

Е.М.Парфенов
Э.Н.Камышная
В.П.Усачов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
КОНСТРУКЦИЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ**

Учебное
пособие
для высших
учебных
заведений

ББК 32.844

П18

УДК 621.396.6.001.63(075)

Рецензенты: кафедра микроэлектроники Московского ин-та электронного машиностроения (д-р техн. наук проф. Е. Л. Глоризов); канд. техн. наук В. А. Ермаолаев

Редакция литературы по конструированию и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры

Парфенов Е. М. и др.

П18 Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ Е. М. Парфенов, Э. Н. Камышная, В. П. Усачов. — М.: Радио и связь, 1989. — 272 с.: ил.

ISBN 5-256-00288-0.

Рассматриваются вопросы проектирования различных конструкций радиоэлектронной аппаратуры. Приводятся методики конструкторских расчетов, учитывающие системный подход к ее проектированию, а также рабочие программы автоматизированного конструирования и справочные материалы. Сформулирована основная задача курсового проекта и разработаны методические указания по его выполнению для всех стадий проектирования.

Для студентов вузов радиотехнических специальностей; может быть полезна инженерам-конструкторам радиоэлектронной аппаратуры.

П 2304030000-101
046(01)-89 131-89

ББК 32.844

Учебное издание

*Парфенов Евгений Михайлович
Камышная Эмилия Николаевна
Усачов Валерий Петрович*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ

Учебное пособие

Заведующий редакцией П. И. Никонов. Редактор Н. К. Калинина. Переплет художника С. Ю. Архангельского. Художественный редактор А. С. Широков. Технический редактор Л. А. Горшкова. Корректор Т. С. Власкина

ИБ № 1414

Сдано в набор 14.12.88 Подписано в печать 28.03.89 Т-07780 Формат 60×88^{1/16}
Бумага тип. № 2 Гарнитура литературная Печать высокая Усл. печ. л. 16,66
Усл. кр.-отт. 16,66 Уч.-изд. л. 18,49 Тираж 10 000 экз. Изд. № 21605 Заказ № 6615 Цена 95 к.
Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли: 113054, Москва, Валовая, 28.

ISBN 5-256-00288-0

© Издательство «Радио и связь», 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

XXVII съезд КПСС поставил перед работниками высшей школы задачу дальнейшего повышения качества подготовки специалистов с максимальным приближением форм и методов обучения будущих инженерных кадров к нуждам народного хозяйства страны.

Опыт преподавания курса «Конструирование РЭА» показал, что наибольшие трудности у студентов связаны с практическим применением теоретических знаний, особенно при выполнении курсового проекта.

Имеющиеся учебники, учебные пособия и справочная литература по конструированию РЭА не учитывают системного подхода к проектированию конструкций радиоаппаратуры и, как следствие, не дают методических рекомендаций по их разработке. В этой литературе недостаточно рассмотрены вопросы предпроектных исследований различных конструкций и влияние их на эффективность создаваемой РЭА; отличительных особенностей конструирования РЭА различного назначения и функциональных признаков (аналоговой, цифровой, СВЧ, вторичных источников электропитания, электромеханической и т. д.); применения САПР, средств вычислительной техники и машинной графики в диалоговом режиме. Поэтому возникла необходимость создания учебного пособия по курсовому проектированию конструкций РЭА.

В настоящем учебном пособии, написанном исходя из основных положений и дополнений учебника «Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры» (авторы П. П. Гель и Н. К. Иванов-Есипович), содержатся методические указания студентам по организации и выполнению курсового проектирования с учетом стадий проектирования в соответствии с ЕСКД, приводятся справочные данные, расчетные формулы, алгоритмы и программы, а также конкретные примеры выполнения расчетов и чертежей на основе системного подхода и модульного принципа проектирования РЭА.

Учебное пособие создано коллективом авторов: предисловие, гл. 2 написал Е. М. Парфенов, гл. 1 — Е. М. Парфенов, Э. Н. Камышная, гл. 3, 4 — В. П. Усачов, Е. М. Парфенов, гл. 5 — Э. Н. Камышная, гл. 6 — В. П. Усачов.

Глава 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОВРЕМЕННОЙ РЭА

Производство РЭА в настоящее время развивается высокими темпами, находит все более широкое применение во многих областях народного хозяйства и в значительной мере определяет уровень научно-технического прогресса. Современная РЭА используется в радиолокации, радионавигации, системах связи, вычислительной технике, машиностроении, на транспорте, в физических, химических, медицинских и биологических исследованиях и т. д.

В связи с этим возникает потребность в расширении функциональных возможностей РЭА и серьезном улучшении таких технико-экономических показателей как надежность, стоимость, габариты, масса. Эти задачи могут быть решены только на основе рассмотрения целого комплекса вопросов системно- и схмотехники, конструирования и технологии, производства и эксплуатации. Именно на стадиях конструирования и производства РЭА реализуются системно- и схмотехнические идеи, создаются изделия, отвечающие современным требованиям.

Проектирование современной РЭА — сложный процесс, в котором взаимно увязаны принципы действия радиотехнических систем (РТС), схемы и конструкции аппаратуры и технология ее изготовления.

Требования, предъявляемые к РЭА, постоянно ужесточаются, а усложнение аппаратуры приводит к необходимости внедрения последних достижений науки и техники в разработку, конструирование и технологию РЭА. Радиоэлектроника немыслима сегодня без новой технической базы — микроэлектроники. Создание интегральных микросхем (ИС), больших интегральных схем (БИС), сверхбольших интегральных схем (СБИС), изделий функциональной микроэлектроники и многослойного монтажа позволило резко повысить надежность РЭА, уменьшить ее габариты, массу.

Основное требование при проектировании РЭА состоит в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога, т. е. превосходило его по качеству функционирования, степени миниатюризации и технико-экономической целесообразности (рис.

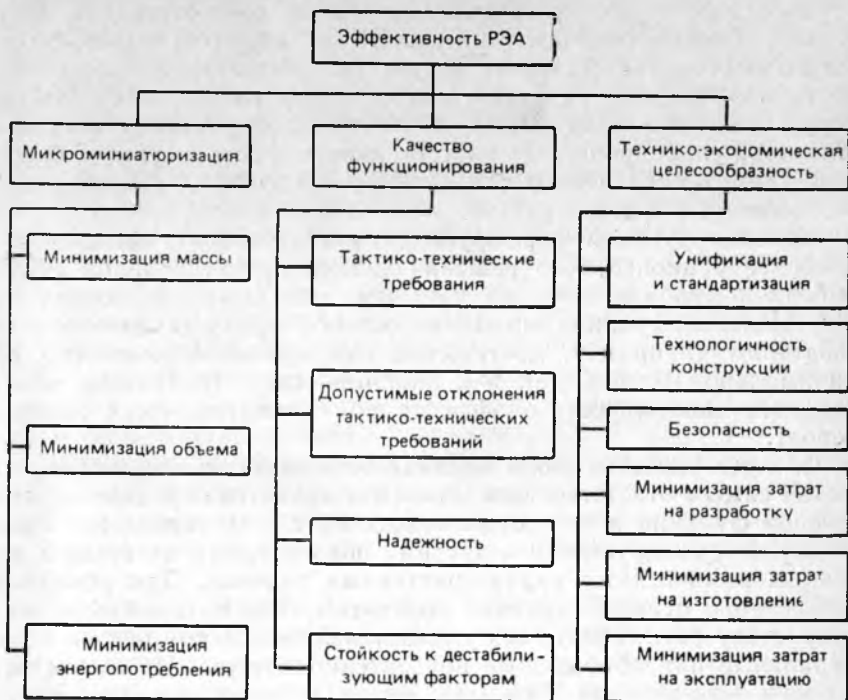


Рис. 1.1. Показатели эффективности РЭА

1.1). Современные методы конструирования должны обеспечивать: снижение стоимости, в том числе и энергоемкости; уменьшение объема и массы; расширение области использования микроэлектронной базы; увеличение степени интеграции, микроминиатюризацию межэлементных соединений и элементов несущих конструкций; магнитную совместимость и интенсификацию теплоотвода; взаимосвязь оператора и аппаратуры; широкое внедрение методов оптимального конструирования; высокую технологичность, однородность структуры; максимальное использование стандартизации [1, 12].

В общем виде эффективность РЭА можно оценить основной целевой функцией

$$E = f(z_1, z_2, \dots, z_n) = f(Z),$$

где $Z = \{z_i, i=1, 2, \dots, n\}$; $z_i \in Z$.

Такая функция дает количественную оценку степени достижения поставленной цели и поэтому называется целевой функцией. Элементами z_i множества Z являются частные *целевые функции*, т. е. отдельные качественные и количественные показатели, опре-

деляющие пригодность применения РЭА в соответствии с назначением. Такими показателями для РЭА являются: масса, объем, энергопотребление, диапазон частот, быстродействие, чувствительность, коэффициент усиления, полоса пропускания, дальность действия, выходное напряжение, точность, электромагнитная совместимость, ударопрочность, влагостойкость, уровень унификации и миниатюризации, технологичность, безопасность, себестоимость, экономичность и т. д.

Целевая функция формируется в интересах оптимизации, т. е. наиболее рационального решения задачи проектирования РЭА и выбора компромисса между частными целевыми функциями $z_i \in Z$. Целевая функция может относиться как к техническим показателям (например, достижение максимальной мощности при минимальной массе), так и к экономическим (получение максимального экономического эффекта при принятом числе типоразмеров).

Следует указать, что в задачах оптимизации показателей качества самым ответственным моментом является определение вида целевой функции и ее составляющих z_i , т. е. установление связи между оптимизируемыми и другими показателями качества и технико-экономическими характеристиками изделия. Для успешного определения целевой функции необходимо стремиться к минимальному числу оптимизируемых показателей, вводя комплексные, интегральные или обобщенные показатели качества. Из схемы разработки эффективной РЭА (см. рис. 1.1) видно, что конструкция РЭА влияет практически на все показатели и имеет решающее значение, поскольку она должна обеспечивать устойчивое функционирование РЭА с необходимой точностью, надежностью и безопасностью при наличии воздействий со стороны объекта, окружающей среды, человека-оператора, взаимодействия элементов РЭА через электромагнитное поле. От того, насколько совершенны конструкции и методы конструирования, во многом зависит прогресс в радиоэлектронике.

Все возрастающие требования к проектированию РЭА приводят к усложнению конструкций, повышению трудоемкости их проектирования и изготовления, увеличению себестоимости.

Сокращение сроков проектирования до определенных пределов при использовании традиционных ручных методов возможно за счет увеличения численности конструкторов и разработчиков. Однако при этом снижается удельная производительность труда из-за трудностей, возникающих при управлении, и ошибок, неизбежных при ручном проектировании (эти ошибки часто обнаруживаются уже в процессе производства, а даже небольшие коррективы в документации требуют разработки новых чертежей, объем которых сравним с основным объемом документации). Кроме того, число людей, занятых в сфере конструкторской деятельности, ограничено.

