность тепловыделений в блоках, устанавливаемых в заданную приборную стойку, не должна превышать

$$Q = 193,9 + 101,4 + 284 = 579 \text{ Вт}.$$

Из этого примера видно, что наличие вентиляционных отверстий в приборе увеличивает рассеяние тепла на 25—30% в сравнении с естественным охлаждением стенок герметичного прибора, рассмотренного в примере 1.

9.5. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Объемный расход хладагента. Расчет принудительного охлаждения состоит из определения тепловых характеристик РЭА, необходимого напора жидкости или газа (воздуха) и мощности охладительного устройства.

При охлаждении прибора продуваемым воздухом тепловая энергия, выделяемая блоками, передается воздуху конвективным способом и частично рассеивается во внешнюю среду нагретыми стенками приборного корпуса. Последняя часть тепловой энергии составляет примерно 3—5% первой, и поэтому при ориентировочных расчетах ею пренебрегают. При расчете принимают, что температура воздуха внутри прибора изменяется по линейному закону от $T_{вх}$ до $T_{вых}$. Тогда средняя температура нагретого воздуха внутри прибора будет определяющей $T_{оп}$ для перепада температур между охлаждаемым и нагретым воздухом, т. е. $T_{оп} = 0,5 (T_{вых} + T_{вх})$.

Следуя закону сохранения тепловой энергии для рассматриваемого случая, получаем уравнение теплового баланса в виде

$$Q = 1,163 c_p G_v \gamma_c (T_{оп} - T_{вх}), \quad (9.41)$$

где c_p — удельная теплоемкость воздуха при температуре $T_{оп}$; G_v — объемный расход воздуха, м³/ч; γ_c — плотность воздуха при температуре $T_{оп}$, Н/м³; $T_{оп} - T_{вх}$ — перепад температуры.

Тогда объемный расход воздуха, необходимый для поддержания заданного теплового режима составит

$$G_v = 0,86 Q / [c_p \gamma_c (T_{оп} - T_{вх})]. \quad (9.42)$$

Исходными данными для расчета принудительного воздушного охлаждения являются суммарное тепловыделение блоков, размещенных в приборе, максимально допустимая температура внутри прибора и физические параметры охлаждающего воздуха.

Гидравлическое сопротивление системы. Необходимый напор охлаждающих жидкости или газа, создаваемый в охладительной системе вентилятором или насосом, определяется гидравлическим сопротивлением каналов, образованных для циркуляции жидкости или нагнетания воздуха. Гидравлическое сопротивление состоит из суммы сопротивления трения $p_{тр}$ хладагента о стенки каналов и суммы местных сопротивлений p_m , возникающих при изменении направления потока хладагента и скорости его в коленах труб, отводах, расширении, сужениях каналов и т. д.,

$$P = p_{тр} + p_m, \quad (9.43)$$

где $p_{тр} = p_{вх} - p_{вых}$ — разность давлений на входе и выходе участка канала, Н/м².

Гидравлическое сопротивление трения определяется по формуле

$$p_{тр} = \epsilon_g \frac{l}{4R} \frac{\gamma V^2}{2g}, \quad (9.44)$$

где ϵ_g — коэффициент трения, определяющийся характером движения хладагента; l — длина воздухопроводов или труб, м; R — отношение площади поперечного сечения воздухопровода или трубы к периметру этого сечения; $\gamma V^2/2g$ — динамическое давление потока газа или жидкости.

Для ламинарного характера движения $\epsilon_g = A/Re$, где A — коэффициент, зависящий от формы сечения канала (табл. 9.6). Для турбулентного характера $\epsilon_g = 0,316/Re^{0,25}$.

Т а б л и ц а 9.6. Значение эквивалентного диаметра и коэффициента A в формуле $\epsilon_g = A/Re$ для различной формы сечения каналов

Форма сечения канала	$4R$	A
Круг диаметром d	$d_{\text{эkv}}$	64
Квадрат со сторонами a	a	57
Равносторонний треугольник со сторонами a	$0,58a$	53
Кольцо шириной a	$2a$	96
Прямоугольник со сторонами a и b при:		
$a/b=0$	$2a$	96
$a/b=0,2$	$1,81a$	85
$a/b=0,25$	$1,67a$	76
$a/b=0,33$	$1,50a$	69
$a/b=0,50$	$1,30a$	62

Местное гидравлическое сопротивление каналов, H/m^2 , имеет вид

$$P_M = \xi_M \gamma V^2 / (2g), \quad (9.45)$$

где ξ_M — коэффициент местного сопротивления канала, учитывающий форму и размеры; находится по табл. 9.7.

Заметим, что основная часть потерь давления в каналах приходится на местное сопротивление, отсюда этому роду сопротивления следует уделять особое внимание.

Размеры сечения каналов определяются количеством хладагента, пропускаемого в единицу времени, или скоростью потока. Оптимальная скорость потока соответствует переходному режиму от ламинарного к турбулентному. Этот режим определяется числом $Re = 2 \cdot 10^3 \div 10^4$, верхний предел этого значения обеспечивается устойчивый теплосъем. Поэтому скорость потока воздуха внутри приборов увеличивать выше 8 м/с нецелесообразно.

При выборе формы сечения каналов следует учитывать, что минимальные аэродинамические потери имеют место в круглом сечении. Однако воздухопроводы могут быть выполнены более компактными в прямоугольной форме, при которой потери растут с увеличением отношения размеров их сторон [20].

Диаметр круглого канала принимают за эквивалент $d_{\text{эkv}}$, тогда для прямоугольных каналов эквивалентный диаметр канала будет равен

$$d_{\text{эkv}} = 4R = 2ab / (a + b). \quad (9.46)$$



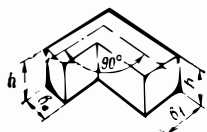
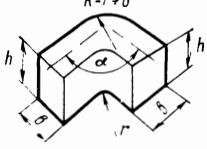
Мощность охладительной установки, затрачиваемую для перемещения хладагента в каналах охладительного контура, определяют, зная массовый расход хладагента и полное гидравлическое сопротивление системы, используя общее выражение для мощности

$$N_b = \frac{G_v P \cdot 10^3}{3600 \cdot 102 \gamma_c \eta_v}, \quad (9.47)$$

где G_v — объемный расход воздуха, $m^3/ч$; P — полное гидравлическое сопротивление системы, H/m^2 ; γ_c — плотность воздуха, H/m^3 ; η_v — коэффициент полезного действия охладительной установки.

Пример 4. Для измерительного пульты необходимо выбрать способ вентиляции и рассчитать ее основные параметры. Общее тепловыделение в блоках 1450 Вт. Температура окружающей среды 303 К. Температура нагретой зоны

Таблица 9.7. Коэффициент потерь ξ при изменении скорости и направления течения воздуха (газа) или жидкости в трубах (к примеру 4)

Внезапное сужение или расширение патрубков		$\xi = (1 - \frac{S}{S_0})^2$	$\xi = 1$	$\xi = 1 - \frac{S}{S_0}$				
Колено радиусом R , сечение круглое d 	R/d	1	2	3	4	5	6	
	Поверхность гладкая шероховатая	0,23 0,51	0,14 0,30	0,10 0,23	0,08 0,18	0,09 0,20	0,09 0,22	
Колено с углом α , сечение круглое и квадратное 	α , град	30	45	60	70	80	90	
	Поверхность гладкая шероховатая	0,17 0,20	0,29 0,35	0,54 0,65	0,71 0,85	0,89 1,06	1,15 1,30	
Колено с углом 90° , сечение прямоугольное 	Отношение h/b_0	Отношение b_1/b_0						
		0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0
	0,25	1,76	1,43	1,24	1,14	1,09	1,06	1,06
	1,00	1,70	1,36	1,15	1,02	0,95	0,90	0,84
	4,00	1,46	1,10	0,90	0,81	0,76	0,72	0,66
80	1,50	1,04	0,79	0,69	0,63	0,60	0,55	
Колено с округленным углом, сечение квадратное 	α , град	40	60	80	100	120	140	160
	a	0,56	0,77	0,94	0,96	1,16	1,24	1,32
	r/b	1	2	4	6	8	10	12
	δ	0,3	0,2	0,14	0,11	0,10	0,09	0,08
	h/b	0,55	1	2	4	6	8	10
	c	1,56	1,02	0,48	0,36	0,34	0,33	0,32

внутри пульты не должна превышать 313 К. Площадь охлаждаемой поверхности пульты 6,22 м². Тогда удельная тепловая нагрузка его

$$P_{уд} = Q/S_K = 1450/6,22 = 233 \text{ Вт/м}^2.$$

Из графика (см. рис. 9.6) видно, что при заданной тепловой нагрузке и перепаде температуры $T_K - T_c = 313 - 303 = 10$ К охлаждение пульты необходимо выполнять принудительной вентиляцией. Из существующих способов вы-

бираем вентиляцию приточно-вытяжную, как мало зависимую от внешней среды. Расчетная схема вентиляции приведена на рис. 9.7.

Определим вначале температуру нагретого воздуха, выходящего из корпуса пульты, $T_{\text{вых}} = 0,5(313 + 303) = 308 \text{ К}$ и количество воздуха, необходимого для охлаждения,

$$G_v = 0,86 \cdot 1450 / [0,24 \cdot 1,165 (308 - 303)] = 890 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Максимальную скорость воздуха в воздуховодах принимаем равной 12 м/с, тогда сечение воздуховодов

$$F = G_v / (V \cdot 3600) = 890 / (12 \cdot 3600) = 0,0206 \text{ м}^2$$

и эквивалентный диаметр воздуховодов $d_{\text{экр}} = \sqrt{4 \cdot 0,0206 / 3,14} = 16,2 \text{ см}$.

Характер потока воздуха при максимальной скорости в воздуховодах 12 м/с находим по числу Рейнольдса из выражения (9.9)

$$\text{Re} = 12 \cdot 0,162 \cdot 10^6 / 16 = 12,2 \cdot 10^4.$$

Этому значению соответствует турбулентный режим потока, при котором коэффициент сопротивления трения на прямом участке (участок I) будет составлять

$$\varepsilon_g = 0,3164 / \text{Re}^{0,25} = 0,3164 / (12,2 \cdot 10^4)^{0,25} \approx 0,017.$$

Потери на трение при длине воздуховода 6 м определим из выражения (9.44)

$$p_{\text{тр}} = 0,017 \frac{6}{0,162} \frac{11,65 \cdot 12^2}{2 \cdot 9,81} \approx 52,8 \text{ Н/м}^2.$$

Подсчитаем все местные потери напора воздуха, возникающие при изменении его скорости и направления, для участков, обозначенных на рис. 9.7 римскими цифрами I, II, III, ..., XI.

Для участка II (колесо с округленным углом до 90° и радиусом изгиба 30 см) по табл. 9.7 находим $a = 0,95$, $r/b = 30/40 = 0,75$ и $h/b = 5/40 = 0,125$. Коэффициент сопротивления при этом определяется произведением табличных значений

$$\varepsilon_{\text{м2}} = 0,73 \cdot 0,95 \cdot 0,3 \cdot 1,56 = 0,324,$$

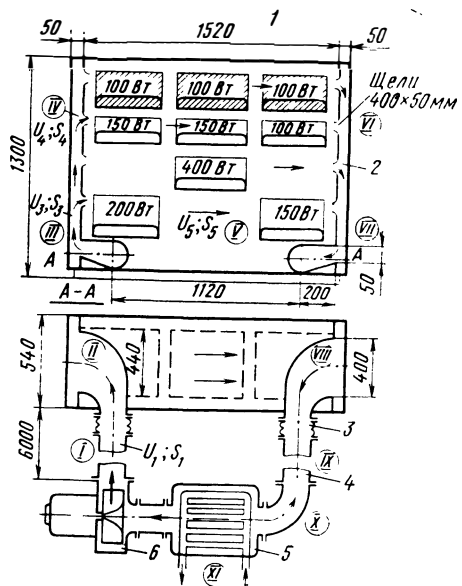


Рис. 9.7. К примеру 4

1 — корпус пульты; 2 — воздухораспределительный канал; 3 — шумоизолирующий участок воздуховода; 4 — воздуховод; 5 — охладитель воздуха; 6 — вентилятор

тогда потери в соответствии с выражением (9.45)

$$p_{\text{м2}} = 0,324 \cdot 11,65 \cdot 12^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 27,7 \text{ Н/м}^2$$

Для участка III колесо прямоугольного сечения с углом 90°, при входе в распределительный канал корпуса пульты $\varepsilon_{\text{м3}} = 1,3$; сечение канала $S_3 =$

$= 0,05 \cdot 0,54 = 0,027 \text{ м}^2$; скорость воздуха в канале $v_3 = 890 / (0,027 \cdot 3600) = 9,15 \text{ м/с}$. Тогда потери будут составлять

$$\rho_{M3} = 1,3 \cdot 11,65 \cdot 9,15^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 77,2 \text{ Н/м}^2.$$

Для участка *IV* имеет место изменение направления потока воздуха на 90° с внезапным расширением за отводом. Такой отвод принимают за колено прямоугольного сечения (см. табл. 9.7). Так как в нашем случае $b_1/b_0 = 5/5$ и $h/b = 5/40$, то $\varepsilon_K = 0,79$, а для случая внезапного расширения потока при сечении каналов $S_4 = 4 \cdot 0,4 \cdot 0,05 = 0,08 \text{ м}^2$ и $S_5 = 0,054 \cdot 130 = 0,7 \text{ м}^2$ коэффициент сопротивления

$$\varepsilon_V = (1 - S_4/S_5)^2 = (1 - 0,08/0,7)^2 = 0,79.$$

Скорость потока воздуха в отводе $v_4 = 890 / 0,08 \cdot 3600 = 3,1 \text{ м/с}$, тогда потери напора на этом участке составят

$$\rho_{M4} = (\varepsilon_K + \varepsilon_V) \gamma v^2 / (2 \cdot 9,81) = (0,79 + 0,79) 11,65 \cdot 3,1^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 9 \text{ Н/м}^2.$$

На участке *V* потерями из-за малости не пренебрегаем.