Ускорить и удешевить проектно-конструкторские работы можно как за счет обоснованного применения типовых базовых конструкций, так и путем разработки и внедрения прогрессивных методов конструирования на основе достижений вычислительной техники.

Стремление разработать эффективные методы конструирования РЭА, позволяющие обобщить опыт работы высококвалифицированных конструкторов и сделать их достаточно универсальными, приводит к необходимости формализовать процесс конструирования. Формализация деятельности конструкторов РЭА требует выбора, построения и обоснования моделей будущих конструктивных решений. При этом на основе исходных элементов моделей будущей конструкции необходимо создать структуру более сложной модели всей конструкции РЭА в целом, т. е., по существу, решить задачу синтеза конструкций.

Разработанная обобщенная модель конструкции РЭА подвергается тщательным исследованиям с точки зрения удовлетворения параметров конструкций заданным техническим требованиям. Таким образом проводят анализ и оптимизацию параметров конструкции.

Оптимизацию конструкции РЭА обычно сводят к нахождению из множества просмотренных вариантов единственного, обеспечивающего выполнение поставленной задачи с максимальной эффективностью при минимуме затрат. Поиск оптимальных вариантов увеличивает объем работ высокой квалификации в такой степени, что ручной труд становится малоэффективным. В создавшихся условиях радикальным средством увеличения эффективности труда является оптимизация процессов разработки с привлечением графоаналитических устройств и ЭВМ. Применение ЭВМ для проектирования изменяет некоторые этапы работ и требует перестройки традиционно сложившихся отношений между проектировщиками, конструкторами, технологами и работниками технического архива. Широкое внедрение ЭВМ в процессе конструирования требует совершенствования форм конструкторских документов и создания таких технических архивов, где вместо карточки хранятся перфокарты на чертежи и другие сведения на машинных носителях.

Успешное решение проблемы формализации конструкторской деятельности возможно лишь при ее алгоритмизации и автоматизации с использованием математических методов, теории графов, алгоритмов, математического программирования, исследования операций, вычислительных методов и др.

Под *автоматизацией проектирования* будем понимать систематическое применение ЭВМ в процессе проектирования при научно обоснованном распределении функций между проектировщиком и ЭВМ и при научно обоснованном выборе методов машинного решения задач. Возможность автоматизации определяется

степенью алгоритмизации процессов конструирования, временем, необходимым для обработки результатов моделирования или корректировки машинной документации, а также формой общения конструктора с ЭВМ. Наиболее оперативная форма обмена информацией — непосредственный диалог конструктора с ЭВМ — значительно расширяет возможности автоматизации и оптимизации конструирования.

Одна из основных особенностей процесса разработки новых моделей РЭА — переход к системным методам решения задач при проектировании РЭА. Системные методы связаны с понятием «система». Под *системой* будем понимать совокупность взаимосвязанных разнородных устройств, частей, подсистем, совместно выполняющих заданные функции, решающих общую задачу в условиях взаимодействия с внешней средой, с учетом развития и противоречий. При системном подходе изучаемый, проектируемый, изготавливаемый объект рассматривается как система.

Системный подход базируется на рассмотрении изучаемого объекта во взаимосвязи с окружающими объектами. Его задачами являются исследование специфических связей, установление закономерностей, присущих отдельным типам систем, разработка на этой основе определенных методов их описания и изучения.

Сформулируем основные положения системного подхода.

1. Параметрическое описание, которое является простейшей формой научного анализа. Представляет собой исследование любого объекта, которое базируется на эмпирических наблюдениях, описании свойств, признаков и отношений исследуемого объекта к другим.

2. Структурное описание исследуемого объекта, которое выполняют после выявления параметров. Предусматривает переход к определению поэлементного строения исследуемого объекта. Основная задача состоит в том, чтобы установить взаимосвязи свойств, признаков, выявленных при параметрическом описании исследуемого объекта.

3. Функциональное описание исследуемого объекта, которое может быть выполнено исходя из функциональных зависимостей между параметрами (функционально-параметрическое описание) или частями объекта (функционально-структурное описание). Специфика состоит в том, что функция части объекта задается на основе характеристики всего объекта.

Приведенные положения показывают постепенное усложнение подхода к исследуемому объекту, так как каждый последующий этап включает все предыдущие и, кроме того, решает некоторые новые задачи.

Использование системного подхода должно упрощать процесс исследования. Особенность системного подхода заключается в новой ориентации всего хода исследования, которая состоит в

стремлении построить целостную картину исследуемого объекта.

Системный подход базируется на следующих принципах.

1. При исследовании объекта как системы описание его частей не имеет самостоятельного значения, так как каждая часть объекта описывается не отдельно, а с учетом ее роли во всем объекте.

2. Специфика системного объекта не исчерпывается особенностями составляющих его частей, а связана с характером взаимосвязей между отдельными частями.

3. Один и тот же исследуемый объект выступает как обладающий одновременно разными характеристиками, параметрами, функциями, структурой. Проявлением этого является иерархичность строения систем.

4. Исследование системы, как правило, неотделимо от исследования условий ее функционирования.

5. При исследовании сложного объекта учитывается зависимость состояния частей от состояния всей системы.

6. Анализ функциональной характеристики исследуемого объекта может оказаться недостаточным, так как весьма важно установить целесообразность функционирования системы.

Использование системных методов позволяет избегать односторонних ошибочных представлений, заключений и решений. При конструировании РЭА системный подход является средством анализа и синтеза при одновременном использовании большого числа компонентов и факторов, а также взаимосвязей, образующих данную систему. Он позволяет рассматривать РЭА как единое целое при анализе и проектировании ее частей. При этом необходимо иметь способ объединения частей в одно целое.

Радиоэлектронная аппаратура является частью (подсистемой) РТС. Изучение ее функций в РТС имеет большое значение для инженера-конструктора. Радиоэлектронная аппаратура предназначена для преобразования сигналов в соответствии с принципом действия РТС. Свойства РЭА описываются совокупностью электрических, конструктивно-технологических, эксплуатационных и экономических параметров и характеристик. Для исследования и проектирования целесообразно разделять РЭА, как систему на устройства (подсистемы):

по выполняемым функциям;

по физической сущности процессов и особенностям их закономерностей.

По выполняемым функциям устройства РЭА делятся на антенно-фидерные, передающие, приемные, источники вторичного электропитания, устройства управления функционированием аппаратуры (пульта управления), устройства вторичной обработки и выдачи информации, контроля состояния и обнаружения неисправностей, соединительные устройства (механические и электрические), устройства сопряжения РЭА с потребителями информации (операторами, объектами). При этом каждое из устройств

имеет свои алгоритмы функционирования и схему. Кроме того, устройства характеризуются конструкцией, особенностями технологии и технической эксплуатации.

Деление РЭА по выполняемым функциям на устройства удобно с точки зрения принципов действия РЭА и схемотехники. Однако при этом важные вопросы конструкций, технологии и технической эксплуатации рассредотачиваются. Поэтому широко используется деление РЭА на устройства, когда в РЭА выделяются схема, конструкция, технология производства, эксплуатация. Устройства, входящие в систему РЭА, основаны на различной физической сущности процессов и находятся в сложном взаимодействии друг с другом.

Проектирование современной РЭА включает принятие решений по принципам действия, схемам и построению конструкции, по элементной базе, а также по совокупности технологических процессов, предлагаемых для использования при изготовлении, и основных принципов технической эксплуатации.

Для выполнения поставленных задач конструкторы и технологи должны работать совместно со специалистами различных областей. При участии механиков и эксплуатационников конструкторы РЭА решают вопросы обеспечения надежности, ремонтпригодности, контролепригодности, диагностирования и прогнозирования, удобства использования и обслуживания (эргономические, антропометрические, психологические) электромагнитной и тепловой совместимости, защиты от дестабилизирующих факторов.

Конструкторы и технологи совместно со специалистами по вычислительной технике, автоматизации проектирования конструкции, технологии и производства радиоаппаратуры (САПР-К, САПР-Т, АСУТП, АСУП) изучают и формируют общие принципы, используемые и внедряемые в различных областях техники.

Система автоматизированного проектирования — наилучшая форма организации процесса проектирования РЭА, позволяющая в значительной степени освободить конструктора и технолога от однообразной, трудоемкой и утомительной работы и повысить их интеллектуальные возможности на этапе принятия оптимальных решений.

В САПР решение задач обеспечивается совокупностью программ общего и специального программного обеспечения, разрабатываемых не конструктором-пользователем, который может не знать многих особенностей их построения и реализованных в них методов, а специалистами по САПР. Несмотря на это, знание методов и алгоритмов, реализованных в программах САПР, желательно для конструктора-пользователя САПР. Опираясь на них, он сможет избежать многих ошибок в формулировке задач, назначении исходных данных, интерпретации результатов и достичь своих целей с наименьшими затратами общего и машинного времени.

В учебной и специальной литературе достаточно полно освещены вопросы проектирования РЭА, технологии и организации их производства, а также эксплуатации. Однако эти вопросы затрагиваются без достаточной взаимосвязи и студенты испытывают трудности в решении комплексных задач. Это подтверждается анализом курсовых и дипломных проектов.

Основная задача учебного пособия — научить комплексно использовать полученные знания по отдельным дисциплинам на основе системного подхода при проектировании, постановке многовариантных задач и выборе оптимального варианта конструкции.

1.2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

В курсе «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» по специальности 0705 — «Конструирование и производство радиоаппаратуры» предусмотрено выполнение курсового проекта, особенностью которого является то, что он завершает цикл схемотехнических и конструкторских дисциплин и требует от студента применения всей совокупности инженерных знаний при проектировании конструкций РЭА.

Процесс развития РЭА обусловлен требованиями постоянного усложнения выполняемых ею функциональных задач и расширением областей применения. При этом функциональная сложность РЭА за каждое пятилетие в последние 25 лет увеличивается примерно в 10 раз [8]. Функциональная сложность РЭА в свою очередь определяет аппаратную (схемную) и оценивается числом схемных или активных элементов. С увеличением последней возникают противоречия в цепочке взаимодействующих факторов: сложность — надежность — масса (объем) — энергопотребление — стоимость — сроки разработки и изготовления. Здесь важную роль играет конструктор, который путем создания и совершенствования элементной базы (БИС, СБИС, МСБ), новых методов конструирования, применения прогрессивных материалов и методов формообразования деталей и узлов, новой технологии изготовления способствует разрешению этих противоречий. Знания, которыми должен располагать конструктор радиоаппаратуры, весьма разнообразны. Конструктору необходимо знать принципы действия радиотехнических устройств и систем; особенности компоновок РЭА; свойства материалов и их проявления в различных условиях эксплуатации; технологию изготовления отдельных деталей и сборочных единиц; автоматизацию проектирования конструкций и технологических процессов; условия эксплуатации РЭА и методы защиты от ее дестабилизирующих факторов (теплообменные процессы, вибрации и удары, воздействие электромагнитных полей, радиации и влаги и т. д.), основы анализа надежности РЭА, основы микроэлектроники, вопросы стандартизации, унификации,

технологичности, патентное дело, экономику и технику безопасности, правила оформления конструкторской документации и многое другое.

Перечисленные вопросы невозможно охватить в полном объеме в одном курсе, поэтому перед студентами при выполнении курсового проекта поставлены задачи, основными из которых являются:

систематизация и расширение теоретических знаний при решении комплексных задач создания современных конструкций РЭА; совершенствование схмотехнических, конструкторских и графических навыков;

практическое применение вычислительной техники при проектировании конструкций РЭА;

изучение справочной и технической литературы по конструированию РЭА;

изучение единой системы конструкторской документации (ЕСКД);

подготовка к самостоятельному решению сложных конструкторских задач при выполнении дипломного проекта и последующей работы на предприятиях промышленности.

Таким образом, курсовое проектирование ставит своей целью систематизацию, закрепление и расширение теоретических знаний в области конструирования РЭА, углубленное изучение одного из направлений радиотехники в соответствии с темой проекта, развитие конструкторских и расчетных навыков, а также самостоятельности в работе.

Курсовой проект должен решать комплексную инженерно-техническую задачу, включающую анализ и обоснование основных элементов и узлов проектируемого радиоэлектронного устройства (РЭУ), разработку конструкции, обоснование принятых расчетных нагрузок и технических решений.

Темой курсового проекта является разработка конструктивно законченного РЭУ различного назначения: бортовое, морское, наземное и т. д.

По конструктивной сложности разрабатываемое устройство должно быть не ниже 1-го структурного уровня и выполнено с учетом стадий проектирования по ЕСКД.

Проектирование конструкции РЭУ базируется на анализе электрической принципиальной схемы и технических требований, выданных по заданию на курсовой проект, и сопровождается оценкой элементной базы, компоновкой, разработкой сборочных и детальных чертежей, выбором электрических соединений, соединителей, материалов и покрытий, а также расчетами, проводимыми при конструировании (обеспечение электромагнитной и тепловой совместимости, помехоустойчивости, электрической и механической прочности и др.) с технико-экономическим обоснованием предлагаемой конструкции. При этом особое внимание обра-
ща-

ется на обеспечение требований комплексной миниатюризации, надежности, стандартизации и технологичности.

Основная задача курсового проекта — реализовать системный подход при проектировании конструкций РЭА с учетом всех перечисленных стадий проектирования РЭА.

Техническое задание. Предусматривает рассмотрение студентом индивидуального задания на курсовое проектирование и уточнение совместно с руководителем проекта объема и содержания работ, которые необходимо выполнить при проектировании конструкций РЭА. Результатом рассмотрения задания является разработка расширенного технического задания (см. гл. 3).

Техническое предложение (ГОСТ 2.118—73). Предусматривает анализ индивидуального задания и электрической принципиальной схемы, выданных студенту в качестве исходных данных на курсовое проектирование, а также анализ существующих конструкций аналогу РЭУ и выбор метода конструирования устройства. На этой стадии проектирования также проводится патентный поиск. Результатом выполнения этой стадии проектирования является:

вывод о технико-экономической целесообразности проектирования конструкции РЭУ;

таблица сравнительной оценки элементной базы, указанной в электрической принципиальной схеме (форму таблицы см. в § 3.2).

Эскизный проект (ГОСТ 2.119—73). Выполняется с целью принятия принципиальных конструктивных решений изделия, дающих общее представление о компоновке и размещении элементов конструкции. Оптимальный вариант конструкции РЭУ определяется в результате предварительной компоновки и сравнения вариантов по показателям качества. При этом следует учитывать конструктивные, технологические и эксплуатационные особенности разрабатываемого РЭУ и существующих аналогов, прототипов и сопоставимых изделий, а также тенденции и перспективы развития отечественной и зарубежной техники в данной области.

Результатом выполнения этой стадии проектирования являются:

чертеж общего вида конструкции РЭУ (предварительный вариант);

конструкторские расчеты, подтверждающие выполненную предварительную компоновку конструкции.

Технический проект (ГОСТ 2.120—73). Выполняется с целью выявления окончательных технических решений по разрабатываемой конструкции РЭА, т. е. в результате компоновки определяются размещение схемных и конструктивных элементов, конструкций плат, элементов электрических и механических связей и другие технические решения, дающие полное представление о конструкции изделия.

Результатом выполнения этой стадии проектирования являются:

чертеж общего вида конструкции РЭА (окончательный вариант);

конструкторские расчеты, подтверждающие выполненную окончательную компоновку конструкции.

Рабочий проект (ГОСТ 2.102—68). Выполняется с целью разработки и оформления чертежей деталей и сборочных единиц, спецификаций и других рабочих документов, оговоренных в индивидуальном задании. При проектировании с использованием автоматизированного рабочего места конструктора (АРМ) выполняются чертежи в виде машинной графики.

1.3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЕГО АНАЛИЗ

Каждому студенту выдается индивидуальное задание на курсовое проектирование в начале семестра преподавателем — руководителем проекта. В задании руководитель проекта указывает срок выдачи заданий, сроки проведения рубежного контроля выполнения студентом отдельных этапов конструкторского проектирования (20, 40, 60, 80 и 100%) и дату защиты проекта. Задание оформляется на специальном бланке, в котором записываются: тема проекта; исходные данные к проекту; объем и содержание графических работ; объем и содержание расчетно-пояснительной записки; рекомендуемая литература; дополнительные указания к проекту.

Тема проекта. В качестве темы для курсового проекта рекомендуется конструирование РЭУ, входящего в состав РЭА, в том числе: радиопередатчики, приемники, пеленгаторы, источники вторичного электропитания, СВЧ-устройства, антенно-фидерные устройства, пульты управления, контрольно-измерительная аппаратура, унифицированные функциональные узлы (ячейки) и другие устройства.

Исходные данные к проекту. Основными исходными данными для выполнения проекта являются:

1) схема электрическая принципиальная устройства, выполненная в полном соответствии с ЕСКД и с перечнем входящих электрорадиоэлементов (ЭРЭ);

2) электрические требования с указанием данных, наиболее характерных для разрабатываемого устройства, например для радиоприемного устройства: чувствительность, избирательность, рабочий диапазон частот и другие; для радиопередающего устройства — стабильность частоты, выходная мощность, рабочий диапазон частот и т. д.;

3) конструкторские требования: компоновочные данные (габариты, масса, координаты центра тяжести и точек крепления), по-

казатели надежности; уровень миниатюризации; степень унификации; технологичность конструкции и т. д.;

4) условия эксплуатации задаются объектом эксплуатации РЭА, например бортовая самолетная РЭА, с указанием в расширенном техническом задании конкретных количественных показателей воздействий на РЭА. Например, устойчивость к климатическим воздействиям по ГОСТ 15150—69; к механическим — по ГОСТ 16019—78 и ГОСТ 17676—81; условия хранения и транспортирования по ГОСТ 15150—69; требования по защите от помехонесущих полей задается ослаблением помехонесущего поля в децибелах на определенной частоте или в диапазоне частот;

5) технико-экономические требования задаются серийностью производства устройства и группой изделия в зависимости от стоимости его разработки и производства (1, 2, 3 группы).

К 1-й группе относится аппаратура, стоимость которой должна быть минимальной. Это в основном аппаратура бытового назначения.

К 2-й группе относится аппаратура, стоимость разработки и производства которой имеет существенное, но не первостепенное значение (медицинская аппаратура, радиостанции низовой народнохозяйственной радиосвязи и др.).

К 3-й группе относится аппаратура, к которой предъявляются жесткие требования по обеспечению заданных технических характеристик.

Объем и содержание графических работ. Графическая часть проекта включает комплект чертежей на разрабатываемое устройство объемом не менее 3-х листов ватмана формата А1 по ГОСТ 2.301—68 (6—8 чертежей).

Объем и содержание расчетно-пояснительной записки. Расчетно-пояснительная записка должна состоять из 30—35 листов.

Рекомендуемая литература. Руководитель проекта называет литературу, которую студенту необходимо использовать при разработке конструкции РЭУ.

Дополнительные указания к проекту. Этот раздел используется руководителем проекта для включения дополнительных требований к проекту исследовательского характера, а также для включения дополнений, которые появляются у студента при работе над курсовым проектом.

Анализ индивидуального задания и электрической принципиальной схемы проводится с целью уточнения технических требований задания и оценки применяемой элементной базы. По результатам проведенного анализа технического задания (ТЗ) разрабатывается расширенное ТЗ (см. гл. 3).

В настоящее время при составлении ТЗ на разработку РЭУ и, в частности, на проектирование конструкций, технические требования задаются в сокращенном виде со ссылкой на соответствующие группы, категории или исполнение в ГОСТ, ОСТ и ТУ. В за-

Таблица 1.1. Характеристика элементной базы

Наименование элемента	Количество, шт.	Конструкционные параметры		
		Масса, г	Установочная площадь, мм ²	Интенсивность отказов, $1 \cdot 10^{-6}$ 1/ч
Транзисторы:				
КТ315В	14	0,18	25	0,5
КТ801А	1	4,0	380	0,7
Тиристор КУ202А	4	25,0	330	0,85
Диоды:				
Д223	10	0,55	100	0,6
Д226	14	2,0	350	0,46
Стабилитрон КС156А	1	1	60	5
Конденсаторы:				
К50-6	12	—	—	2,4
К53-1	6	—	—	1,2

дачи анализа индивидуального задания входят: расшифровка пунктов и технических требований задания, увязка противоречивых требований и составление расширенного ТЗ на проектирование конструкции устройства РЭА. Подробно расшифровка основных пунктов ТЗ на курсовое проектирование и составление расширенного ТЗ даны в гл. 3.

Рассмотрим в качестве примера расшифровку технических требований на условия эксплуатации разрабатываемой РЭА.

В ТЗ указаны следующие эксплуатационные характеристики РЭУ:

устойчивость к климатическим воздействиям по ГОСТ 15150—69;

устойчивость к механическим воздействиям гр. 4 по ГОСТ 16019—78.

Запишем технические требования на разрабатываемое РЭУ в развернутом виде. Радиоэлектронная аппаратура эксплуатируется во влажном климате в помещении, где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе (категория 2). Из ГОСТ 15150—69 для данной категории исполнения имеем следующие значения климатических факторов внешней среды:

а) температура воздуха при эксплуатации:

рабочие значения:

верхнее +45°C

нижнее +1°C

среднее +27°C

предельные значения:

верхнее +50°C

нижнее -10°C

б) изменение температуры воздуха за 8 ч 10°C

в) относительная влажность воздуха:

рабочее значение при 27°C 90 %

предельное значение при 35°C 100 %

г) интенсивность дождя 5 мм/мин

Параметры внешних воздействий				
Диапазон температур, °С	Вибрация		Ударные перегрузки, м/с ² (g)	Линейные ускорения, м/с ² (g)
	Частота, Гц	Перегрузка, м/с ² (g)		
—60...100	10...600	7,5	2,5	7,5
—40...85	10...600	10	75	25
—55...70	10...600	7,5	75	25
—60...100	10...100	10	75	25
—60...80	2...2500	15	150	150
—55...100	10...600	7,5	75	25
—10...70	5...80	2,5	5	10
—80...85	10...2000	10	20	25

д) скорость ветра, предельное значение 50 м/с.