Для участка *VI* имеет место ввод воздуха в щели с внезапным сужением потока и изменением его направления на 90° . Коэффициент потерь на этом участке тот же, что и на участке *IV*, а плотность нагретого воздуха принимаем по табл. 9.5 равной $11,28 \text{ Н/м}^3$. Тогда потери на участке *VI* составят

$$\rho_{M6} = (0,79 + 0,79) 11,28 \cdot 3,1^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 8,8 \text{ Н/м}^2.$$

На участках *VII*, *VIII* и *IX* потери будут соответственно, как и на участках *III*, *II* и *I*, так как характер изменения потоков воздуха и их скорости одни и те же.

На участке *X* имеем колено скругленное (см. табл. 9.7), коэффициент потерь при $R/d = 1$ будет равен $0,51$, тогда потери этого участка составят

$$\rho_{M10} = \varepsilon_{M10} \gamma v^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,51 \cdot 11,28 \cdot 12^2 / (2 \cdot 9,81) \approx 42 \text{ Н/м}^2.$$

Суммарные потери давления воздуха в охладителе и на входе вентилятора согласно ТУ принимаем равным 440 Н/м^2 , тогда общая сумма потерь вентиляционной системы составит

$$P = p_{\text{тр}} + \sum_1^n \rho_{Mi} = 2 \cdot 52,8 + 2 \cdot 27,7 + 2 \cdot 77,2 + 9 + 8,8 + 42 + 440 \approx 815 \text{ Н/м}^2.$$

Мощность электродвигателя вентиляционной установки при КПД вентилятора $0,5$ определяем на основании (9.47)

$$N_{\text{дв}} = \frac{890 \cdot 815 \cdot 10^3}{3600 \cdot 102 \cdot 11,65 \cdot 0,5} \approx 340 \text{ Вт}.$$

По каталогам на вентиляторы центробежного типа выбираем центробежный вентилятор Ц4-70 № 2,5 с электродвигателем АОЛ22-2 мощностью 600 Вт и $P = 1000 \text{ Н/м}^2$.

9.6. СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Естественное и принудительное воздушное охлаждение широко используется не только для общего охлаждения приборов, но и для охлаждения отдельных теплонагруженных элементов. Например, охлаждение мощных генераторных ламп, диодных выпрямителей или полупроводниковых приборов производится принудительно и чаще всего вентиляторами центробежного типа.

Известно (см. § 1.2), что реализация требований снижения объемов РЭА обычно производится за счет увеличения плотности компоновки ее базовых элементов. В результате удельная мощность тепловыделения возрастает настолько, что естественное воздушное охлаждение становится подчас малоэффективным. Повышение его эффективности достигается увеличением теплоотводящей поверхности — созданием на ней ребер. Такой способ интенсификации теплоотвода широко используется для охлаждения отдельных теплонагруженных эле-

ментов и узлов РЭА. Следует отметить, что при оребрении поверхности контактный способ тепловода играет значительную роль. Особенно широко этот способ используется в микроэлектронной аппаратуре при отводе тепла от теплонагруженных микросхем. Наиболее эффективным средством контактного отвода тепла являются теплоотводящие радиаторы, тепловые трубы и термоэлектрические батареи.

Теплоотводящие радиаторы различаются между собой формой ребер, способом осуществления теплового контакта и мощностью теплового рассеяния. Наибольшее распространение в РЭА получили радиаторы с ребрами пластинчатой, ребристой, штырьковой и игольчатой форм. Типовые конструкции радиаторов с установленными на них источниками тепла показаны на рис. 9.8.

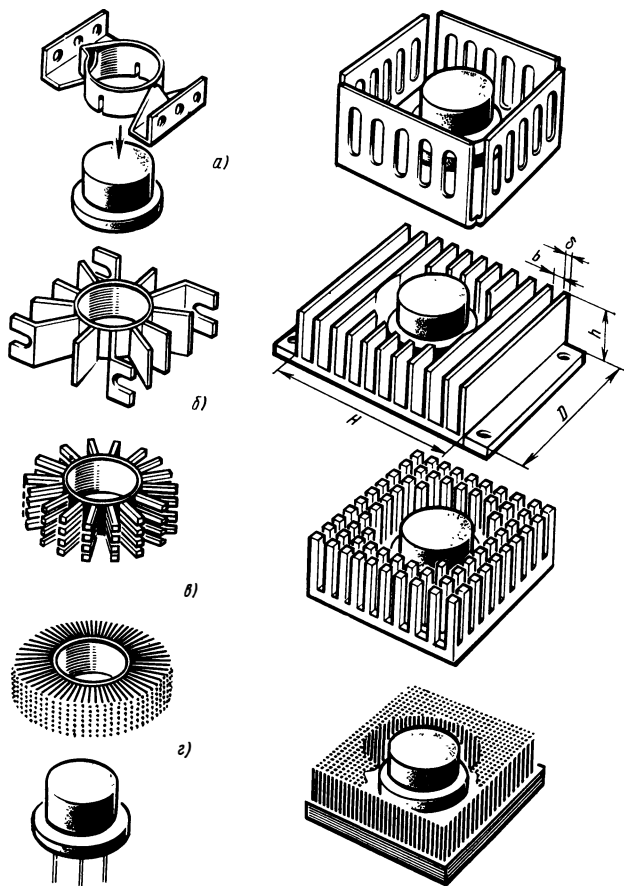


Рис. 9.8. Типовые конструкции радиаторов охлаждения
 а — пластинчатые; б — ребристые; в — штырьковые; г — игольчатые

Пластинчатые радиаторы изготовляют из листовой стали или листового проката алюминиевых сплавов толщиной от 2 до 6 мм. Из-за сравнительно малой эффективности такие радиаторы используются для отвода тепла небольших мощностей.

Ребристые радиаторы при одинаковых размерах с пластинчатыми более эффективны. Их изготовляют из алюминиевых или магниевых сплавов, способом

литья, с последующей обработкой контактных площадок до 6—7-го класса чистоты поверхности.

Штырьковые радиаторы имеют более высокий коэффициент теплообмена, чем ребристые, и изготавливаются преимущественно литьем под давлением.

Игольчатые радиаторы в несколько раз эффективнее штырьковых, однако сложность изготовления и сравнительно большая стоимость несколько сдерживают их применение.

Эффективность теплообмена радиаторов находится в прямой зависимости от количества и размеров ребер, а также от взаимного расположения их. Наименьшая толщина ребра определяется технологическими возможностями литья, а минимальный размер между соседними плоскостями ребер рекомендуется делать не менее 4—6 мм из-за необходимости образования на стенках ребер пограничного слоя охлаждающего воздуха наименьшей толщины.

Для обеспечения теплового контакта с наименьшим термическим сопротивлением между источником тепла и радиатором устанавливаются мягкие прокладки с высокой теплопроводностью (алюминий, свинец, олово). Если необходимо электроизолировать источник тепла от радиатора, то окисляют контактную плоскость или используют прокладки из оксидированного алюминия.

В целях ликвидации между ребрами застоя пограничного слоя охлаждающего воздуха и обеспечения его турбулентности поверхность ребер окисляют или на нее наносится гляцевое лакокрасочное покрытие.

Расчет радиаторов заключается в определении его геометрических размеров при заданной мощности теплового рассеяния, температуре окружающей среды и максимально допустимом нагреве корпуса охлаждаемого элемента. Однако может быть поставлена и другая задача: определить допустимый тепловой режим активного элемента, установленного на готовом радиаторе.

Из формулы (9.7) находим суммарную поверхность охлаждения радиатора

$$S = 0,86 Q / [\alpha (T - T_c)], \quad (9.48)$$

где T — температура поверхности радиатора, K ; Q — мощность рассеяния тепла источником, Вт; α — коэффициент теплообмена, состоящий из суммы коэффициентов теплообмена боковых $\alpha_{к1}$ и торцевых $\alpha_{к2}$ плоскостей ребер и теплообмена излучением $\alpha_{лз}$, $\alpha = \alpha_{к1} + \alpha_{к2} + \alpha_{лз}$.

Используем порядок расчета теплообмена, приведенный в [40] для нормального атмосферного давления.

Для боковых плоскостей ребер длиной D , установленных вертикально,

$$\alpha_{к1} = 6,36 [(T - T_c)/D]^{0,25}. \quad (9.49)$$

Для ребер, расположенных горизонтально и вершиной вверх,

$$\alpha'_{к1} = 8,61 [(T - T_c)/H]^{0,25}. \quad (9.50)$$

Для ребер, расположенных горизонтально и вершиной вниз,

$$\alpha''_{к1} = 4,70 [(T - T_c)/H]^{0,25}. \quad (9.51)$$

Для торцевых плоскостей ребер радиатора

$$\alpha_{к2} = 0,6 [(T - T_c)/\delta^5]^{0,125}. \quad (9.52)$$

Коэффициент теплообмена при излучении получим из выражения (9.3)

$$\alpha_{лз} = 5,6 \varepsilon \frac{(T/100)^4 - (T_c/100)^4}{T - T_c} \frac{b}{b + 2h}, \quad (9.53)$$

где ε — степень черноты (см. табл. 9.1); T — температура радиатора, K ; T_c — температура окружающей среды, K ; b — расстояние между стенками ребер, м; h — высота ребер, м.

Коэффициент теплообмена при внешнем давлении, отличающемся от нормального, будет иметь вид $\alpha^{\circ}_к = \alpha_k \sqrt{P/P_0}$.

Приведенные формулы позволяют определить параметры радиатора или тепловой режим установленного на нем активного элемента с практически допустимой погрешностью 10—15%.

Для естественного охлаждения размеры основания радиатора более 0,150×0,150 и высота ребер более 0,04 м становятся малоэффективными, и де-

лать их больше нецелесообразно. Оребрение поверхности охлаждения становится необходимым лишь тогда, когда соблюдаются условия

$$2 \lambda / (\alpha \delta) > 5. \quad (9.54)$$

Пример 5. Требуется определить размеры радиатора ребристого типа, предназначенного для охлаждения транзистора мощностью 20 Вт. Максимальная допустимая температура нагрева его корпуса $T = 333$ К, максимальная температура окружающей среды $T_c = 313$ К. Покрытие поверхности радиатора глянцевое, лакокрасочное. Транзистор устанавливается на основании радиатора со стороны неоребренной поверхности. Термическое сопротивление контактной плоскости установки транзистора принимаем 0,25 К/Вт.

Зададимся геометрическими размерами ребра $\delta = 0,003$ м, $b = 0,004$ м, $h = 0,02$ м, $D = 0,08$ м (см. рис. 9.8, б).

На основании выражений (9.2), (9.5) и (9.6) определим составляющие общего коэффициента теплообмена $T = T_k - 0,25 \cdot 20 = 328$ К.

$$\alpha_{к1} = 6,36 (15/0,08)^{0,25} = 23,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{к2} = 0,6 (15/0,003^5)^{0,125} = 0,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{лз} = \frac{5,67 \cdot 0,9 [(328/100)^4 - (313/100)^4]}{328 - 313} \frac{0,004}{0,004 + 2 \cdot 0,02} = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тогда общий коэффициент теплообмена

$$\alpha = 23,5 + 0,75 + 0,61 = 24,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Площадь поверхности охлаждения радиатора определим из (9.48)

$$S = (0,86 \cdot 20) / (24,9 \cdot 15) = 0,0461 \text{ м}^2.$$

Длина всех ребер радиатора

$$H_s = S / D = 0,0461 / 0,08 = 0,576 \text{ м}.$$

Отсюда определим количество ребер

$$n = H_s / (2h + \delta + b) = 0,576 / (2 \cdot 0,02 + 0,003 + 0,004) = 12.$$

Ширина основания радиатора

$$H = [n(\delta + b)] - b = [12(0,003 + 0,004)] - 0,004 = 0,08 \text{ м}.$$

Тепловые трубки применяются при естественном охлаждении и благодаря своей простоте получают все большее распространение. Они работают по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла и представляют собой герметичный вакуумированный объем круглого овального или прямоугольного сечения. Внутренняя поверхность трубки покрыта слоем капиллярно-пористого материала. Такой материал служит своеобразным фитилем. Часть внутреннего объема, не занятого капиллярно-пористым материалом, заполняется насыщенным паром рабочей жидкости (фреон, ацетон, спирт и др.).

Теплопередача в тепловой трубке происходит за счет поглощения тепла в результате парообразования в нагреваемой части трубки. Нагретый пар по паровому каналу движется к охлаждаемой части трубки, где и конденсируется, отдавая свое тепло стенкам. Пополнение рабочей жидкости в испарительной части трубки происходит за счет постоянного переноса конденсата капиллярно-пористым материалом из охлаждаемой части трубки к нагреваемой.

Тепловые трубки выполняют из материалов, обеспечивающих создание вакуума во внутренней полости. Изготовленные из диэлектрического материала они могут служить одновременно изоляторами и теплоотводами от источника тепла. Такие трубки передают тепло на значительные расстояния, для отвода тепла могут быть размещены в малодоступных местах и служить несущей конструкцией охлаждаемых элементов. Теплоотводящая способность такой трубки может быть увеличена оребрением охлаждаемого конца при обеспечении хорошего теплового контакта с ребрами (рис. 9.9).

Тепловые трубки имеют широкую перспективу использования, особенно в случаях охлаждения элементов с минимальным перепадом температур, отвода тепла в определенном направлении, при плотности теплового потока до $(1 \div 2) 10^4$ Вт/м², сбора тепла с отдельных активных элементов и направления его к общему охладителю и т. д. Рассеиваемая мощность трубок может составлять 150—200 Вт. Охлаждаемые элементы монтируются на площадках теплоотводящих трубок, а твоядимое к радиатору тепло снимается естественным или принудительным способами.

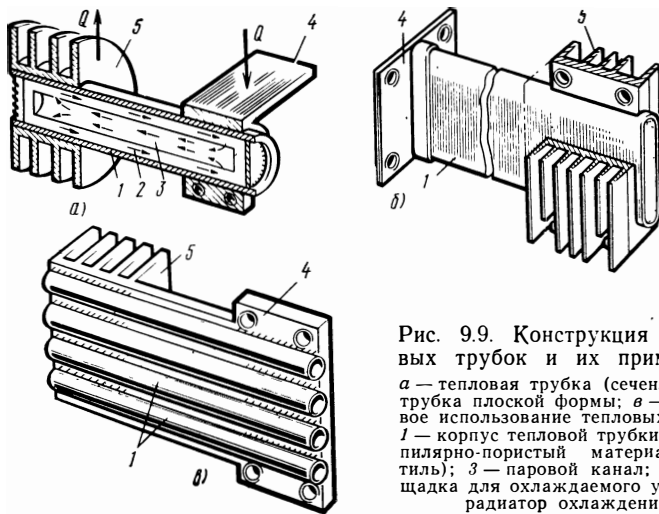


Рис. 9.9. Конструкция тепловых трубок и их применение
a — тепловая трубка (сечение); *б* — трубка плоской формы; *в* — групповое использование тепловых трубок
 1 — корпус тепловой трубки; 2 — капиллярно-пористый материал (фитиль); 3 — паровой канал; 4 — площадка для охлаждаемого узла; 5 — радиатор охлаждения

Термоэлектрическое охлаждение элементов осуществляется термобатареями, принцип действия которых основан на том, что при прохождении постоянного тока в цепи с двумя различными материалами на одном контактом спая тепло поглощается, на другом — выделяется (эффект Пельтье).

Съем тепла с горячего спая производится естественным или принудительным способом (рис. 9.10).

Термоэлектрические системы применяются для охлаждения малогабаритных источников тепла с небольшой мощностью рассеяния или для термостатирования малых объемов с увеличенным перепадом температуры. Для большинства объемов такие системы используют только при малых перепадах температуры. Максимальная разность температур одной ступени батарей составляет 40—50, для трехступенчатой батарей — 100—120°.

Преимуществами термоэлектрических батарей являются их длительный срок службы (до 5 лет), бесшумность работы и обратимость процессов нагрева. Однако сравнительно большие масса, габаритные размеры и потребляемая мощность (2—3 Вт на 1 Вт отводимой мощности) сдерживают их широкое применение в РЭА.

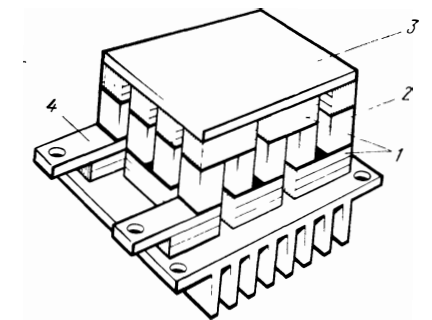


Рис. 9.10. Конструктивная схема термоэлектрической батареи

1 — теплопереходы; 2 — термоэлементы; 3 — «холодная» площадка; 4 — теплоотводящее основание

КОНСТРУИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

10.1. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Несущей конструкцией в РЭА называют комплекс взаимосвязанных механических деталей и узлов, несущих на себе все схемные элементы, установочные детали и электрический монтаж. Основными узлами несущей конструкции в РЭА являются приборные корпуса — стойки, аппаратные шкафы, каркасы, контейнеры, шасси и панели блоков и узлов. К несущей конструкции относятся также подложки, платы, основания, кронштейны, рамы, направляющие, ограничители и др.

При разработке несущей конструкции РЭА основными исходными требованиями являются: механическая прочность, жесткость и долговечность; надежность механических соединений; многофункциональность деталей и узлов; эффективность использования конструкционных материалов. Удельный вес каждого из этих требований в общем объеме зависит от назначения узла или детали, области использования и условий эксплуатации.

Несущая конструкция РЭА может считаться разработанной с оптимальными характеристиками лишь в том случае, если ее функциональные свойства выполняются с высоким качеством, а свойственные ей параметры и форма соответствуют минимальной материалоемкости. В такой конструкции, во-первых, должны быть учтены величины и направления действия всех статических и динамических нагрузок и, во-вторых, в разумной мере использованы упругие свойства материалов.

В процессе разработки деталей и узлов основными вопросами являются конструктивно-технологические: изготовление и сборка в условиях автоматизированного производства; точность изготовления; обеспечение заранее заданного расположения элементов схемы; взаимозаменяемость элементов конструкции; сокращение номенклатуры деталей, марок материалов и отделок; совмещение ряда конструктивных функций в одной детали; обеспечение самоустанавливаемости деталей при обработке и сборке, простыми опорными плоскостями; многократное использование в одном изделии одинаковых узлов и деталей; надежное сопряжение деталей, изготавливаемых из разнородных материалов; и сменность изнашивающихся частей. Все это должно быть исполнено на базе простой и однородной технологии обработки с минимальными отходами материалов.

Другим не менее важным фактором является выбор запаса прочности. Принятый запас прочности должен быть равнозначным для всех звеньев механической цепи. Если прочность всей цепи определяется прочностью ее слабого звена, то сколько бы мы ни

усиливали остальные звенья, общая прочность цепи не повысится.

Известно, что при изгибе и кручении напряжения по сечению распределяются от нуля (в нейтральном слое) до максимума (в крайних слоях). В этом случае удалением металла в местах наименьших напряжений мы образуем пустотелый профиль, равный по прочности сплошному стержню. Стремление к более эффективному использованию металла заставляет конструкторов применять профили различной конфигурации при разработке деталей и узлов несущей конструкции. Практически преобладающая часть элементов несущей конструкции РЭА не рассчитывается на прочность. Как малонагруженные при нормальных условиях эксплуатации они имеют такой запас прочности, при котором определяющими могут быть лишь значения деформации, т. е. их жесткость.

10.2. ЖЕСТКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Исходные параметры. Степень жесткости в РЭА оценивается деформацией конструкции при воздействии внешних сил. К внешним силам надо отнести главным образом динамические силы, действующие в результате изменения скорости: вибрация или удары.

Жесткость системы зависит от характера приложения нагрузки и способа крепления элементов. Так, например, брус, свободно лежащий на двух опорах и нагруженный равномерно распределенной нагрузкой, обладает жесткостью в 1,5 раза большей, чем брус той же длины, нагруженный сосредоточенной нагрузкой, и в 4—8 раз меньше жесткости брусьев с заделанными концами (рис. 10.1).

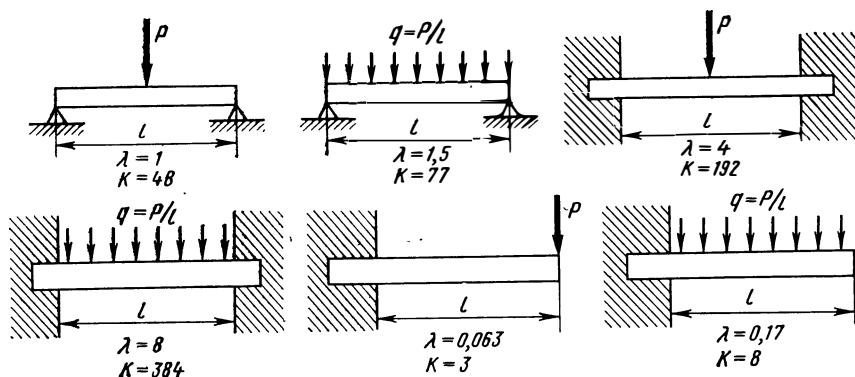


Рис. 10.1. Коэффициент жесткости λ нагруженной системы в зависимости от приложения нагрузки и крепления балки

Степень жесткости характеризуется коэффициентом жесткости. Коэффициент жесткости бруса постоянного сечения при работе на изгиб

$$\lambda_{\text{изг}} = P/f = KI/EI, \quad (10.1)$$

а при работе на кручение

$$\lambda_{кр} = M/\varphi = G I_p/l; \quad (10.2)$$

при работе на растяжение—сжатие

$$\lambda_p = P/f = EF/l, \quad (10.3)$$

где I — момент инерции сечения бруса; E — модуль нормальной упругости материала; P — действующая сила; f — прогиб (деформация); M — крутящий момент; I_p — полярный момент инерции сечения бруса; l — длина бруса; K — коэффициент, зависящий от условий нагружения; F — сечение бруса; G_c — модуль сдвига.

Известно, что общая масса радиоэлектронной сборки m находится в прямой зависимости от типа и количества входящих в нее схемных элементов N_s . При максимальной эффективности использования конструкционных материалов эти элементы в конечном счете и определяют необходимые прочностные параметры несущей конструкции.

Поэтому эффективность использования конструкционных материалов может определяться удельным расходом материала на один схемный элемент

$$\eta_s = P/N_s.$$

Зависимость деформации от характера нагрузки. Из приведенных соотношений (10.1), (10.2) и (10.3) могут быть получены выражения деформации для случаев:

растяжения или сжатия

$$f_p = P_l/EF; \quad (10.4)$$

изгиба

$$f_{изг} = Pl^3/KEI; \quad (10.5)$$

кручения

$$f_{кр} = Pl_1^2 l/GI_p, \quad (10.6)$$

где l_1 — длина плеча приложения силы, скручивающей брус.

Предположим, что на каждый из двух одинаковых брусьев действуют равные силы. Одна из них вызывает растяжение, а другая — изгиб. Приравнявая выражения (10.4) и (10.5) и подставляя значения $I = a^3b/12$, а $F = ab$, при консольно закрепленном стержне $K = 3$ и при $a = l$ найдем

$$f_p = f_{изг}/4.$$

Как видно, при одних и тех же условиях нагрузки изгиб сопровождается значительно большей деформацией, чем растяжение или сжатие. Иными словами, при равенстве деформации материала, работающего на сжатие (растяжение), расходуется в несколько раз меньше, чем материала, работающего на изгиб.

Зависимость деформации от массы и характера материала. В РЭА, работающей при значительных ускорениях, собственная мас-

са оказывается тесно связанной динамическим воздействием. Чем меньше масса несущей конструкции при сохранении ее прочностных параметров, тем меньшему воздействию динамических перегрузок она будет подвержена.

Поэтому при конструировании несущих конструкций РЭА необходимо прежде всего оценить возможность использования более легкого материала при сохранении условий прочности и жесткости.

Основанием для подобной оценки могут служить количественные выражения деформации растяжения, сжатия, изгиба или кручения. Анализируя их, можно заметить, что максимальные деформации пропорциональны отношению нагрузки к модулю упругости или модулю сдвига и зависят от геометрических размеров элементов несущей конструкции [41].

Обозначим объем материала $V = abl$, а отношение массы материала к его объему как плотность γ . После соответствующего преобразования выражения (10.4) получим

$$f_p = \gamma l^2/E. \quad (10.7)$$

Подставляя значение момента инерции $I = a^3b/12$ в выражение (10.5), после аналогичного преобразования будем иметь

$$f_{изг} = 12 l^4 \gamma / Ka^2E, \quad (10.8)$$

и аналогично предыдущему из выражения (10.6)

$$f_{кр} = 12 l_1^2 l^2 \gamma / aG. \quad (10.9)$$

Из этих выражений видно, что отношение P/E выражает физическое свойство материала, а отношение l к a — размерные свойства конструкции. Если отношение P/E будет мало, то при тех же размерах тела деформация его от собственного веса будет меньшей. Учитывая, что объем при сравнительной оценке качества материала является постоянным, можно утверждать, что с точки зрения минимальной массы наиболее выгодным материалом, имеющим наименьшую деформацию, является такой, у которого отношение γ/E или γ/G является наименьшим. При оценке материала обычно пользуются обратной величиной этих отношений. Значение E/γ для материалов, наиболее часто используемых в элементах несущей конструкции, приведены в табл. 10.1.

Имеются различные способы увеличения жесткости элементов конструкции, например изгиб стремятся заменить растяжением — сжатием или производят блокирование деформации с помощью косых связей. Жесткость можно увеличить созданием специального профиля у балок или гибкой листового проката. Эффективным средством увеличения жесткости системы является использование балок с симметричными профилями (в отличие от несимметричных). Нагрузка несимметричных профилей вызывает появление дополнительно крутящего момента, в то время как балки с симметричным профилем исключают моменты кручения. И, наконец, увеличение жесткости деталей плоской формы легко осуществимо

Таблица 10.1. Оценка материала по значению отношения модуля упругости E к плотности γ

Наименование материалов	$E/10^7, \text{Н/м}^2$	$\gamma/10^3, \text{кг/м}^3$	$\frac{E}{\gamma} / 10^8$
Сталь	21 000	7,8	2700
Алюминиевый сплав	7200	2,8	2600
Магниевый сплав	4000	1,7	2270
Латунь	10 000	8,4	1200
Бронза	11 400	8,5	1360
Титан	11 500	4,5	2600
Керамика	8000	3,8	2100
Ситалл	10 000	2,6	3800
Пластмассы термореактивные	60—1000	1,3—1,8	44—800
Пластмассы термопластичные	10—100	1,2—1,5	8,5—85

также образованием на их поверхности ребер жесткости, пример конструктивного образования которых показан на рис. 10.2.

Высота, форма и сечение ребер выбираются в зависимости от той жесткости, которую необходимо получить. Здесь надо учитывать, что неправильно выбранная высота или форма ребер может привести не к упрочнению детали, а к ее ослаблению. У ребер жесткости конусного сечения вершина является наиболее слабым участком, где в первую очередь происходит разрушение материала. На жесткость оребренной детали значительное влияние оказывает относительная высота ребра $h/h_0 = \eta_n$ и относительная ширина $b/b_0 = \sigma$.