Условия хранения и транспортирования характеризуются следующими климатическими факторами:

температура воздуха:

верхнее значение +50°C

нижнее значение —50°C

относительная влажность при 27°C 80 %.

Разрабатываемое устройство относится к наземной мобильной аппаратуре, эксплуатируемой при атмосферном давлении:

рабочие значения (0,9 ... 1,1) 10⁵ Па

предельное значение 0,86 10⁵ Па.

Из ГОСТ 16019—78 выпишем значения механических воздействий, действующих на аппаратуру, установленную на автомобиле (группа 4):

а) вибрационные нагрузки при эксплуатации:

диапазон частот 10 ... 70 Гц

максимальное ускорение 0,8 ... 3,8g

б) ударные нагрузки при эксплуатации:

максимальное ускорение 15g

длительность удара 5 ... 10 мс

число ударов в минуту 40 ... 80

в) линейные нагрузки при эксплуатации:

максимальное ускорение 25g

При анализе электрической схемы РЭУ делают описания по назначению устройства, его составу и работе.

При рассмотрении назначения устройства необходимо уяснить основные задачи, которые могут быть решены с помощью данного устройства.

Описание устройства дается с учетом взаимодействия всех блоков и функциональных узлов, входящих в его состав, при этом уясняется назначение всех составных частей устройства.

При описании работы устройства по электрической принципиальной схеме указывают порядок прохождения сигнала по тракту и те функциональные преобразования, которым сигнал подвергается в каждом каскаде тракта. Следует обратить внимание на цепи различного уровня сигналов, в частности на входные и выходные цепи, на цепи импульсных и высокочастотных сигналов и на цепи питания.

В заключение анализа электрической принципиальной схемы следует проверить правильность выбора типов ЭРЭ, указанных в перечне к схеме. Эту проверку следует производить сравнением данных, помещенных в справочниках по эксплуатационным характеристикам с соответствующими значениями, указанными в ТЗ на разработку устройства или полученных расчетным путем.

Для повышения надежности устройства рабочий диапазон элементов по паспорту должен иметь некоторый запас.

Возможен случай, когда основная часть элементов схемы удовлетворяет требованиям ТЗ, а остальная часть не может нормально работать при заданных внешних воздействиях. В этом случае необходимо предусмотреть специальные меры, ограничивающие диапазон эксплуатационных воздействий на эти элементы. К таким мерам, в частности, относятся: локальная герметизация, термостатирование, амортизация и др.

При оценке элементов следует также учитывать их стоимость, из которой складывается стоимость разрабатываемой РЭА. Желательно также для элементов схемы ориентировочно наметить вид монтажа.

По результатам анализа электрической принципиальной схемы и оценки применяемых ЭРЭ составляется таблица сравнительных характеристик элементной базы устройства (табл. 1.1).

Глава 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

2.1. УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

В расчетно-пояснительной записке даются подробные исходные данные к проекту и отражается выполнение всех пунктов задания на курсовое проектирование.

Рекомендуется следующее содержание расчетно-пояснительной записки:

Введение.

1. Расширенное техническое задание.
 2. Анализ технического задания, электрической схемы и оценка элементной базы.
 3. Разработка конструкции РЭУ.
 4. Конструкторские расчеты.
- Выводы и заключение.
Список используемой литературы.
Приложения.

В текстовую часть «Введения» рекомендуется включить следующие вопросы [9]:

задача курсового проекта по дисциплине «Конструирование РЭА»;

цель данной конструкторской разработки;
связь разрабатываемой конструкции РЭУ с решением народнохозяйственных задач;

предполагаемые параметры устройства, определяющие его приоритет или преимущество перед аналогами, в том числе и зарубежными;

целесообразность проектирования устройства по экономическим критериям конструирования, изготовления и эксплуатации;
соответствие проектируемого устройства нормативно-техническим документам.

Содержание и указания по составлению разделов: «Расширенное техническое задание» и «Анализ технического задания, электрической схемы и оценка элементной базы» даны в § 1.3.

Раздел «**Разработка конструкции РЭУ**» выполняется в два этапа [9]:

предварительная разработка конструкции устройства (принятие принципиальных конструкторских решений);

разработка основных элементов и узлов конструкции устройства (принятие окончательных технических решений).

На этапе «*Предварительная разработка конструкции устройства*» рассматриваются следующие вопросы:

анализ базовых и типовых несущих конструкций;
выбор необходимого варианта или аргументированного обоснования оригинального конструкторского решения;

выбор предварительного варианта компоновки устройства;

выбор типа электрического монтажа;

выбор способов защиты устройства от дестабилизирующих факторов (механических, климатических и различных помех);

выбор способов обеспечения нормального теплового режима устройства;

выбор конструкторских решений, обеспечивающих удобство ремонта и эксплуатации устройства;

обеспечение требований стандартизации, унификации и технологичности конструкции устройства;

При описании работы устройства по электрической принципиальной схеме указывают порядок прохождения сигнала по тракту и те функциональные преобразования, которым сигнал подвергается в каждом каскаде тракта. Следует обратить внимание на цепи различного уровня сигналов, в частности на входные и выходные цепи, на цепи импульсных и высокочастотных сигналов и на цепи питания.

В заключение анализа электрической принципиальной схемы следует проверить правильность выбора типов ЭРЭ, указанных в перечне к схеме. Эту проверку следует производить сравнением данных, помещенных в справочниках по эксплуатационным характеристикам с соответствующими значениями, указанными в ТЗ на разработку устройства или полученных расчетным путем.

Для повышения надежности устройства рабочий диапазон элементов по паспорту должен иметь некоторый запас.

Возможен случай, когда основная часть элементов схемы удовлетворяет требованиям ТЗ, а остальная часть не может нормально работать при заданных внешних воздействиях. В этом случае необходимо предусмотреть специальные меры, ограничивающие диапазон эксплуатационных воздействий на эти элементы. К таким мерам, в частности, относятся: локальная герметизация, термостатирование, амортизация и др.

При оценке элементов следует также учитывать их стоимость, из которой складывается стоимость разрабатываемой РЭА. Желательно также для элементов схемы ориентировочно наметить вид монтажа.

По результатам анализа электрической принципиальной схемы и оценки применяемых ЭРЭ составляется таблица сравнительных характеристик элементной базы устройства (табл. 1.1).

Глава 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

2.1. УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

В расчетно-пояснительной записке даются подробные исходные данные к проекту и отражается выполнение всех пунктов задания на курсовое проектирование.

Рекомендуется следующее содержание расчетно-пояснительной записки:

Введение.

1. Расширенное техническое задание.

2. Анализ технического задания, электрической схемы и оценка элементной базы.

3. Разработка конструкции РЭУ.

4. Конструкторские расчеты.

Выводы и заключение.

Список используемой литературы.

Приложения.

В текстовую часть «Введения» рекомендуется включить следующие вопросы [9]:

задача курсового проекта по дисциплине «Конструирование РЭА»;

цель данной конструкторской разработки;

связь разрабатываемой конструкции РЭУ с решением народнохозяйственных задач;

предполагаемые параметры устройства, определяющие его приоритет или преимущество перед аналогами, в том числе и зарубежными;

целесообразность проектирования устройства по экономическим критериям конструирования, изготовления и эксплуатации;

соответствие проектируемого устройства нормативно-техническим документам.

Содержание и указания по составлению разделов: «Расширенное техническое задание» и «Анализ технического задания, электрической схемы и оценка элементной базы» даны в § 1.3.

Раздел «**Разработка конструкции РЭУ**» выполняется в два этапа [9]:

предварительная разработка конструкции устройства (принятие принципиальных конструкторских решений);

разработка основных элементов и узлов конструкции устройства (принятие окончательных технических решений).

На этапе «*Предварительная разработка конструкции устройства*» рассматриваются следующие вопросы:

анализ базовых и типовых несущих конструкций;

выбор необходимого варианта или аргументированного обоснования оригинального конструкторского решения;

выбор предварительного варианта компоновки устройства;

выбор типа электрического монтажа;

выбор способов защиты устройства от дестабилизирующих факторов (механических, климатических и различных помех);

выбор способов обеспечения нормального теплового режима устройства;

выбор конструкторских решений, обеспечивающих удобство ремонта и эксплуатации устройства;

обеспечение требований стандартизации, унификации и технологичности конструкции устройства;

описание выбранного варианта компоновки устройства.

Кратко рассмотрим содержание некоторых пунктов, входящих в состав этого этапа.

Выбор предварительного варианта компоновки устройства.

В практике конструирования в качестве первоначальных требований обычно выдвигаются компоновочные параметры устройства, его габариты (объем) и коэффициент заполнения. В этом случае задача по разработке конструкции может быть сформулирована следующим образом: разместить в заданном, обычно в минимальном объеме все элементы, указанные в электрической принципиальной схеме, причем коэффициенты заполнения объема и миниатюризации должны быть не ниже значений, указанных в ТЗ. Для решения этой задачи необходимо:

провести разбиение электрической принципиальной схемы на части, полученные функциональные части выделить на электрической схеме штриховыми линиями;

скомпоновать в заданном объеме функциональные части схемы, причем следует рассмотреть не менее двух вариантов компоновки устройства;

для сравниваемых компоновок произвести ориентировочный расчет компоновочных параметров. По результатам расчета подобрать вариант компоновки. Этот вариант является исходным для дальнейшей разработки конструкции.

Выбор типа электрического монтажа. Исходя из известных видов электрического монтажа (объемного и печатного) следует рассмотреть:

способы электрического монтажа в ячейке и между ячейками; способы внутрислottedного и межслottedного электрического монтажа;

способы ввода в РЭУ внешних электрических цепей.

Выбор способов защиты устройства от внешних воздействий. Следует определить основные способы защиты как всего устройства в целом, так и отдельных его блоков, ячеек и наиболее ответственных деталей от воздействий **внешней среды** климатических, механических воздействий и помехонесущих полей. В частности, при рассмотрении вопросов защиты РЭУ от условий эксплуатации следует определить возможность и необходимость применения таких способов защиты, как:

полная либо частичная герметизация всего устройства с помощью корпусов (кожухов);

герметизация отдельных ячеек и деталей заливкой, пропиткой, обволакиванием, опрессовкой;

защита с помощью металлических, неметаллических неорганических и лакокрасочных покрытий.

При выборе способов защиты от механических воздействий рекомендуется рассмотреть следующие вопросы:

вывод собственной частоты конструкции устройства выше заданной;

применение вибропоглощающих материалов;

полная или частичная амортизация устройства;

локальная амортизация отдельных ячеек и узлов;

защита путем обеспечения вибропрочности элементов и несущих конструкций устройства.

При выборе способов защиты устройства от помехонесущих полей целесообразно использовать такие способы, как:

экранирование всего устройства в целом либо отдельных его частей;

пространственное разнесение источника помех и чувствительных цепей устройства.

Выбор способов обеспечения нормального теплового режима устройства. В этом разделе определяют:

ориентацию конструктивных деталей в блоке, расположение ячеек, узлов и ЭРЭ;

основной способ передачи тепла, в зависимости от конструктивных условий эксплуатации, особенностей и режима работы устройства;

необходимость применения ребрения стенок корпуса;

необходимость применения радиаторов, в частности для охлаждения полупроводниковых приборов;

целесообразность применения покрытий, увеличивающих теплоотдачу;

необходимость и возможность использования специальных методов охлаждения, как отдельных элементов, так и устройства в целом (конвекция: принудительная, жидкостная, испарительная; охлаждение: термоэлектрическое, кондуктивное, с использованием тепловых трубок и т. д.);

необходимость термостатирования отдельных элементов либо отдельных узлов устройства.

Выбор конструкторских решений, обеспечивающих удобство ремонта и эксплуатации РЭУ. В этом разделе необходимо определить:

функционально законченные узлы;

доступность к электрическим соединителям;

возможность и удобство замены блоков, ячеек;

возможность перепайки электрического монтажа;

проведение контроля электрических параметров без разборки;

размещение органов управления, контроля и защиты.

Обеспечение требований стандартизации, унификации и технологичности конструкции устройства. Следует обосновать целесообразность применения стандартизированных и нормализованных ячеек, узлов, конструктивных элементов, деталей, профилей, а также прогрессивных методов сборки и формообразования деталей. В частности, необходимо определить:

возможность размещения РЭУ в стандартной (по ГОСТ) либо унифицированной в отрасли или на предприятии базовой несущей конструкции (БНК);

возможность применения унифицированных деталей для крепления печатных плат;

условия для снижения номенклатуры применяемых комплектующих изделий, материалов, крепежных деталей и технологических процессов.

Описание выбранного варианта компоновки устройства. Раздел должен содержать:

описание конструкции устройства с учетом всех изменений, которые были внесены в исходную компоновку устройства при учете дополнительных требований по защите РЭУ от внешних воздействий, удобству ремонта и эксплуатации, доступности регулировочных элементов;

чертеж выбранного варианта компоновки устройства. Чертеж должен быть выполнен как чертеж общего вида в соответствии с ЕСКД ГОСТ 2.118—73.

На этапе «Разработка основных элементов и узлов конструкции устройства» рассматриваются следующие вопросы:

выбор базовых несущих конструкций и их элементов;

выбор элементов крепления и фиксации;

выбор конструктивного исполнения защиты устройства от механических воздействий;

выбор конструктивных элементов электрического монтажа;

анализ типов электрических соединителей;

выбор конструктивного исполнения экранирования и заземления;

выбор устройств охлаждения ячеек, блоков и РЭА в целом;

выбор защитных и защитно-декоративных покрытий;

выбор способов маркировки деталей и сборочных единиц, нанесение надписей на лицевых панелях.

Таким образом, данный этап посвящен детальной проработке принципиальных конструкторских решений, принятых на предыдущем этапе. Остановимся на содержании перечисленных вопросов.

Выбор базовых несущих конструкций и их элементов. Необходимо выбрать:

унифицированный вариант БНК ячейки, блока, стойки, стеллажа;

технологический вариант исполнения БНК и их элементов (литье, сварка, клепка и т. д.);

марку конструкционного материала; данные по сравниваемым материалам записать в таблицу (табл. 2.1);

методы осуществления разъёмных и неразъёмных соединений деталей (свинчивание, сварка и т. д.).

Таблица 2.1. Характеристики конструкционных материалов

Материал			Механические свойства				Стоимость 1 кг, руб.	
Марка	Конфигурация	Сортамент	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, Н/м ² × 10 ⁻¹⁰	Прочность, Н·м ²			
					Предел выносливости σ_{-1}	Предел текучести σ_T		Предел упругости, σ_y

Выбор элементов крепления и фиксации. В этом разделе следует:

произвести расчеты размерных цепей, обеспечивающих врубамость блоков или ячеек в соответствии с ТУ на соединители или их крепление в стойке, шкафу, стеллаже;

определить способ крепления отдельных ячеек в блоках и блоков в стойке, шкафу, стеллаже;

рассмотреть конструкции отдельных элементов — направляющих, штырей, ловителей и т. д.;

уточнить варианты крепления ячеек и блоков при эксплуатационном осмотре.

Выбор элементов конструкций, обеспечивающих защиту РЭУ от механических воздействий. Здесь необходимо:

рассчитать собственные частоты колебаний отдельных узлов и элементов конструкций (ячейки, платы, каркасы и т. д.);

в случае необходимости сделать собственные частоты колебаний выше возмущающих колебаний;

по мере надобности применить вибропоглощающие материалы;

определить типы, схему размещения и число амортизаторов, предварительно выполнив статический и динамический расчеты амортизаторов; данные записать в таблицу (табл. 2.2);

выбрать способы предохранения элементов крепежа от самосвинчивания.

Таблица 2.2. Характеристики амортизаторов

Тип амортизатора	Предельная нагрузка, Н	Номинальная нагрузка, Н	Коэффициент демпфирования	Жесткость, Н/м	Параметры условий эксплуатации				
					Диапазон температур, °С	Диапазон частот вибрации, Гц	Виброперегрузка, g	Длительность удара, с	Ударная перегрузка, g

Таблица 2.3. Характеристики электрических соединителей

Тип соединения	Число контактов	Шаг контактов	Ток, А	Напряжение, В	Габаритные размеры, мм	Масса, г	Параметры внешних воздействий					
							Диапазон температур, °С	Диапазон частот вибрации, Гц	Виброперегрузка, g	Длительность удара, с	Ударная перегрузка, g	

Выбор конструктивных элементов электрического монтажа.

В этом разделе следует:

выбрать метод монтажа (печатный, навесной) и способа обеспечения электрических соединений (пайка, сварка, накрутка, обжимка и т. д.);

выбрать материал припоя и флюса;

выбрать способы и элементы подводки к блоку внешних электрических цепей.

Для печатного монтажа определяют:

а) число слоев печатной платы с учетом специфики схемотехники и условий машинной разводки в случае ее применения;

б) метод изготовления печатной платы;

в) материал для изготовления печатной платы;

г) размер печатной платы и ее толщину из ограничительного ряда по ОСТ 4.010.020. «Платы печатные. Основные размеры»;

д) размеры печатных проводников, контактных площадок, монтажных отверстий;

е) способы установки навесных ЭРЭ и ИС на печатной плате;

ж) способы крепления ЭРЭ и ИС.

Для навесного монтажа определяют:

а) марку, сечение жилы и вид изоляции монтажного провода;

б) способ соединения проводов между собой, проводов и выводов навесных элементов между собой;

в) способ крепления жгутов, кабелей и проводов к корпусу радиотехнического устройства.

Анализ типов электрических соединителей. Необходимо рассмотреть конкретные типы соединителей, которые рекомендуются для применения в конструкции радиотехнического устройства. Данные по соединителям записать в таблицу (табл. 2.3).

Выбор конструктивного исполнения экранирования и заземления. В этом разделе нужно:

выполнить расчет элементов печатного и проводного монтажа по постоянному и переменному току; в случае необходимости принять конструктивные меры, исключающие паразитные связи и наводки в элементах монтажа и электрической схеме;

выбрать материал экрана, толщину его стенок, число слоев;

Таблица 2.4. Покрытия, применяемые в конструкции РЭУ

Детали, сборочные единицы	Материал детали, сборочной единицы	Покрытие		
		металлическое	химическое	лакокрасочное
Каркас	Сталь 20	Ц.б. Хр	—	—
Лицевая панель	Д16Т	—	АН. Окс	Эм ПФ-115, серый 1НА
Печатная плата	Стеклотекстолит	—	—	Лак УТ-231
Контакты	Латунь Л63	Гор. ПОС-61	—	бесцветный —

определить способ осуществления электрических контактных соединений в цепях заземления;

выбрать элементы конструкции устройств заземления.

Выбор устройств охлаждения ячеек, блоков и РЭА в целом.

Данный раздел должен включать:

расчет теплового режима;

выбор конструктивных решений теплоотводящих шин;

определение типов радиаторов (пластинчатые, игольчато-штыревые и др.);

выбор конструкции воздухопроводов, теплообменников, фильтров;

определение типов и расположения вентиляционных отверстий (жалюзей, перфораций и т. п.);

определение видов и расположения тепловых экранов.

Выбор защитных и защитно-декоративных покрытий. В этом разделе для каждой детали и узла следует выбрать конкретный вид покрытия. Для каждого вида покрытия дать основные характеристики. Например, для металлических покрытий определить металл покрытия, способ нанесения, толщину покрытия, число слоев и т. д.

Данные по применяемым покрытиям записать в таблицу (табл. 2.4).

Выбор способов маркировки деталей и сборочных единиц.

Здесь должны быть определены способы маркировки:

элементов электрической схемы (резисторов, транзисторов, ИС, микросборок и т. д.);

проводов, кабелей и других элементов;

ячеек, функциональных узлов, плат и т. д.

Следует также рассмотреть способы нанесения надписей на лицевых панелях.

В разделе «**Конструкторские расчеты**» должны быть сгруппированы расчеты, которые следует проводить для обоснования принятых на предыдущих этапах конструкторских решений. Основными конструкторскими расчетами, выполняемыми в курсовом проекте являются:

1. Расчет объемно-компоновочных характеристик устройства.

2. Расчет электромагнитной совместимости.
3. Расчет параметров межэлектрических соединений.
4. Расчет теплового режима.
5. Расчет на механические воздействия.
6. Расчет показателей качества.

Содержание и объем расчетного материала в каждом конкретном случае определяется преподавателем — руководителем курсового проектирования.

В разделе «**Выводы и заключение**» необходимо подвести итог о проделанной работе и сделать заключение о полном выполнении пунктов технического задания, а также наметить основные пути дальнейшего совершенствования разработанной конструкции.

Раздел «**Перечень используемой литературы**» должен содержать перечень тех книг, журнальных статей, нормативно-технических документов, которые были использованы при работе над курсовым проектом. На указанные в перечне работы должны быть сделаны ссылки по тексту пояснительной записки. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1—84.

В раздел «**Приложения**» включаются следующие документы: перечень элементов к электрической принципиальной схеме, если он не размещен на основном чертеже; программа автоматизированного проектирования конструкций и технологических процессов.

При изложении и оформлении материала расчетно-пояснительной записки необходимо придерживаться основных требований и рекомендаций по выполнению текстовых документов (ЕСКД ГОСТ 2.105—79, ГОСТ 2.106—68).

Изложение расчетно-пояснительной записки должно быть выполнено грамотно, ясным техническим языком и кратко. Следует избегать сложных и длинных предложений.