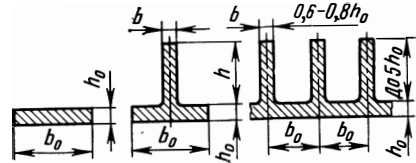


Рис. 10.2. Ребра жесткости плоских деталей несущей конструкции

Условия работы ребер жесткости на сжатие и растяжение неодинаковы. Они зависят от схемы нагрузки или от допустимых напряжений на сжатие или растяжение.

Момент инерции сечения и момент сопротивления детали с ребрами можно выразить в общей форме, если известны момент инерции I_0 и момент сопротивления W_0 основного исходного сечения:

$$I = I_0 \left[1 + \sigma \eta_n^3 + 3\sigma \eta_n (1 + \sigma \eta_n) \left(\frac{1 + \eta_n}{1 + 8\eta_n} \right) \right]; \quad (10.10)$$

$$W = W_0 \left(\frac{I}{I_0} \frac{1 + \sigma \eta_n}{1 + 2\eta_n + \sigma \eta_n^2} \right). \quad (10.11)$$

Обычно высота ребер в литых деталях составляет не более $h = 5h_0$, а толщина — не более $(0,6 \div 0,8)h_0$. В деталях, изготовляемых из тонколистового проката, высоту ребер выбирают из соображения прочности, так как толщина их определяется толщиной выбранного материала.

Практика изготовления различного рода конструкций из тонколистового проката выработала ряд технологических способов увеличения жесткости элементов конструкции изгибом материала, высадкой, вытяжкой в штампе или отбортовкой кромок. Допустимая глубина изгибов и местных высадок зависит от марки материала и его толщины. Для мягких сортов тонколистового проката размеры профиля зига приведены на рис. 10.3, а.

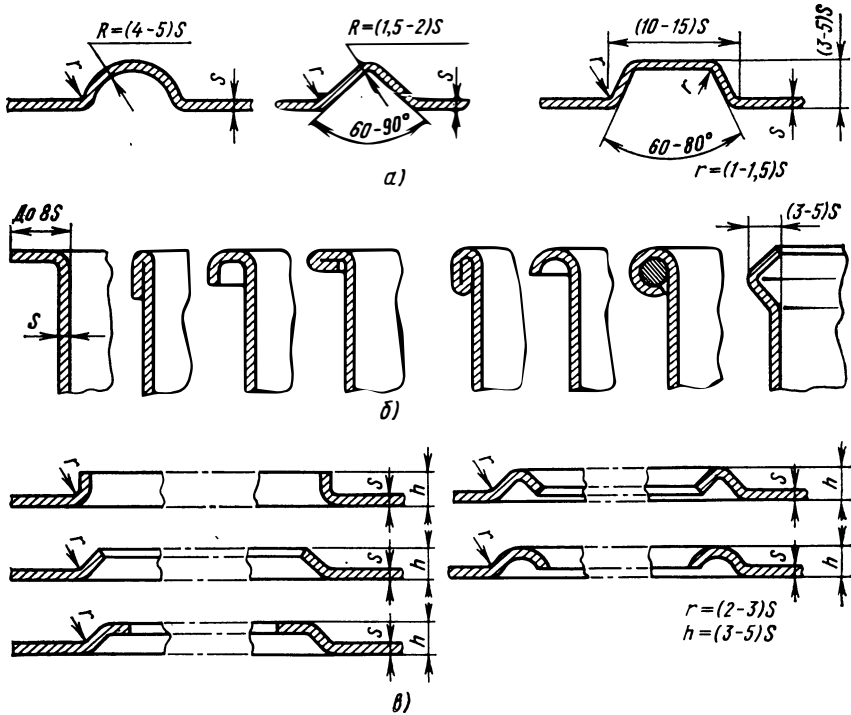


Рис. 10.3. Образование профиля жесткости на плоскости и по периметру деталей из тонколистового проката

Не меньшее внимание необходимо уделять вопросам устойчивости формы. Это особенно относится к конструкциям, изготавливаемым из тонколистового проката: особое внимание приходится уделять устойчивости внешних и внутренних кромок их; ее увеличивают отгибом кромок и образованием ребер жесткости (рис. 10.3, б) или отбортовкой внутренних кромок по всему контуру отверстий, образованных на плоскости деталей (рис. 10.3, в).

10.3. ВИБРОПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Циклическая прочность. В механической системе знакопеременная сила, как правило, вызывает знакопеременную упругую деформацию. Алгебраическая полусумма наибольшего σ_{\max} и наименьшего σ_{\min} напряжений, возникающих в материале, называется средним напряжением $\sigma_{\text{ср}}$.

При создании вибропрочной аппаратуры прочность конструкции определяются не по статической, а по циклической нагрузке (циклическая прочность материала).

Циклической прочностью называют способность материала выдерживать знакопеременную нагрузку в течение определенного количества циклов. Знакопеременные нагрузки по величине выше допустимых вызывают преждевременное наступление усталости материала. При такой нагрузке металлы разрушаются при напряжении, меньшем предела статической нагрузки. И наоборот, усталостного явления в металле не наблюдается, если циклическое напряжение равно или меньше предела усталостной прочности.

Число нагруженных циклов, которое может выдержать материал, зависит не только от среднего напряжения, но и от разности между максимальным и минимальным значениями циклических напряжений. При снижении этой разности увеличивается способность материала выдерживать значительное число циклов.

Пределом усталости (выносливости) материала называется напряжение σ_y , которое материал в состоянии выдержать при данном числе циклов. При определении этой величины используют диаграммы усталости материала.

Для симметричного знакопеременного цикла существуют установившиеся соотношения между пределом усталости на изгиб $\sigma_{y,изг}$, пределом прочности $\sigma_{пр}$ и условным пределом текучести $\sigma_{тек}$):

для стали

$$\sigma_{y,изг} = (0,2 \div 0,3) \sigma_{пр} (1 + \sigma_{тек}/\sigma_{пр}); \quad (10.12)$$

для алюминиевых и магниевых сплавов

$$\sigma_{y,изг} = (0,25 \div 0,5) \sigma_{пр} \quad (10.13)$$

для медных сплавов

$$\sigma_{y,изг} = (0,3 \div 0,4) \sigma_{пр}. \quad (10.14)$$

В сравнении с симметричным знакопеременным изгибом предел усталости на растяжение или сжатие больше в 1,1—1,5 раза, а на кручение — меньше в 1,5—2 раза.

Повышение усталостной прочности может осуществляться за счет конструктивных и технологических мер. Конструктивные меры предусматривают снижение местных концентраций напряжения в уступах, переходах плоскостей, в выемках и изгибах материала, использование материала на сжатие и растяжение вместо изгиба и кручения. Технологические меры предусматривают термическую или химическую обработку металла в виде нормализации, закалки, отпуска, цементации и азотирования.

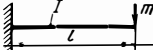
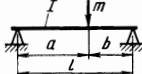
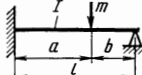
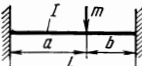
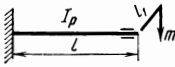

Как показал опыт, при наступлении усталости металла механические свойства его и структура не изменяется. Однако, когда напряжение в материале достигает определенной величины, в нем появляются микроскопические трещины. Сначала они появляются на поверхности металла, в местах наибольших напряжений и там, где имелись уже едва заметные пороки. Незначительные трещины постоянно увеличиваются: края и поверхности их под влиянием переменной нагрузки трутся между собой, плоскости сглаживаются, и когда сечение тела заметно ослабнет, происходит внезапный излом.

Собственные частоты простейших механических систем. Нетрудно установить, что чем большую жесткость имеет механическая система, тем выше будет ее собственная частота.

Как известно, собственная частота f_0 наиболее простой колебательной системы массой m и упругостью c может быть выражена в виде $f_0 = \sqrt{mc}/2\pi$, где упругая жесткость представляет собой отношение прогиба к силе P , вызывающей этот прогиб, $c = f_0/P = f_0^3/(KEI)$.

Используя эти соотношения, упругую жесткость можно выразить через свойства материала и размеры упругого тела. Значе-

Таблица 10.2. Собственные частоты колебания простейших балочных систем в зависимости от способа закрепления

№ пп.	Схема крепления системы	Собственные частоты колебания, Гц
1		$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3I E}{ml^3}}$
2		$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E I l^3}{ma^2b^2}}$
3		$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{12E I l^3}{ma^3b^3(3l + b)}}$
4		$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E I l^3}{a^3b^3m}}$
5		$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G I_p}{l_1^2 m}}$
6		$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E F}{ml}}$

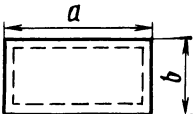

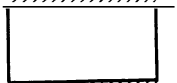



ние собственной частоты для простых случаев использования балок приведено в табл. 10.2. Как видно из таблицы, резонансные частоты при растяжении значительно выше, чем при изгибе. Это же можно наблюдать и при сравнении явления сжатия с кручением.

Как видно, вибропрочность конструкции также характеризуется отношением E/γ . При большом значении E/γ будет выше и собственная частота системы.

Печатные платы, на которых монтируются радиоэлементы, микромодули или микросхемы, относятся к разряду колебательных систем с равномерно распределенной нагрузкой. Собственная частота колебания таких пластин зависит от формы, размеров, характера материала и условий закрепления.

Расчет собственной частоты колебания плат позволяет подобрать основные параметры их конструкции, исключая возможность появления резонанса. В табл. 10.3 приведены реально возможные способы закрепления плат, равномерно нагруженных элементами, и расчетные выражения коэффициента K^2_0 для при-

Таблица 10.3. Значение коэффициента K^2_0 в формуле (10.15) для расчета собственной частоты колебания тонких равномерно нагруженных пластин

№ пп.	Способ крепления	Значение коэффициента K^2_0
1		$K^2_0 = \pi^2 \left(1 + \frac{a}{b} \right)$
2		$K^2_0 = \pi^2 \sqrt{1,54^4 + 2,5 \frac{12}{\pi^2} (1 - \nu) \frac{a^2}{b^2}}$
3		$K^2_0 = \pi^2 \sqrt{1 + 2,57 \frac{a^2}{b^2} + 5,14 \frac{a^4}{b^4}}$
4		$K^2_0 = \pi^2 \frac{a^2}{b}$
5		$K^2_0 = 22,4 \sqrt{1 + 2,91 \frac{a^2}{b^2} + 2,44 \frac{a^4}{b^4}}$
6		$K^2_0 = 22,4 \sqrt{1 + 0,65 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$

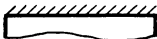
Условные обозначения:



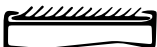
— не закрепленная сторона пластины



— опертая сторона



— жестко закрепленная сторона



— шарнирно-закрепленная сторона

веденных способов крепления. Собственные частоты таких пластин рассчитывают по формуле

$$f_0 = (0,159/a^2) K^2_0 \sqrt{Dg/(\gamma\delta)}. \quad (10.15)$$

где a — наибольшая сторона пластины, см; δ — толщина пластины, см; g — ускорение силы тяжести, см/с²; γ — плотность пластины, нагруженной схемными элементами, кг/м³; D — цилиндрическая жесткость пластины, Н·см, определяемая таким образом: $D = E\delta^3/12(1-\nu^2)$; здесь E — модуль упругости и ν — коэффициент Пуассона для материала пластин, Н/см².

10.4. КОНСТРУИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Оболочковые конструкции. Основная особенность несущих конструкций РЭА заключается в наличии значительного числа деталей, весьма разнообразных по функциональному назначению, массе, размерам и материалам. Силовой расчет их становится трудоемким и сравнительно малоэффективным. Поэтому механические характеристики большей части деталей не рассчитываются заново, а заменяются аналогами или опытными характеристиками деталей предыдущих разработок. В ответственных случаях решение принимается после тщательного анализа схемы нагрузки детали и в результате расчета прочностных и динамических параметров.

Особое внимание уделяют технологии изготовления деталей несущих конструкций: литьем, прессованием, штамповкой, выдавливанием, гибкой, сваркой или экструзией. Чаще детали несущей конструкции РЭА представляют собой оболочковые формы (кожухи, шасси, пластины, экраны, корпуса и т. д.) с использованием литья или профилированного и тонколистового проката.

Оболочковые конструкции деталей с жестким полым профилем при массовом производстве проще изготавливать методом экструзии, т. е. выдавливания нагретого до пластического состояния металла через отверстия матрицы. В матрицу устанавливают профильные дорны, и тем самым выдавливаемому металлу придают необходимый для детали профиль замкнутого или открытого типа. После остывания металла полученный профиль разрезают по длине на детали. Таким образом могут быть изготовлены рамки для кассет, оребренные пластины, детали для шасси, корпусов и т. д.

Конструирование оболочковых деталей из тонколистового проката связано с необходимостью учета особенностей гибки листа при его профилировании. Возникающие в процессе изгиба напряжения в металле могут превышать предел текучести и вызывать в местах гибки трещины и изломы, часто остающиеся незамеченными. Изгиб листа радиусом меньше допустимого для данного материала нарушает однородность структуры металла и в конечном счете приводит к излому мест изгиба.

Минимальный радиус гибки листового проката в холодном состоянии зависит от марки материала, расположения линии изгиба относительно направления проката и от угла изгиба [34].

Профили гибки и использование их в несущих конструкциях. По своему назначению гнутый профиль может быть силовым или

декоративным, а по форме — открытым или замкнутым. Жесткий профиль может быть изготовлен в виде отдельной балки, используемой как элемент несущей конструкции, или образован непосредственно на кромке листовой заготовки детали.

В тех случаях, когда деталь принятой формы не может быть ужесточена непосредственным профилированием кромок, ее усиливают приваркой отдельных профилей, гнутых из того же материала. Профиль детали выбирают с учетом использования ее формы не только как элемента жесткости, но и как элемента жесткой связи с сопрягаемыми узлами конструкции. Иначе говоря, форма жесткого профиля должна учитывать необходимость надежного крепления других конструктивных элементов, взаимное расположение и крепление деталей, образующих узел, возможность фиксированных установок, образования элементов защитных уплотнений и т. п.