В тексте записки не должно быть общих фраз, общих рекомендаций, распространяющихся на аппаратуру вообще. В записке следует строго придерживаться схемы обоснования конструкторских решений. Расчетно-пояснительная записка должна быть написана от руки чернилами на одной стороне стандартных листов писчей бумаги формата А4 и подшита в обложку с титульным листом по типовой форме. Формулы по тексту записки должны быть вписаны аккуратно, иметь обязательное обозначение и расшифровку входящих в них элементов с указанием единиц измерения. Необходимо также указать тот литературный источник, откуда данная формула заимствована. Например:

1. Определяем условную поверхность нагретой зоны S_3 , м², для воздушного охлаждения [6]:

$$S_3 = 2[L_1L_2 + (L_1 + L_2)L_3k_3],$$

где L_1 , L_2 , L_3 — геометрические размеры корпуса блока, м; k_3 — коэффициент заполнения блока.

2. Определяем удельную мощность нагретой зоны q_3 , Вт/м²:

$$q_3 = Q/S_3,$$

где Q — мощность, рассеиваемая блоком, Вт. и т. д.

Нумерация формул должна быть сквозная. Нумерация выполняется арабскими цифрами с правой стороны на уровне формул в круглых скобках. Следует обратить внимание на порядок обозначения основных, дополнительных и производных единиц измерения физических величин, а также множителей для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименований, который состоит в следующем:

а) единицы измерения, названные по имени выдающихся ученых обозначаются прописной буквой, например:

сила электрического тока — ампер — А;

сила тяжести — ньютон — Н;

индуктивность — генри — Гн;

термодинамическая температура — кельвин — К;

б) прочие единицы пишут со строчной буквы, например:

масса — килограмм — кг;

время — секунда — с;

в) если показатель степени при основании 10 при количественной оценке единиц измерения больше двух, то их обозначают с прописной буквы, например:

10^6 — мега — М;

10^{12} — гига — Г.

Исключение составляет 10^3 — кило — к, поскольку данный множитель совпадает с обозначением основной единицей — кельвином (К);

г) если показатель степени при основании 10 при количественной оценке единиц измерения меньше двух, то их обозначают со строчной буквы, например:

10^{-3} — милли — м;

10^{-6} — микро — мк.

В расчетно-пояснительной записке должны применяться единицы Международной системы единиц (СИ).

Примеры обозначения физических величин: кОм — килоом; мА — миллиампер; мВт — милливатт; МОм — мегаом; мкА — микроампер; МВт — мегаватт.

Т а б л и ц а 2.5. Провода и кабели монтажные

Марка	Характеристика проводника			Изоляция слоев				Вид документа
	Сечение, мм	Материал	Число жил	Покр. тие	1-го	2-го	3-го	
МГШВ	0,12...1,5	Медь	Много- жильный	Гор. ПОС	Шелк	Поли- хлорви- нил	—	НО.022.335

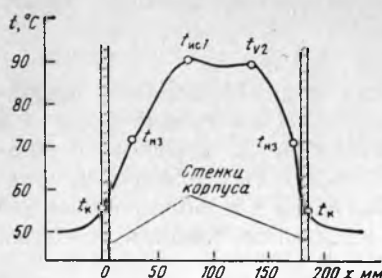


Рис. 2.1. Распределение температуры в сечении блока РЭА

При построении и обозначении в расчетно-пояснительной записке таблиц, а также графиков, схем и других иллюстративных материалов следует придерживаться следующих правил:

1) таблицы необходимо сопровождать тематическими заголовками, каждая таблица в тексте должна иметь свой номер. На каждую таблицу должна быть ссылка, нумерация таблиц по тексту должна быть сквозная (табл. 2.5);

2) графикам необходимо давать свой номер и тематический заголовок (рис. 2.1).

Список используемой литературы оформляется в следующем порядке:

а) для книг — фамилия автора, инициалы, название книги, часть, выпуск, место издания, издательство, год, число страниц;

б) для журнальных статей — фамилия автора, инициалы, заголовки статьи, название журнала, год, том, число страниц;

в) для нормативно-технических документов — наименование документа, вид документа (нормаль, руководящий технический материал, стандарт предприятия, отраслевой стандарт, государственный стандарт), обозначение документа.

2.2. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

Графическая часть курсового проекта выполняется в соответствии с требованиями ЕСКД.

В состав графической части проекта могут входить следующие чертежи (в пересчете на формат А1 — 594×841 мм):

электрическая схема устройства — 1 лист;

чертеж общего вида устройства — 1 лист;

сборочный чертеж устройства — 1 лист;

электромонтажный чертеж — 1 лист;

рабочие чертежи деталей, в том числе чертежи печатной платы — 1 лист.

Расчет размерных цепей, карта электрических и тепловых режимов, эскизы и схемы составляются на специальных бланках в соответствии с требованиями ЕСКД и брошюруются вместе с расчетно-пояснительной запиской. Чертежи выполняются карандашом, на чертежах деталей должны быть указаны данные, необходимые для изготовления и контроля (допускаемые отклонения размеров, высота микронеровностей поверхности, покрытия, спе-

циальные требования). На сборочных чертежах должны быть приведены все сведения, необходимые для сборки, регулировки и контроля.

Каждый чертеж должен иметь основную надпись конструкторского документа в специальном бланке, расположенном в правом углу под нижней линией рамки поля документа. Спецификации помещаются в приложении расчетно-пояснительной записки.

Содержание и объем графического материала согласовывается с преподавателем — руководителем курсового проекта.

Электрические схемы структурные, функциональные, принципиальные радиотехнических устройств следует выполнять в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД [17]. При большой графической насыщенности листов схем условными графическими обозначениями (УГО) и линиями связи допускается делить поле листа на колонки, ряды, зоны, применять метод координат и т. д. Колонки обозначают по верхней кромке листа (по горизонтали) слева направо последовательными порядковыми номерами с постоянным количеством знаков в номере, например 00,01, ..., 10, ... 12 и т. д. Допускается дополнительно обозначать колонки по нижней кромке листа. Ширина колонки должна быть равна ширине минимального основного поля УГО элемента. Ряды обозначают по вертикали (по левой кромке листа) сверху вниз прописными буквами латинского алфавита (кроме букв *I* и *O*). Допускается дополнительно проставлять обозначения рядов по правой кромке листа. Высота ряда должна быть равна минимальной высоте УГО элемента. В технически обоснованных случаях допускается изменять ширину и высоту колонки и ряда.

Пример оформления фрагмента схемы электрической принципиальной с делением листа на колонки и ряды показан на рис. 2.2.

Входящими линиями листа схемы показывают электрические связи с входными выводами изделия, отображенными на данном листе, а также связи, изображения которых начинаются на других листах схемы и других схемах. Значения параметров электропитания на схеме допускается помещать в виде таблиц, текста либо на прерванной линии, отображающей связи по питанию. При этом в УГО элемента обозначения выводов допускается не указывать.

Двоичные логические элементы изображают в виде условных графических обозначений по ГОСТ 2.743—82. Логические элементы состояния, а также элементы и устройства, не выполняющие логические функции, но применяемые в устройстве, допускается изображать в виде прямоугольников.

На основном поле условного графического обозначения элементов помещают следующую информацию (см. рис. 2.2):

в строке 1 — символ функции по ГОСТ 2.743—82;

в строке 5 — полное или сокращенное наименование, или тип, или код элемента.

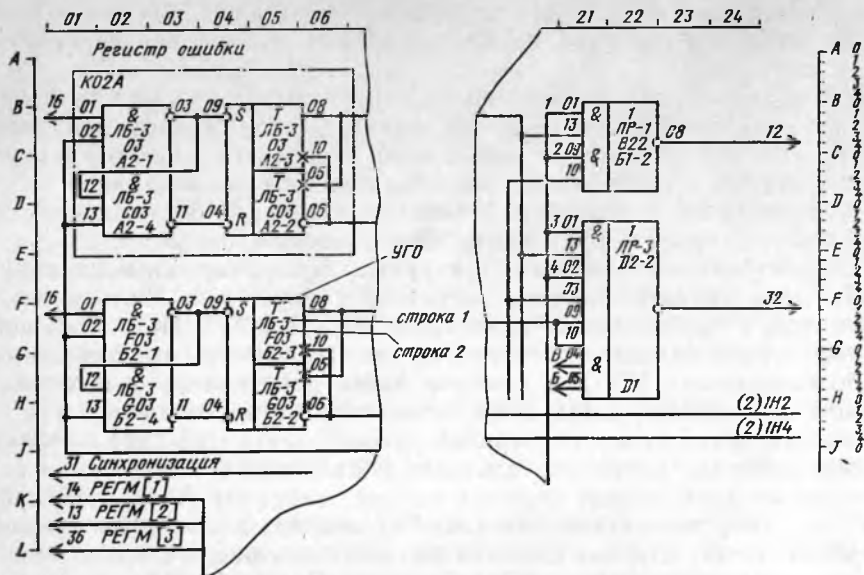


Рис. 2.2. Фрагмент схемы электрической принципиальной

В остальных строках помещают буквенно-цифровое обозначение или порядковый номер; обозначение конструктивного расположения; адресное обозначение УГО элемента на листе и другую информацию.

Характер и расположение информации в последующих строках должны быть пояснены на поле схемы или в нормативно-технической документации (ГОСТ 2.708—81).

Адресное обозначение указывает расположение условного графического обозначения элемента в схеме и выражается координатами левого верхнего угла данного УГО.

Перечень элементов помещают на первом листе схемы или выполняют в виде самостоятельного документа. Перечень элементов оформляют в виде таблицы (табл. 2.6).

Если перечень элементов помещают на первом листе схемы, то его располагают, как правило, над основной надписью.

Таблица 2.6. Форма таблицы для перечня элементов схемы

15	Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
30				
	20	110	10	
	125			

Таблица 2.7. Форма таблицы для перечня элементов схемы

Зона	Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
3	20	110	10	
135				

ние между перечнем элементов и основной надписью должно быть не менее 12 мм. Продолжение перечня элементов помещают слева от основной надписи, повторяя головку таблицы. Перечень элементов в виде самостоятельного документа составляют на формате А4. Основную надпись и дополнительные графы к ней выполняют по ГОСТ 2.104—68 (форма 2 и 2а).

В графах перечня указывают следующие данные:

в графе «Позиционное обозначение» — позиционное обозначение элемента, устройства или обозначение функциональной группы;

в графе «Наименование» — наименование элемента в соответствии с документом, на основании которого этот элемент применен, и обозначение этого документа (основной конструкторский документ, государственный стандарт, технические условия);

при необходимости указания технических данных элемента, не содержащихся в его наименовании, эти данные рекомендуется указывать в графе «Примечание».

При разбивке поля схемы на зоны перечень элементов дополняют графой «Зона» (табл. 2.7), указывая в ней обозначения зоны или номер строки (при строчном способе выполнения схем), в которой расположен данный элемент.