Открытые профили балочного типа общего назначения простой формы применяют для ужесточения элементов конструкции. На рис. 10.4 изображены наиболее распространенные профили открытого типа.

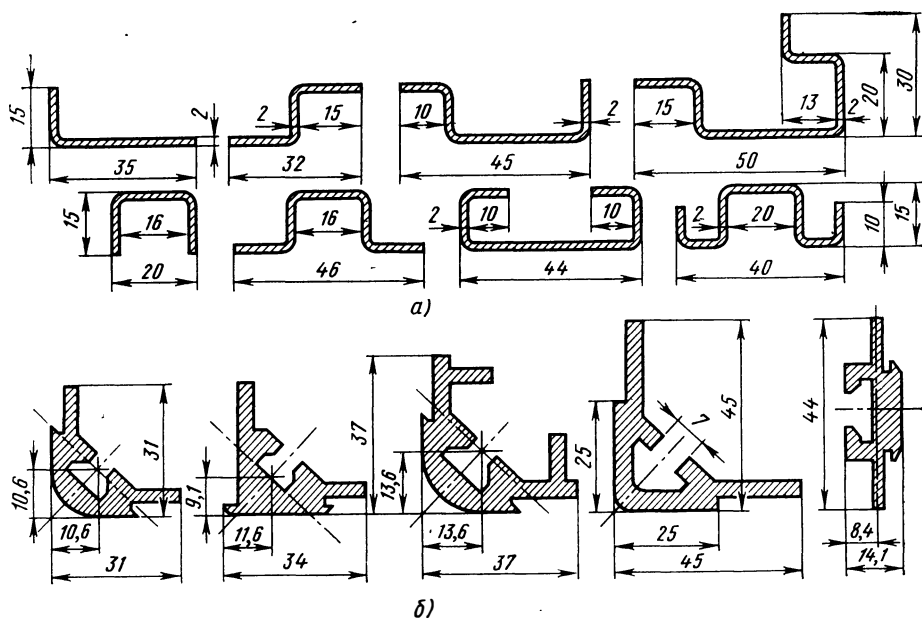


Рис. 10.4. Балочные профили несущей конструкции, гнутые из тонколистового проката (а) и прессованные из алюминиевых сплавов (б)

Профилирование кромок листового проката в большинстве случаев считается более выгодным, чем приварка к ним жестких профилированных балок. Во-первых, при этом снижается количество сварных швов; во-вторых, обводы, выемы и контурные пе-

реходы к установочным плоскостям получаются закрытыми, плавными и гладкими.

В зависимости от характера связей и необходимой жесткости в конструкции на кромках листа могут быть образованы профили открытого или закрытого типа.

Профилирование плоскости щитков, крышек или кожухов нанесением рельефа по заданному рисунку увеличивает жесткость еще и нагортовкой металла. Такие рельефы могут быть выполнены также непосредственно на днищах или стенках приборных контейнеров.

10.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Требования к свариваемым деталям. При конструировании элементов сварных конструкций из тонколистового проката, деталей и узлов, соединяемых сваркой, необходимо:

а) обеспечивать возможность наиболее легкого выполнения выбранного вида сварки (газовой, роликовой, точечной);

б) учитывать технологические возможности сварочного оборудования, имеющихся приспособлений и инструмента (сварочных машин, зажимных сборочных инструментов, ступеней и пр.);

в) выбирать наиболее рациональный тип соединений, отвечающий принятому способу сварки (встык, внахлестку или с отбортовкой);

г) определять характер и распределение усилий в соединениях;

д) учитывать технологические свойства выбранного материала (сталь, алюминиевые, магниевые, титановые сплавы и т. д.) и особенности их сварки.

Технологичность конструкции узлов сварных соединений определяется в первую очередь наличием свободного доступа к деталям при сварке и возможностью широко использовать нормальные электроды и автоматическое сварочное оборудование.

Сваркой между собой простых профилей могут быть образованы более сложные профили открытого и замкнутого типов с увеличенной жесткостью. Такие профили наиболее часто используют в сложных и значительно нагруженных несущих конструкциях.

Профилированные балки усиленного типа применяют при образовании конструкции каркасов, ферм и оснований для аппаратуры, работающей в жестких механических условиях.

При проектировании объемных конструкций (стойки, шкафы, ящики) стараются внутренние сварные швы располагать в проемах не глубже 500 мм. Корпуса больших размеров и значительной массы обычно делят на ряд узлов, которые можно сваривать контактным методом электродами нормальных размеров.

Типы соединений, выполняемых точечной и роликовой сваркой, и размеры соединяемых элементов приведены в табл. 10.4. При выборе разновидности сварки необходимо учитывать, что если точечная сварка обеспечивает только прочность соединения, то роликовая сварка придает шву дополнительную плотность.

Таблица 10.4. Типы и размеры соединений, свариваемых внахлестку

Вид соединения	
в разрезе	в плане
	<p>Для точечной сварки</p> <p>Для роликовой сварки</p>
	<p>$a \geq 10 \quad \frac{b}{a} \leq 2$</p> <p>$b \geq 30 \quad \frac{b}{a} \leq 2$</p> <p>$a \geq 12 \quad \frac{b}{a} \leq 1$</p> <p>$a \geq 12 \quad \frac{b}{a} \geq 1$</p>

Минимальные размеры, мм

S	Сталь					Алюминиевые сплавы				
	d	t	a	u	e	d	t	a	u	e
0,5	3,5	10	8	4,0	3,0	2,5	12	10	5,0	2,5
0,8	4,5	13	8	4,5	3,8	3,0	15	11	5,5	3,0
1,0	5,0	15	10	5,0	4,0	3,8	18	12	6,0	3,6
1,2	5,5	17	11	5,5	4,2	4,2	20	13	6,5	4,0
1,5	6,0	20	12	6,0	5,0	5,0	24	14	7,0	4,8
2,0	7,0	25	14	7,0	5,5	5,5	30	15	8,0	5,2
2,5	7,5	28	16	8,0	5,8	6,0	36	17	9,0	5,6

Каркасные конструкции. Жесткость каркаса, изготовленного из профилированных балок, зависит от жесткости его деталей и угловых связей. Определенную дополнительную жесткость каркасу придает и обшивка его стенками из тонколистового проката.

В приборных корпусах каркасной конструкции особое внимание уделяют образованию жестких угловых соединений. На рис. 10.5 показаны варианты конструкций сварных и соединяемых винтами угловых связей, применяемых для образования каркасов

стоек, различных по технологии изготовления: сварка углов из равностороннего уголкового железа (а); сварка из профилированных балок открытого профиля (б); сборка из балок прессованных профилей (в); сварка углов из профилированных балок замкнутого типа (г); сборка на винтах комбинированных деталей, литых полусферы и отдельных стоек (д); соединение углов из прессованных фасонных балок с пазами (е).

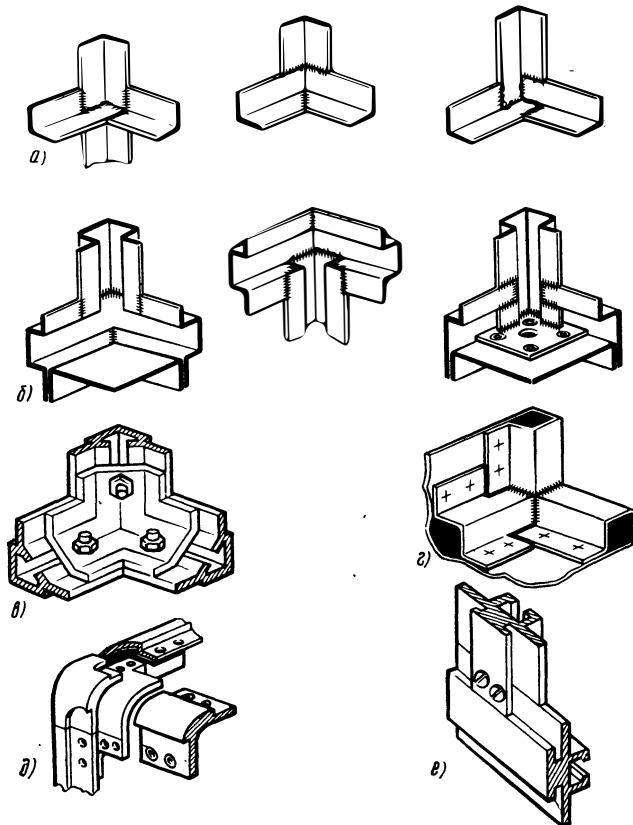


Рис. 10.5 Образование угловых соединений в каркасных конструкциях

Замкнутые профили имеют сравнительно высокую жесткость, однако использование в каркасах открытых профилей упрощает их конструкцию, делает легко осуществимой сварку, образование креплений блоков, установку направляющих, укладку монтажных жгутов и т. д.

10.6. КОНСТРУИРОВАНИЕ ШАССИ БЛОКОВ И СУББЛОКОВ

Шасси блоков и субблоков — основные узлы несущей конструкции РЭА. Форма и размеры их определяются элементной базой, сложностью схемы, ремонтпригодностью и требованиями

унификации. При наличии у шасси лицевых панелей размеры их по высоте будут зависеть от габаритных размеров устанавливаемых элементов, количества органов управления и приборов индикации или от размеров электронно-лучевых трубок. Как правило, форму и размеры шасси выбирают в соответствии с рядом унифицированных типоразмеров, вытекающих из принятого при разработке аппаратуры определенного конструктивного модуля или установленного стандарта.

Размерная система, установленная стандартами, не предопределяет конструкцию. Она предусматривает унификацию основных узлов несущей конструкции по принципу входимости узла низшего структурного уровня в высший. За основу размерной системы типовых несущих конструкций — частичных блоков (субблоков), комплектных блоков (блоков), каркасов блоков, настольных и настенных приборных корпусов, стационарных и передвижных приборных стоек — принят модуль размером 20 мм.

На базе развития модульной техники, дальнейшего ограничения типоразмеров базовых конструктивных элементов и широкого внедрения прогрессивных технологических процессов стало возможным создание единого комплекса унифицированных типовых конструкций (УТК).

Главным элементом УТК первого структурного уровня РЭА являются печатные платы. Размеры их определяются ГОСТ 10317-79. Например, для частичных блоков в кассетном исполнении принят размер плат 140×150 , «для книжной» компоновки 160×220 , для комплектных блоков 160×280 мм.

Основные размеры частичных блоков, комплектных блоков и блочных каркасов, вставляемых в приборные стойки устанавливает ГОСТ 12863-67. Для частичных блоков, вставляемых в блочные каркасы, установлены размеры: по высоте H — 140, 180 и 220, по ширине L — 40, 80, 160, 320, по глубине — B — 175 и 395 мм. Этим же стандартом оговорены и габаритные размеры блочных каркасов и шасси блоков, вставляемых в приборные стойки: ширина 480, высота 120, 160, 200, 240, 320 и 400, глубина 300 и 420 мм, и лицевых панелей блоков, устанавливаемых в стойки, ширина 520, а размеры их крепления 500 мм.

Шасси, используемые в РЭА, по конструкции и способам защиты от воздействий внешней среды весьма разнообразны. Они охватывают широкий диапазон: от простейшей конструктивной формы — плоской платы или рамки до сложной специальной формы в виде многоярусной конструкции, состоящей из откидывающихся или раскрывающихся панелей.

Все шасси РЭА можно разделить на группы, рассматривая каждую из них в зависимости от исполнения по следующим основным признакам:

1) по конструктивной форме — плоские шасси-платы, шасси коробчатого типа, шасси-рамы, шасси-каркасы из уголкового проката, многоярусные шасси, шасси специальной формы, обеспечи-

вающие сборку блоков в контейнерах с формой цилиндра, усеченного конуса или шара;

2) по способу конструктивного обеспечения доступа к сменным узлам — съемные с прибора, выдвигаемые и в выдвинутом положении откидываемые в сторону или разворачиваемые вниз, выдвигаемые по частям или разворачиваемые, как книжные листы;

3) по технологическому принципу изготовления — литые из алюминиевых сплавов, сварные из тонколистового проката, опресованные из пластмассы, собираемые из специальных литых профилей из алюминиевого сплава.

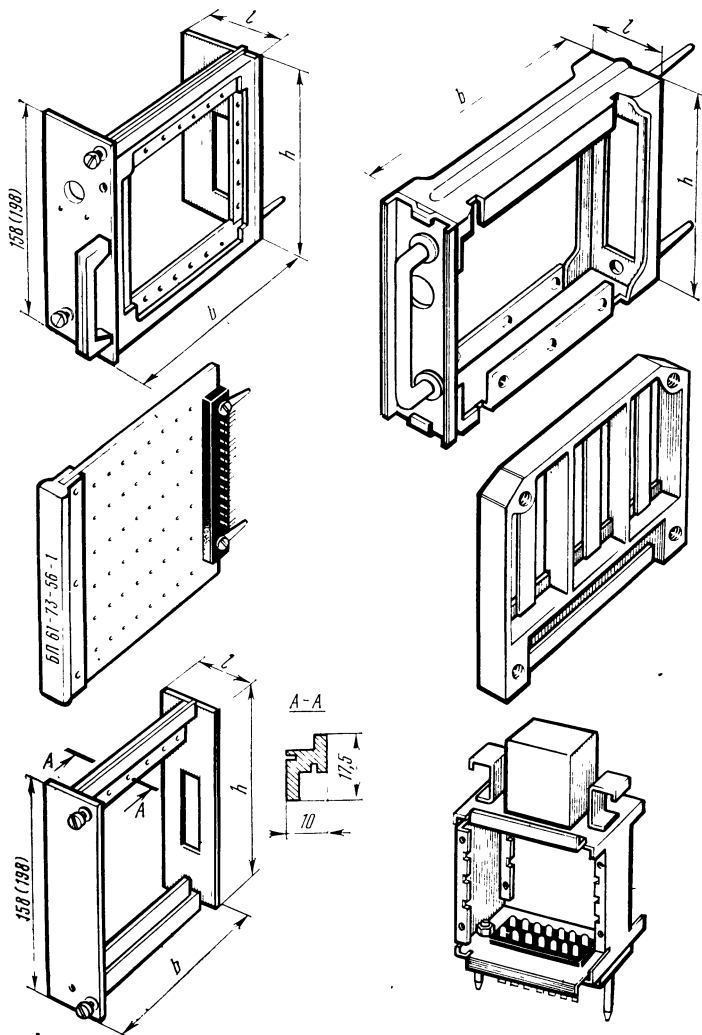


Рис. 10.6. Типовые несущие конструкции первого структурного уровня — шасси ячеек, модулей и субблоков

Примеры исполнения типовых шасси субблоков и модулей в виде ячеек, различных по конструктивной форме и технологическому изготовлению, показаны на рис. 10.6.