Элементы в перечень записываются группами в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений. Если на схеме применяют позиционные обозначения, составленные из букв латинского и русского алфавитов, то в перечень сначала записывают элементы с позиционными обозначениями, составленными из букв латинского алфавита, а затем — из букв русского алфавита. В пределах каждой группы, имеющей одинаковые буквенные позиционные обозначения, элементы располагаются по возрастанию порядковых номеров. Элементы одного типа с одинаковыми электрическими параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, допускается записывать в перечень в одну строку. В этом случае в графу «Позиционное обозначение» вписывают только позиционные обозначения с наименьшими и с наибольшими порядковыми номерами, например: R3, R4, C8 ... C12, а в графу «Количество» — общее количество таких элементов. При записи элементов, имеющих одинаковую первую часть позиционных обозначений, допускается: записывать наименование элемен-

Таблица 2.8. Образец оформления перечня элементов схемы

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
R1	Резисторы МЛТ-0,5-300 кОм $\pm 5\%$	1	

Таблица 2.9. Образец оформления перечня элементов схемы

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
R1	Резисторы ОМЛТ		
R2	Резисторы СП		
R3	Резисторы ПЭВ		
R1	ОМЛТ-05-200 Ом $\pm 10\%$	1	
R2	СП-1-А-560 Ом $\pm 10\%$ ОС-3-12	1	
R3	ПЭВ-10-3 кОм $\pm 5\%$	1	

тов в графе «Наименование» в виде общего наименования (заголовка) один раз на каждом листе перечня (табл. 2.8); записывать в общем наименовании (заголовке) обозначения документов, на основании которых эти элементы применены (табл. 2.9).

Если позиционные обозначения присвоены элементам в пределах устройств или в изделия входят одинаковые функциональные группы, то в перечень записывают отдельно элементы, относящиеся к устройствам и функциональным группам. Запись элементов, входящих в каждую функциональную группу, начинают с соответствующего заголовка. Заголовок записывают в графе «Наименование» и подчеркивают.

При указании условных графических обозначений номиналов резисторов и конденсаторов допускается применять упрощенный способ обозначения единиц измерений.

Для резисторов:

от 0 до 999 Ом — без указания единиц измерения;

от $1 \cdot 10^3$ до $999 \cdot 10^3$ Ом — в килоомах с обозначением единицы измерений строчной буквой «к»;

от $1 \cdot 10^6$ до $999 \cdot 10^6$ Ом — в мегаомах с обозначением единицы измерения прописной буквой «М»;

свыше $1 \cdot 10^9$ Ом — в гигаомах с обозначением единицы измерения прописной буквой «Г».

Для конденсаторов:

от 0 до $9999 \cdot 10^{-12}$ Ф — в пикофарадах без указания единицы измерения;

от $1 \cdot 10^{-8}$ до $9999 \cdot 10^{-6}$ Ф — в микрофарадах (мк).

На схеме следует указывать обозначения выводов (контактов) элементов (устройств) в виде таблицы соединений. Таблицу со-

Таблица 2.10. Форма таблицы соединений

	Обозначение провода	Откуда идет	Куда поступает	Данные провода	Примечание
15					
8					
	20	50	50	30	45

единений следует помещать на первом листе схемы или выполнять в виде самостоятельного документа.

Форма таблицы соединений выбирается в зависимости от сведений, которые необходимо поместить на схеме (табл. 2.10).

В графе «Обозначение провода» указывают обозначение провода, жилы, кабеля. В графах «Откуда идет», «Куда поступает» приводятся условные буквенно-цифровые обозначения соединяемых элементов или устройств. В графе «Данные провода» указывают: для провода — марку, сечение и число жил. В графе «Примечание» указывают дополнительные уточненные данные.

Чертеж общего вида (рис. 2.3) следует выполнять в соответствии с требованиями ГОСТ 2.119—73 и ГОСТ 2.120—73 [17]. Он определяет конструкцию РЭУ, взаимодействие его составных частей и поясняет принцип работы устройства, включает форму деталей и характерные размеры, которые облегчают уяснение формы элементов деталей (например, обозначение диаметра для деталей круглой формы), содержит посадки — предельные отклонения сопрягаемых поверхностей, сопровождается техническими требованиями к устройству (например, по покрытию, пропитке обмоток, методам сварки), дает технические характеристики, необходимые для разработки рабочих чертежей.

Чертеж общего вида должен содержать сведения о составных частях изделия в таблице, выполненной на том же листе или на отдельных листах формата А4, обозначаемые как последующие листы того же чертежа. Конструктор составляет таблицу по своему усмотрению, где он последовательно записывает: заимствованные изделия; покупные изделия; вновь разрабатываемые изделия. Сведения о РЭУ можно приводить на полках линий-выносок или оформлять в виде спецификаций.

Основные требования к выполнению **сборочных чертежей** указаны в ГОСТ 2.109—73 [17]. Сборочный чертеж должен содержать:

изображение сборочной единицы, дающее представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых по данному чертежу, и обеспечивающее возможность осуществления

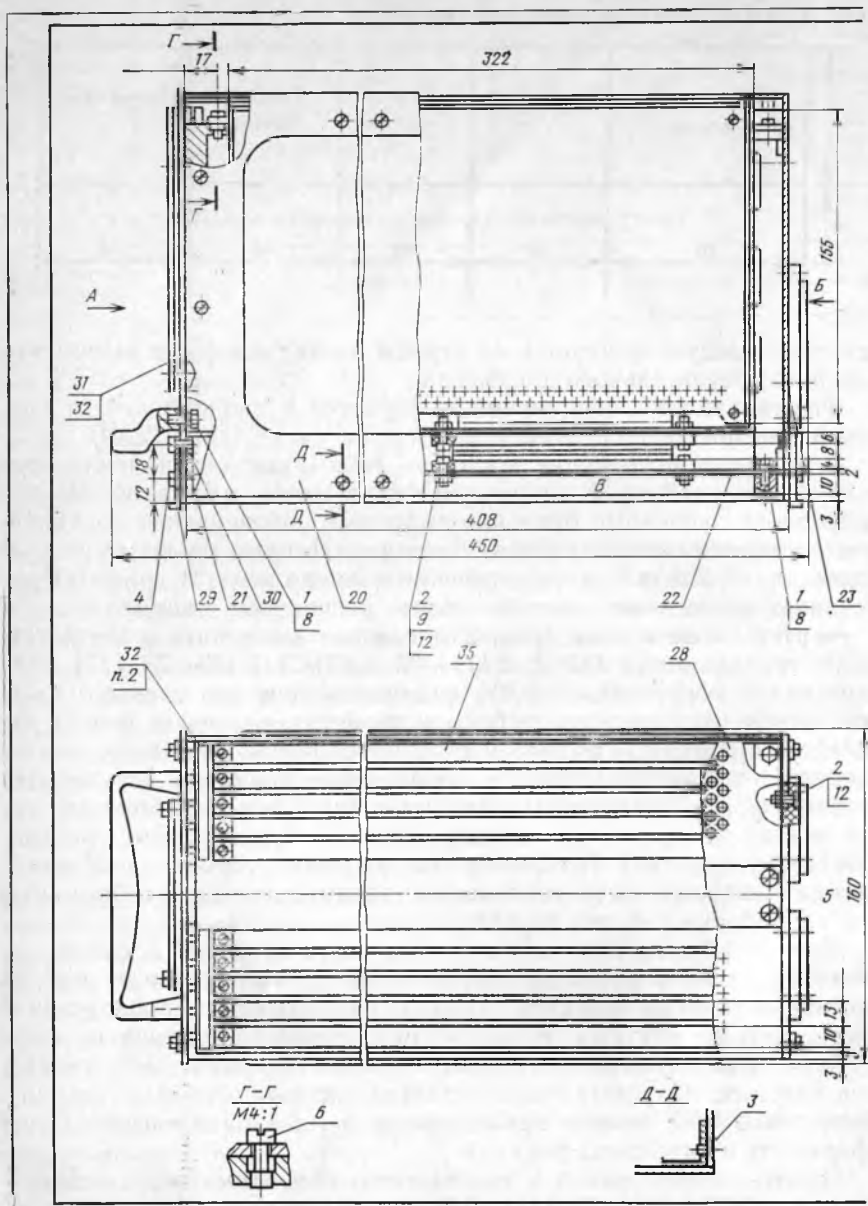
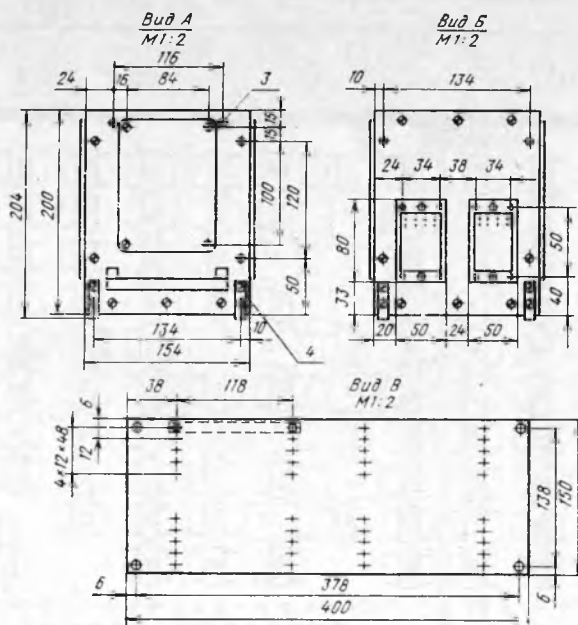


Рис. 2.3. Чертеж общего вида блока ВКЦ



- 1 Размеры для справок
- 2 Планку надписью ставить на клей БФ-4 ГОСТ 12172-74 по ОСТ4 ГО.029.204
- 3 Надпись делать краской МК35 шрифт 3 по ОСТ4 ГО.054-205
- 4 Монтаж вести по электромонтажной схеме
- 5 Паять припой ПОС-61 ГОСТ 21931-76
- 6 Предельные отклонения $h12, h12, \pm t_2/2$
- 7 Общие технические требования по ОСТ4.ГО.070.015