Конструкцией шасси предусматриваются: элементы крепления блока, соединение блока с межблочным электромонтажом, возможность надежного крепления элементов схемы, субблоков и модульных ячеек, требования экранирования, вентиляции, технологические установочные базы и отверстия и т. д.

Литые шасси блоков, каркасов, кронштейнов и других деталей несущей конструкции сложной формы выполняют преимущественно из кремний-алюминиевых или магний-алюминиевых сплавов. При этом в качестве основных технологических процессов используют литье под давлением или метод экструзии.

Наиболее распространен способ изготовления шасси блоков из тонколистового проката стали или алюминиевых сплавов. При этом используется метод вырубки, штамповки и гибки материала с последующей сваркой. Эти методы применимы как в массовом производстве с совершенным оборудованием, так и в мелкосерийном производстве с универсальными оборудованием и приспособлениями.

Изготовление шасси и каркасов небольших размеров рационально выполнять из пластических масс методом опрессовки. Достоинство пластмассовых шасси заключается в электроизоляционных свойствах материала, что значительно упрощает способы установки электрорадиоэлементов, а также в их малой стоимости при изготовлении в больших количествах.

Шасси блоков кассетного типа выполняют в виде рамы (см. рис. 10.6). Рамы имеют унифицированные типоразмеры. У каждого типоразмера высота и глубина одинаковые, а ширина соответствует ряду, принятому при разработке модульной системы изделия.

Задняя стенка рамы служит основанием для установки электрических соединителей и направляющих штырей, фиксирующих кассету в корпусе прибора. Верхняя и нижняя стенки имеют направляющие полозы. Передняя стенка используется для установки сигнальных фонарей, контрольных гнезд, элементов регулировки и ручки захвата при вытаскивании кассеты из прибора.

В кассету могут быть вмонтированы от одной до четырех плат с печатным монтажом. Кассета на одну печатную плату может быть выполнена и без металлической рамы; при этом толщину изоляционной платы печатного монтажа берут от 2 до 4 мм.

Разнообразие функциональных схем блоков создало предпосылки к унификации шасси. Наиболее полно унифицированы шасси коробчатого типа. Примеры конструктивного исполнения таких шасси приведены на рис. 10.7.

Имеются и такие конструкции, в которых шасси выполняется без основной плоскости. Последнюю изготавливают по специальным чертежам, монтируют в узел и устанавливают на универсальное шасси.

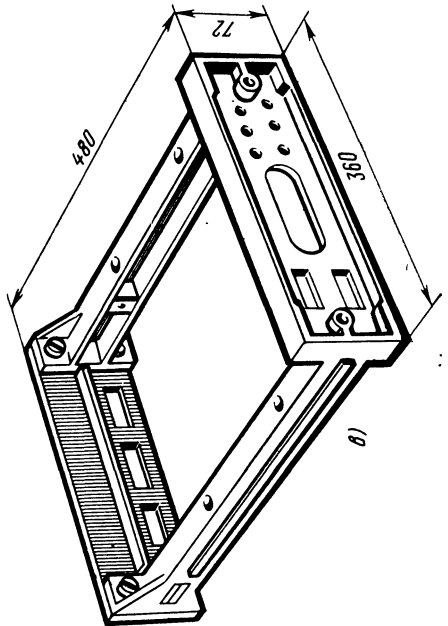
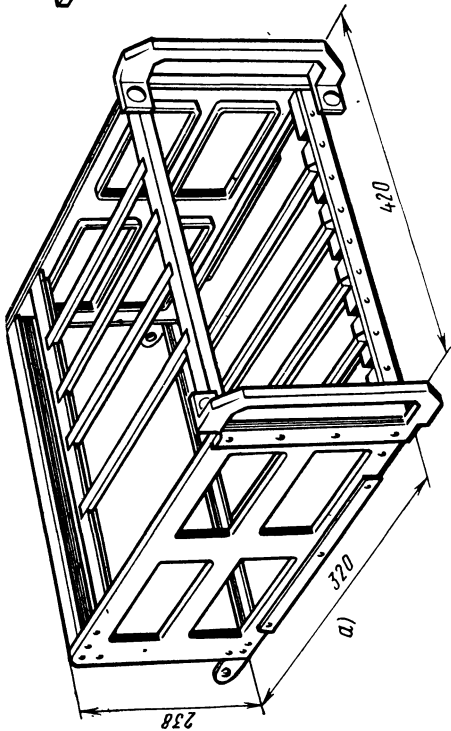
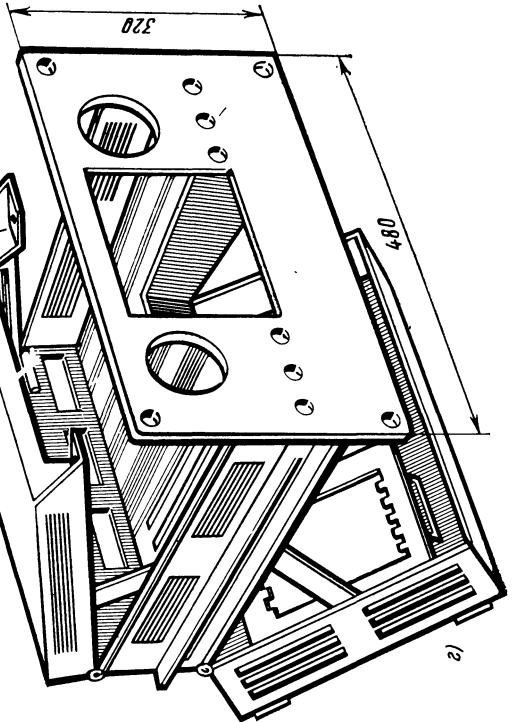
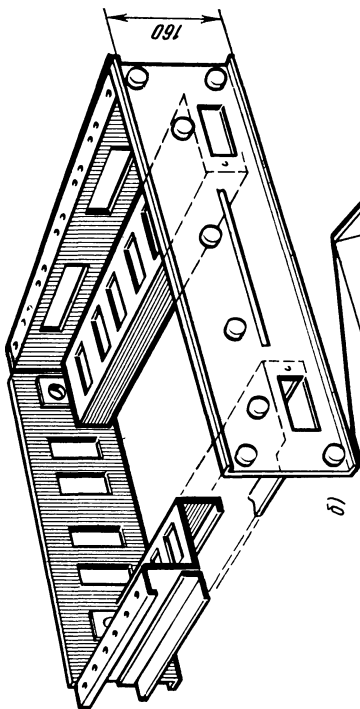




Рис. 10.7. Типовые несущие конструкции второго структурного уровня
а — шасси для блоков каркасного типа; б — шасси для узлов объемного исполнения; в — рамочного типа многоярусное; г — для электронно-лучевых индикаторов

Большое распространение получила конструкция шасси, предназначенная для сборки блоков из унифицированных субблоков, с использованием электрических соединителей (рис. 10.7, а, б).

10.7. ПРИБОРНЫЕ КОРПУСА

Факторы, определяющие конструкцию. Приборный корпус — четвертый конструктивный уровень, который несет в себе РЭА и одновременно служит оболочкой, обеспечивающей безопасность обслуживания, защиту от механических повреждений и воздействий внешней среды.

Корпуса делятся между собой:

по конструктивным признакам — каркасы, кожухи, стойки, шкафы и контейнеры;

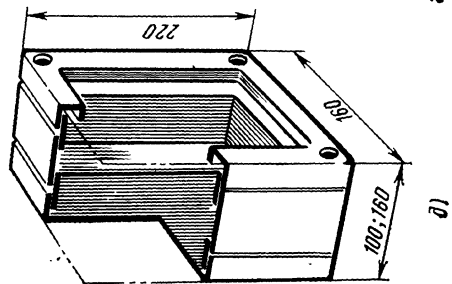
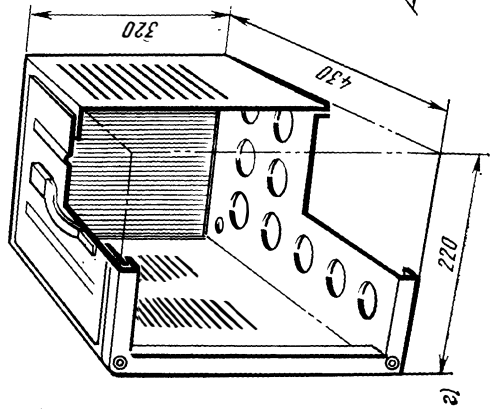
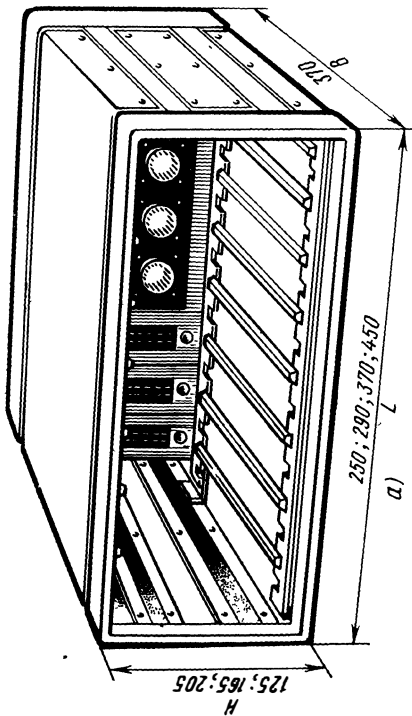
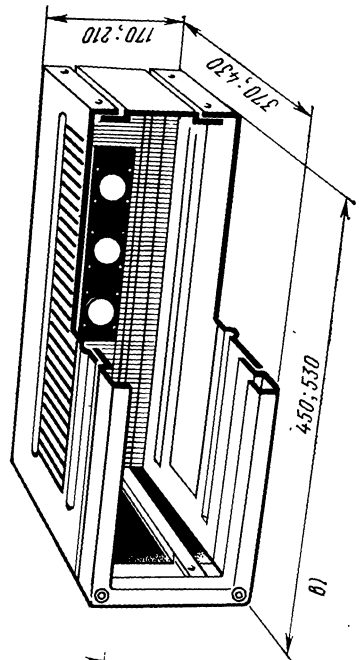
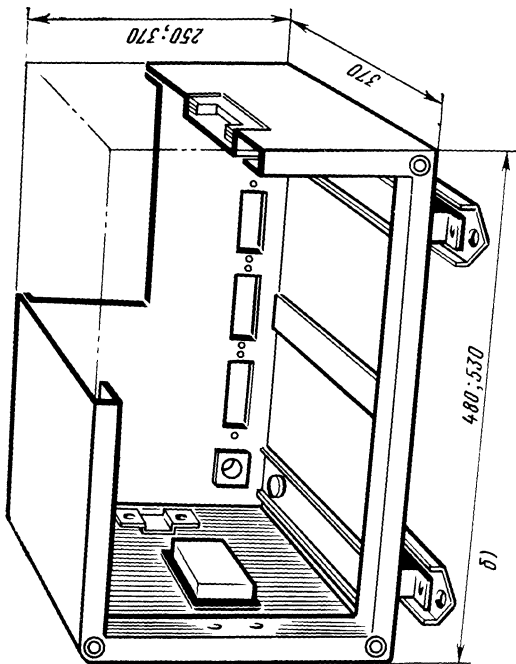
по характеру использования — навесные (навешиваемые на стену), стационарные (устанавливаемые на пол), настольные (устанавливаемые на стол) и носимые оператором во время работы;

по технологическому признаку — литые, каркасные и бескаркасные, изготавливаемые из тонколистового проката.

Приборные корпуса, литые из алюминиевых или магниевых сплавов, используют для приборов относительно небольших габаритных размеров крупносерийного и массового производства. Корпуса каркасной конструкции собирают на базе единого для всех типов каркаса из литых профилированных деталей, стандартных уголков или профиля,гнутого из тонколистового проката алюминиевых сплавов. В проемы каркаса вставляют профилированные боковые стенки, заднюю и переднюю дверцы, днище и крышку или каркас обшивают листовым материалом. Корпуса бескаркасной конструкции изготавливают из листовой стали или тонколистового проката алюминиевых сплавов. Детали корпуса профилируют, придавая им форму, обеспечивающую листовому материалу жесткость и возможность простой сварки и надежной герметизации.

Корпуса, изготавливаемые из тонколистового проката, по своей структуре более устойчивы к воздействию ударных нагрузок. Каркас и стенки из тонколистового проката при сильных ударах не разрушаются и лишь деформируются, между тем тонкие и малоупругие стенки литых корпусов разрушаются при ударах сравнительно небольшой силы, не предупреждая нас своей деформацией о критическом состоянии.

Унифицированные приборные корпуса имеют максимальную применяемость во вновь разрабатываемых изделиях; при этом конструкция их может служить базой, на основе которой с минималь-



ными изменениями могут быть собраны разнообразные приборы с блоками на унифицированных шасси. Такие корпуса допускают возможность использования принятых в РЭА способов охлаждения и изоляции от вибрации и ударов. Отдельные корпуса могут быть собраны в агрегатированные устройства и легко разобраны для транспортировки. Конструкция корпусов должна предусматривать максимальное использование внутреннего объема аппаратуры и площади аппаратного помещения, имея достаточную нагрузочную способность, минимальные массу и объем. Создание универсальной типовой конструкции с минимальной избыточностью параметров экономически оправдывается снижением общих расходов, затрачиваемых на разработку, изготовление и обслуживание РЭА.

Корпуса одноблочных и малых приборов. Из большого разнообразия корпусов одноблочных и малых приборов, широко используемых в современной РЭА, имеются наиболее характерные типовые конструкции, представленные на рис. 10.8.

Унифицированный корпус для субблоков кассетного типа (рис. 10.8, а) состоит из каркаса, образованного двумя литыми из алюминиевого сплава рамками, соединенными между собой продольными профилированными планками. Верх и низ каркаса закрыты перфорированными крышками и дном из тонколистового алюминиевого сплава. Внутри корпуса размещены направляющие ползцы и электрические соединители для установки и подключения к блочному электромонтажу кассет.

Унифицированный приборный корпус для блоков рамочного типа с лицевыми панелями (рис. 10.8, б) представляет собой бескаркасную конструкцию из тонколистового проката толщиной 1,8—2,0 мм. Крепление блока типовое, на телескопических направляющих. Корпус может быть прикреплен на амортизаторах как к горизонтальной так и к вертикальной плоскости. Типовая конструкция корпуса, используемого широко в модулированной группе РЭА, показана на рис. 10.8, в, г. Малые корпуса для релейных, коммутационных и кабельных коробок (рис. 10.8, д) изготавливаются из трех деталей: штампованного дна, рамки и обечайки, свариваемых между собой герметичным швом.

Корпуса многоблочных приборов. Конструктивные схемы универсальных, широко используемых в РЭА приборных стоек каркасного и бескаркасного типов показаны на рис. 10.9. Здесь представлены четыре основных типа корпусов.

Первый тип стойки каркасной конструкции, изготавливаемый из тонколистового проката стали толщиной 1,5—1,8 мм или алюминиевого сплава толщиной 2,0—2,5 мм (рис. 10.9, а), состоит из каркаса сварного типа, изготавливаемого из профилированных балок. Боковые проемы каркаса закрывают однотипными крышками

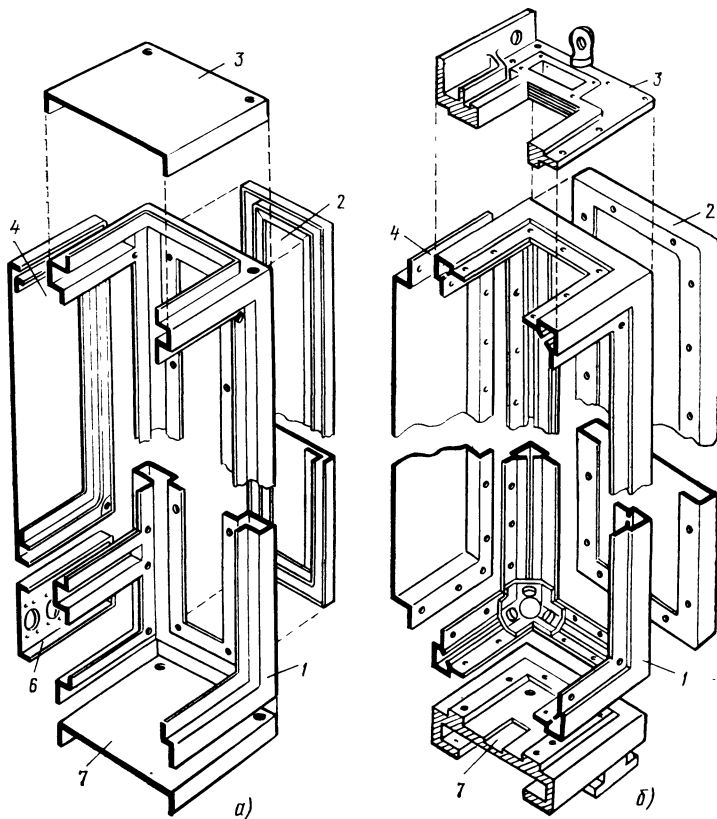


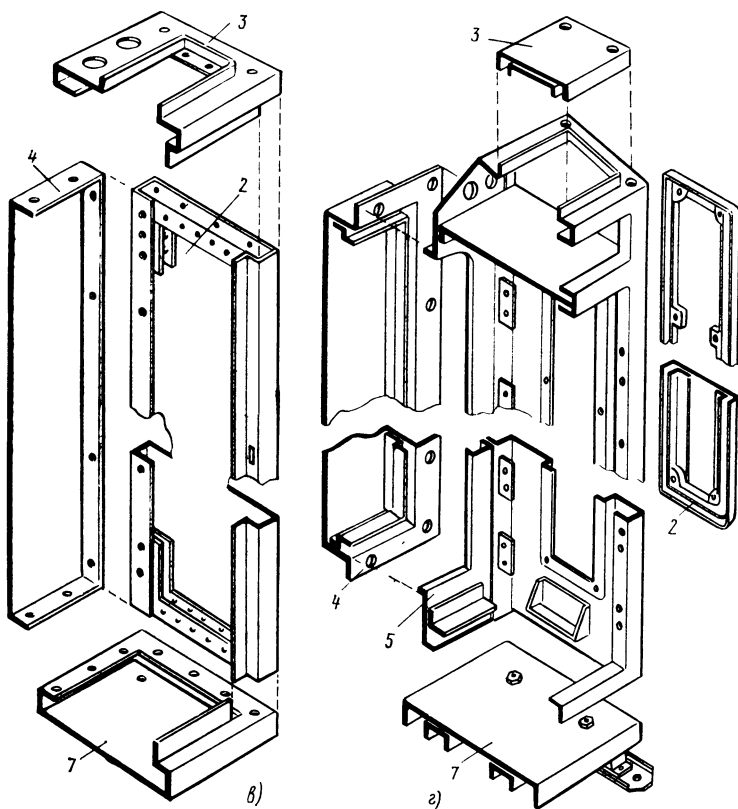
Рис. 10.9. Конструктивные схемы
 а — стойка каркасного типа из тонколистового проката; б — каркасная стойка из прессован
 1 — каркас; 2 — боковая стойка; 3 — крышка; 4 — задняя

с резиновыми уплотнениями по всему периметру. Сверху приваривается крышка, снизу — днище. При размещении в корпусе блоков с лицевыми панелями в передний проем каркаса ввариваются перемычки П-образного профиля. Боковые и заднюю крышки крепят винтами.

При обеспечении естественной вентиляции в боковых крышках делают вентиляционные отверстия. В случае принудительной вентиляции вместо обычных боковых крышек устанавливают глубокие крышки с боковыми воздухопроводами и патрубками для присоединения стойки к вентиляционной магистрали.

Каркас этой стойки служит базой для сборки приборных корпусов различных назначений, например приборных шкафов, контейнеров, пультов.

Второй тип стойки (рис. 10.9, б) в отличие от рассмотренного варианта выполнен из литых деталей, а при сборке каркаса и самой стойки используют винтовые соединения. Боковые и задние



типовых приборных стоек

ных профилей; *в* — бескаркасная стойка; *г* — стойка с усиленным профилем бескаркасная стенка; *б* — корпус; *б* — нижняя дверца; *7* — днище

стенки стойки делают из тонколистового алюминиевого сплава. Каркас этой стойки может быть использован для сборки шкафа, пульта и устройств магнитной и графической регистрации.

Третий тип корпуса отличается от предыдущих бескаркасной конструкцией (рис. 10.9, *в*). Он состоит из двух боковых и одной задней стенок, днища и верхней крышки, выполненных из тонколистового проката стали толщиной 1,5—2,0 мм. Сборка корпуса производится винтовыми соединениями с помощью четырех стяжек П-образного профиля. Стяжки перфорированы отверстиями диаметром 9 мм с шагом 20 мм и используются для крепления опорных деталей блоков. При установке в передний проем дверцы стойка превращается в шкаф. Размеры стойки соответствуют ГОСТ 3244-68.

Четвертый тип корпуса стойки (рис. 10.9, *г*) в отличие от предыдущего имеет сварную конструкцию и предназначен для жестких условий эксплуатации во влажной и брызгонесущей среде. Де-

тали корпуса изготовлены из тонколистового проката алюминиевого сплава толщиной 2,0—2,5 мм. Заднюю стенку корпуса при необходимости делают съемной и крепят винтами, прижимая брызгозащитное уплотнение.

Конструкцию многоблочных приборных корпусов, изготавливаемых из тонколистового проката, полнее представляет сечение в плане, приведенное на рис. 10.10 для каркасного и бескаркасного вариантов. Из проекций для каждого варианта видны сечения стенок корпуса, профиль жесткости и основные размеры в плане. Корпус стойки каркасного типа (рис. 10.10, а) был рассмотрен в виде схемы на рис. 10.9, а. Корпус бескаркасной конструкции (рис. 10.10, б) имеет водозащищенное исполнение. Форма профиля боковых стенок двухслойная. Этим обеспечивается достаточная жесткость, одновременно в боковых стенках образуются вертикальные полости — воздухопроводы приточно-вытяжной вентиляции с распределением воздушного потока по блокам.

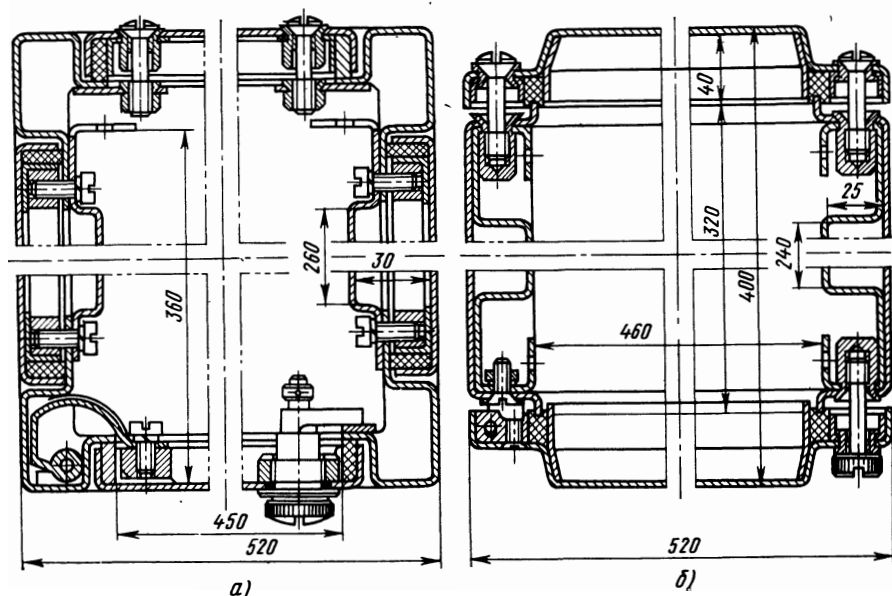


Рис. 10.10. Конструкция приборных стоек (сечение в плане)

а — брызгозащитного исполнения, собранная на базовом каркасе; б — бескаркасная водозащищенного исполнения

Для стационарной РЭА ГОСТ 17600-72 устанавливает следующие габаритные размеры приборных корпусов:

по высоте H — 640, 800, 880, 1000, 1200, 1280, 1360, 1600 и 1840 мм;

по ширине L — 280, 320, 440, 520 и 600 мм;

по глубине B — 320, 440, 520 и 600 мм.

Корпуса пультов РЭС. Как известно из § 3.3 и 4.5, формы и размеры пультов РЭС, а также и их корпусов могут быть весьма разнообразными. Однако во всех случаях их высота, ширина и глубина горизонтальной или несколько наклонной рабочей части плоскости должны отвечать требованиям создания для оператора нормальной рабочей зоны. В результате проводимых работ по созданию типовых конструкций имеется несколько вариантов корпусов пультов.

Корпуса пультов высокого типа унифицированы с корпусами приборных стоек высотой 1360 и 1600 мм. При использовании такого корпуса для пульта снаружи к нижней части ее крепят на-

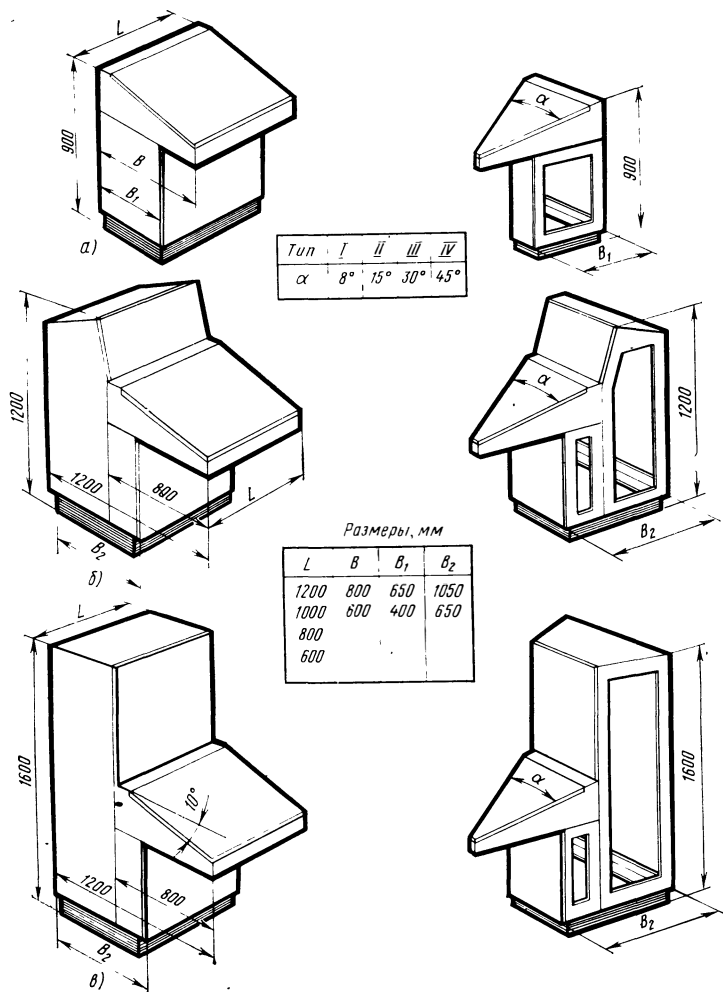


Рис. 10.11. Стандартные секции и угловые вставки для пультов
 а — низкого типа; б — среднего типа; в — высокого типа

клонную или горизонтальную панель консольного типа. Доступ к блокам, размещенным в нижней части стойки пульта, осуществляется при откинутом консольном блоке с горизонтальной рабочей плоскостью.

В системах автоматизации широко распространены корпуса пультов унифицированного типа, которые централизованно изготавливают предприятия средств автоматизации по ГОСТ 3244-68. Конструкция и размеры их приведены на рис. 10.11. Такие корпуса предназначены для пультов, устанавливаемых в стационарных помещениях, отопливаемых, вентилируемых и не подверженных вибрации и ударам. Однако они могут быть использованы и в условиях более жесткой эксплуатации с доработкой элементов крепления, герметизацией ввода кабеля или защищенности от воздействий окружающей среды. Как видно из рисунка, корпуса секций пультов собирают из унифицированных деталей. Крышки консоль-

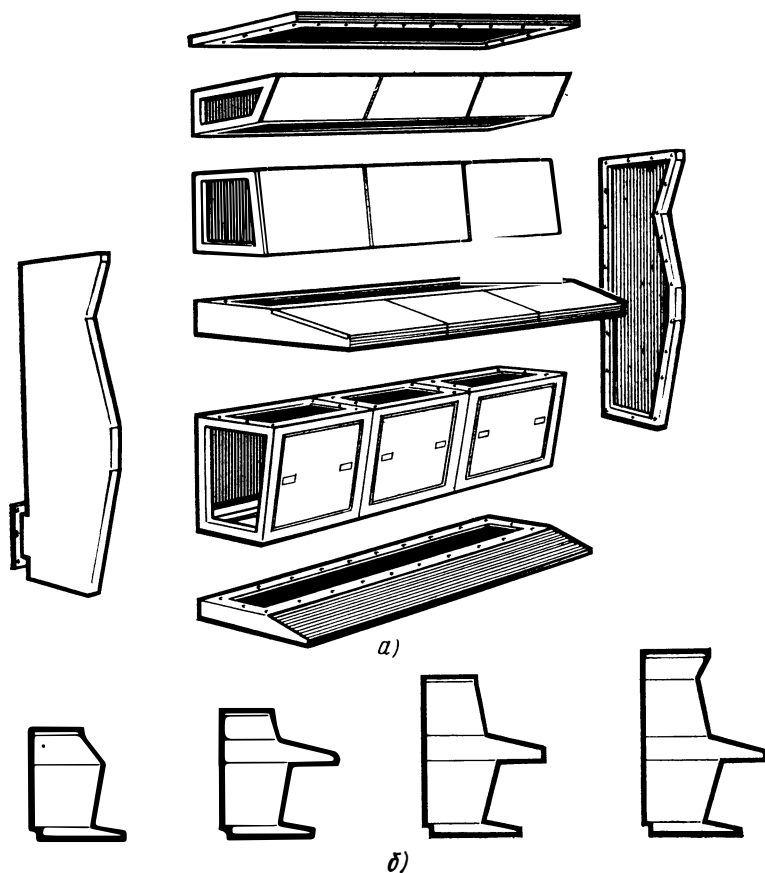


Рис. 10.12. Конструктивная схема корпуса пульта с горизонтальными секциями (а) и возможные варианты его сборки (б)

ных столов откидываются вверх, передние и задние стенки съемные. Для сборки многосекционных пультов полукруглой формы (в плане) используют угловые вставки. Профиль вставок соответствует профилю каждого типа прямой секции с учетом соединения их под углами 45°, 30°, 15° и 8°.

И, наконец, конструктивная схема универсального типового корпуса пульта показана на рис. 10.12. Внизу приведены возможные варианты сборки унифицированной конструкции для пультов различных назначений на базе секций, используемых для основного варианта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. В., Арефьев В. А. Тепловые трубы для охлаждения и термостабилизации радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1979.
2. Аренков А. Б. Печатные и пленочные элементы радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1971.
3. Артюшенко В. И. Пособие монтажнику радиоаппаратуры. — Киев: Техника, 1968.
4. Астафьев А. В. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. — М.: Энергия, 1965.
5. Барканов Н. А., Попов В. Н. Микромодули. — М.: Сов. радио, 1971.
6. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъёмные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Энергия, 1967.
7. Вайц Д. М., Георгианов К. В., Якобсон В. В. Монтаж судовой радиотехнической аппаратуры. — Л.: Судостроение, 1964.
8. Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1975.
9. Волк М., Лефори Ж., Стетсон Р. Герметизация электротехнической и радиотехнической аппаратуры. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1966.
10. Володин Ю. Г., Малюков Г. В. Конструирование систем терморегулирования подвижных радиоэлектронных комплексов. — М.: Сов. радио, 1977.
11. Вудсон У., Кроновер Д. Справочник по инженерной психологии для художников-конструкторов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1966.
12. Гель П. П., Иванов-Есипович Н. К. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1972.
13. Демен В. В., Гореликов Н. И., Горта З. Ю. Пленочные микросхемы и миниатюризация. — Львов: Каменяр, 1972.
14. Долкрат В. М., Новик Г. Х. Конструирование и электрические характеристики многослойных печатных плат. — М.: Сов. радио, 1974.
15. Дружинин Г. В. Надежность устройств автоматики. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1964.
16. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронной аппаратуре. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1968.
17. Епашников М. М. Электрическое освещение. — Л.: Госэнергоиздат, 1962.
18. Зиземский Е. И. Надежность радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Судостроение, 1967.
19. Ильинский В. С. Защита аппаратуры от динамических воздействий. — М.: Энергия, 1970.
20. Калинушкин М. П. Вентиляторные установки. — М.: Высшая школа, 1962.
21. Карпушин В. Б. Вибрация и удары в радиоаппаратуре. — М.: Сов. радио, 1971.
22. Кондрашин Н. М. Переходные контакты в устройствах заземления и экранирования РЭА. — М.: Сов. радио, 1973.
23. Конструирование микроэлектронной аппаратуры/Под ред. Б. Ф. Высоцкого — М.: Сов. радио, 1975.

24. **Лиховецкий Б. П.** Плоские модули. — М.: Сов. радио, 1972.
25. **Ломов Б. Ф.** Человек и техника. — М.: Сов. радио, 1966.
26. **Мелехов А. Н., Берштейн Л. С., Курейчик В. М.** Применение графов для проектирования дискретных устройств. — М.: Наука, 1974.
27. **Методы разбienia схем РЭА на конструктивные части/Под ред. К. К. Морозова.** — М.: Сов. радио, 1978.
28. **Морозов К. К., Одинцев В. Т.** Использование ЭЦВМ при конструировании некоторых узлов РЭА. — М.: Сов. радио, 1972.
29. **Номенклатура изделий заводов Главмонтажавтоматики.** — М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя, 1973.
30. **Орлов П. И.** Основы конструирования. — М.: Машиностроение, 1968.
31. **Основы инженерной психологии/Под ред. Б. Ф. Ломова.** — М.: Высшая школа, 1977.
32. **Пестряков В. Б.** Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1969.
33. **Полонский Н. Б.** Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. — М.: Сов. радио, 1979.
34. **Поляков К. П.** Приборные корпуса радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Госэнергоиздат, 1963.
35. **Ремонтопригодность радиоэлектронной аппаратуры:** Пер. с англ./Под ред. О. Ф. Пославского. — М.: Сов. радио, 1964.
36. **Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е.** Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1976.
37. **Сидоров О. А.** Физиологические факторы человека, определяющие компоновку поста управления машиной. — М.: Оборонгиз, 1962.
38. **Фролих Я.** Непаые соединения в электронике: Пер. с венгерск. — М.: Энергия, 1978.
39. **Фролов А. Д.** Соединения в конструкциях радиотехнических изделий. — М.: Энергия, 1966.
40. **Фролов А. Д.** Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Высшая школа, 1970.
41. **Харинский А. Л.** Основы конструирования элементов радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1971.
42. **Шрайбер Л. Я., Макушев Э. И.** Печатные схемы в радиотехнике. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава первая. Общие вопросы конструирования радиоэлектронной аппаратуры	4
1.1. Классификация радиоэлектронной аппаратуры по функциональному назначению и условиям эксплуатации	4
1.2. Проблемы конструирования современной радиоэлектронной аппаратуры	6
1.3. Общие технические требования, учитываемые при разработке радиоэлектронной аппаратуры	10
1.4. Особенности конструирования радиоэлектронной аппаратуры и объем работ конструктора	13
1.5. Методы стандартизации конструкции радиоэлектронной аппаратуры	15
1.6. Технологичность конструкции	18
1.7. Долговечность аппаратуры	20
Глава вторая. Принципы конструирования	22
2.1. Методы конструирования	22
2.2. Автоматизация некоторых процессов конструирования радиоэлектронной аппаратуры	24
2.3. Поиск оптимальной топологии элементов радиоэлектронной аппаратуры	29
2.4. Разработка электромонтажных трасс с помощью ЭВМ	35
Глава третья. Психофизиологические и эстетические основы конструирования приборов и устройств	38
3.1. Инженерная психология в системе управления	38
3.2. Физиологические и анатомические факторы, определяющие конструкцию приборов	40
3.3. Функции органов чувств и рабочие зоны оператора	42
3.4. Техническая эстетика в приборостроении	46
3.5. Роль цвета в образовании приборов	49
3.6. Осветительные и светосигнальные устройства	51
3.7. Конструирование элементов отчетных и индикаторных устройств	58
3.8. Органы ручного управления	61
3.9. Компоновка панелей управления	64
Глава четвертая. Принцип компоновки и типовые конструкции радиоэлектронной аппаратуры	66
4.1. Основные задачи компоновки при разработке радиоэлектронной аппаратуры	66
4.2. Влияние развития радиоэлектронной техники на совершенствование компоновки радиоэлектронной аппаратуры	68
4.3. Принцип деления радиоэлектронной аппаратуры на конструктивные составляющие	70
4.4. Компоновка и характер конструкции приборов	75
4.5. Компоновка приборов информации и управления	82
4.6. Блоки и узлы на электронных лампах	84
4.7. Блоки и узлы на полупроводниковых приборах	86
4.8. Блоки и узлы в микромодульном исполнении	88
4.9. Элементная база микроразнообразной аппаратуры	90
4.10. Узлы и блоки микроразнообразной аппаратуры	94
Глава пятая. Электрический монтаж и элементы монтажных соединений	100
5.1. Конструкция электрического монтажа	100
5.2. Основные виды помех и способы их устранения	102
5.3. Электромонтажные кабели и провода	107
5.4. Разделка, прокладка и крепление монтажного провода	108
5.5. Печатный электрический монтаж	113
5.6. Многослойные печатные платы	116
5.7. Элементы соединения проводов и жил кабеля	120
5.8. Присоединительный электромонтаж и кабельные вводы	123
Глава шестая. Обеспечение ремонтпригодности радиоэлектронной аппаратуры	125
6.1. Ремонтпригодность как свойство изделия	125
6.2. Совершенствование конструкции и ремонтпригодность	126
6.3. Качественные признаки ремонтпригодности	127
6.4. Критерии ремонтпригодности	128
6.5. Меры обеспечения ремонтпригодности	130
6.6. Системы встроенного контроля и отыскания неисправностей	133
6.7. Обеспечение ремонтпригодности при размещении аппаратуры на объекте	134
6.8. Комплектация систем радиоэлектронной аппаратуры запасными частями, инструментом и принадлежностями	139

Глава седьмая. Защита радиоэлектронной аппаратуры от воздействий окружающей среды	140
7.1. Влияние физических параметров окружающей среды	140
7.2. Воздействие на РЭА внешних механических факторов	143
7.3. Предельные нормы эксплуатации	145
7.4. Способы обеспечения влагоустойчивости аппаратуры	147
7.5. Обеспечение теплоустойчивости и холодоустойчивости аппаратуры	151
7.6. Меры, обеспечивающие работу аппаратуры при пониженном атмосферном давлении	152
7.7. Защита аппаратуры от пыли, брызг воды и внешнего гидростатического давления	153
Глава восьмая. Защита радиоэлектронной аппаратуры от воздействия динамических перегрузок	158
8.1. Способы изоляции радиоэлектронной аппаратуры от вибрации и ударов	158
8.2. Общий случай свободных колебаний упругой системы	162
8.3. Схемы рациональной подвески приборов на амортизаторах	164
8.4. Крепление на приборах амортизаторов и эластичных связей	165
8.5. Определение собственных частот реальных амортизированных систем	167
8.6. Изоляция аппаратуры от ударов	173
8.7. Основные параметры приборных амортизаторов	177
Глава девятая. Обеспечение тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры	183
9.1. Тепловые режимы и источники выделения тепла	183
9.2. Способы теплопередачи в аппаратуре	184
9.3. Способы охлаждения аппаратуры	190
9.4. Расчет теплового режима с естественным охлаждением	195
9.5. Расчет теплового режима с принудительным охлаждением	202
9.6. Системы охлаждения теплонагруженных элементов	206
Глава десятая. Конструирование деталей и узлов несущей конструкции	211
10.1. Особенности разработки элементов несущей конструкции	211
10.2. Жесткость элементов конструкции	212
10.3. Вибропрочность элементов конструкции	216
10.4. Конструирование деталей несущей конструкции	220
10.5. Проектирование сварных соединений	222
10.6. Конструирование шасси блоков и субблоков	224
10.7. Приборные корпуса	229
Список литературы	238