		Конструирование РЗА	
		Блок ВКЦ	
		Общий вид	

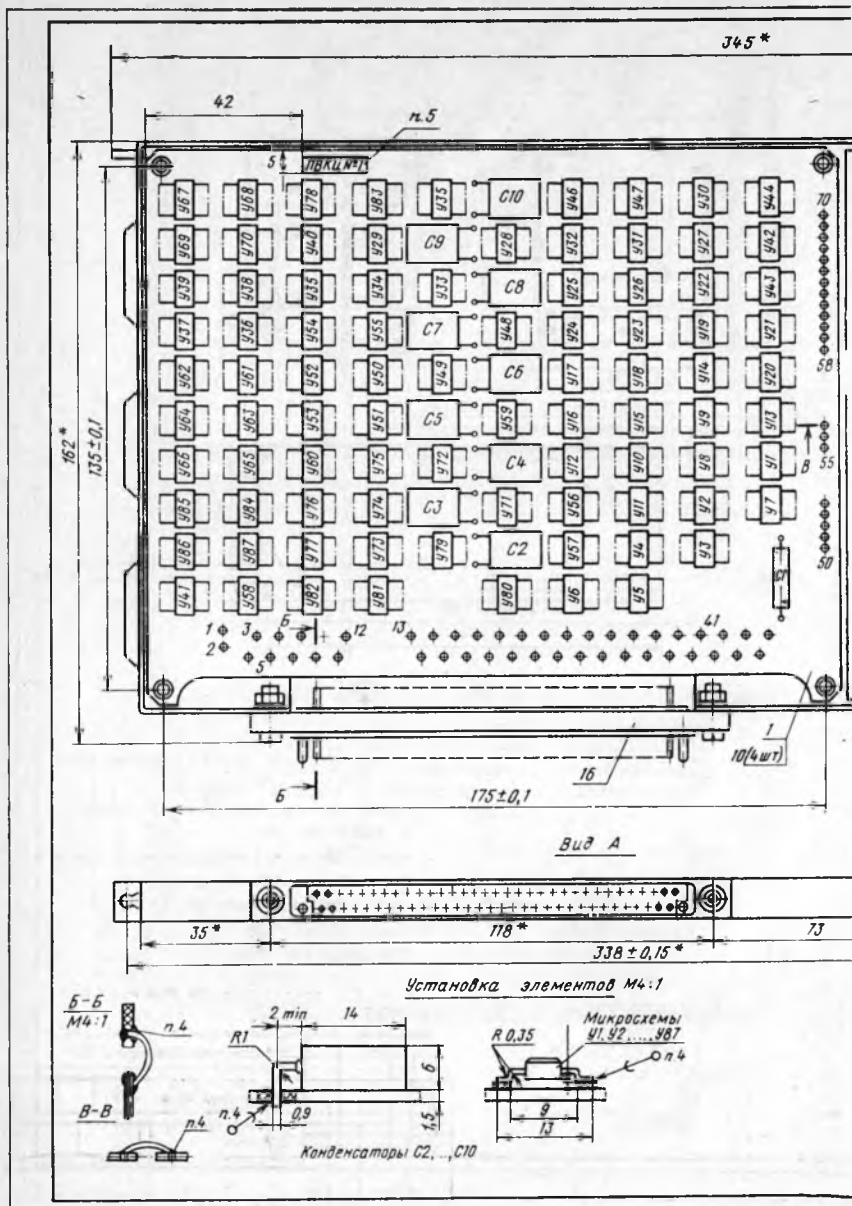
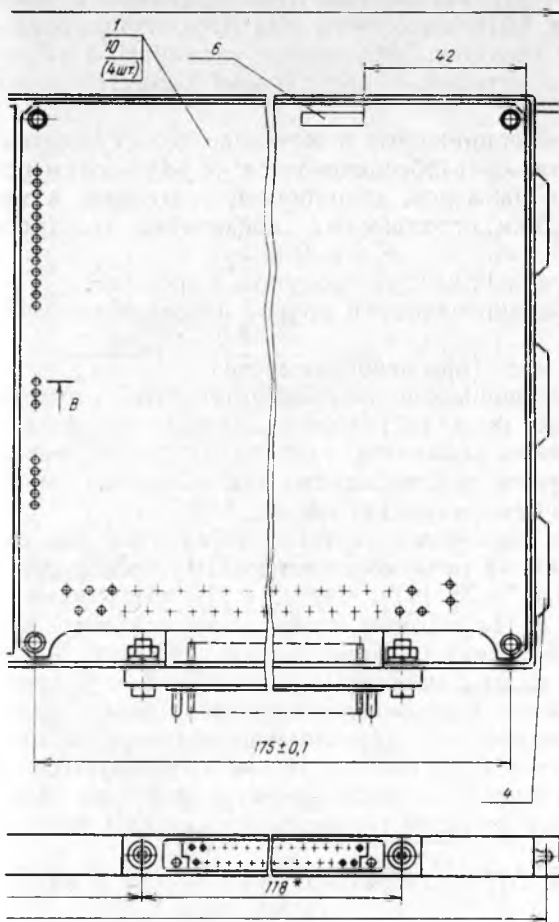


Рис. 2.4. Сборочный чертёж ячейки блока ВКЦ



- 1* Размеры для справок
- 2 Вилку поз 16 установить по шаблону
- 3 Электромонтаж вести по схеме
- 4 Паять припоем ПОС-61 ГОСТ 21931-76
- 5 Планку с надписью ставить на клей БФ-4 ГОСТ 12172-74 по ОСТ 4 ГО. 029 204
- 6 Надпись делать краской МКЭБ шрифт 3 по ОСТ 4 ГО 054 205
- 7 Обозначение элементов У1, У2, ..., У87, С1, С2, ..., С10 и маркировка конденсатора "..." "*" показаны условно

8. Элементы со схемным обозначением выноска позиций не имеют
- 9 Неуказанные предельные отклонения $h12, h12, \pm t_2 / 2$
- 10 Общие технические требования по ОСТ 4 ГО 070 015

		Конструирование РЗА	
		Ячейка блока ВКЦ	
		Сварочный чертёж	

сборки и контроля сборочной единицы; допускается на сборочных чертежах помещать дополнительные схематические изображения соединения и расположения составных частей изделия;

размеры, предельные отклонения и другие параметры и требования, которые должны быть выполнены или проконтролированы по данному сборочному чертежу; допускается указывать в качестве справочных размеры деталей, определяющие характер сопряжения;

указание о характере сопряжения и методах его осуществления, если точность сопряжения обеспечивается не заданными предельными отклонениями размеров, а подбором, подгонкой, а также указания о выполнении неразъемных соединений (сваркой, пайкой и т. п.);

номера позиций составных частей, входящих в изделие;

установочные, присоединительные и другие необходимые справочные размеры;

координаты центров масс (при необходимости).

При указании установочных и присоединительных размеров должны быть нанесены: координаты расположения, размеры с предельными отклонениями элементов, служащих для соединения с сопрягаемыми изделиями; другие параметры, например число контактных пар электрического соединения.

Пример оформления сборочного чертежа показан на рис. 2.4.

Оформление **чертежей на печатные платы (ПП)** производят в соответствии с ГОСТ 2.417—78 [17]. Чертежи ПП выполняют в масштабе 4:1; 2:1; 1:1. На чертеже изображают основные проекции с печатными проводниками и отверстиями; допускается приводить дополнительные виды с частичным изображением рисунка.

На чертеже ПП наносят координатную сетку линиями толщиной 0,2 ... 0,5 мм в соответствии с выбранным шагом и масштабом. Линии координатной сетки относительно нулевой нумеруются через один или несколько шагов (но не более пяти) цифрами. Допускается постановка номеров линий по четырем сторонам чертежа платы.

Размеры на чертеже ПП должны указываться одним из следующих способов:

в соответствии с требованиями ГОСТ 2.307—68;

нанесением координатной сетки в прямоугольной системе координат;

нанесением координатной сетки в полярной системе координат;

комбинированным способом с помощью размерных и выносных линий и координатной сетки в прямоугольной или полярной системе координат.

Шаг координатной сетки в прямоугольной системе координат по ГОСТ 10317—79; основной шаг 2,50 мм, дополнительный 1,25 или 0,625 мм. За нуль в прямоугольной системе координат на главном виде ПП следует принимать:

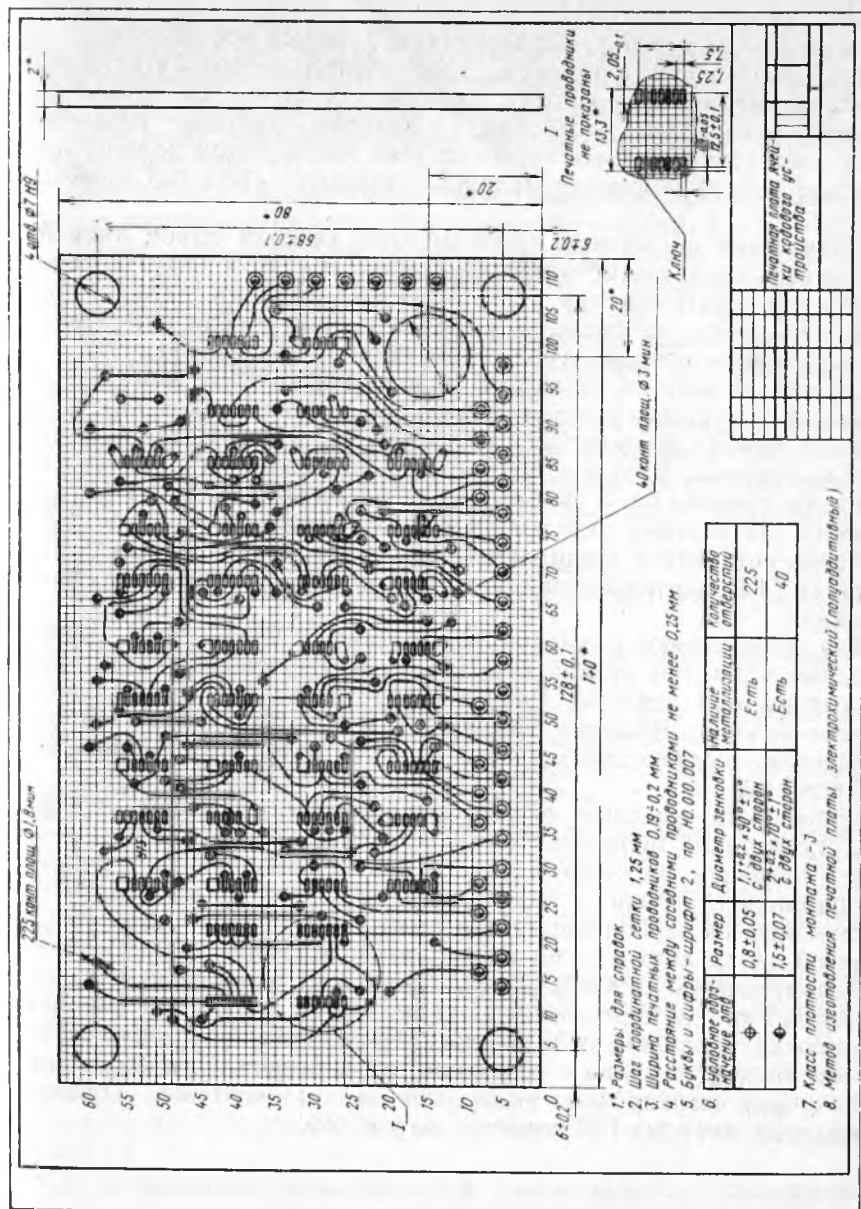


Рис. 2.5. Чертеж печатной платы кодировочного устройства

центр крайнего левого нижнего отверстия, находящегося на поле платы, в том числе и технологического;

левый нижний угол ПП;

левую нижнюю точку, образованную линиями построения.

Для проставления размеров, обозначений шероховатости поверхности, маркировки и тому подобного допускается приводить на чертеже дополнительный вид, на котором рисунок печатной платы следует изображать частично. Над таким видом должна помещаться соответствующая надпись, например: «Вид без проводников».

Проводники на чертеже должны изображаться одной линией, являющейся осью симметрии проводника, при этом на чертеже следует указывать ширину проводника. Проводники шириной более 2,5 мм могут изображаться двумя линиями, если они совпадают с линиями координатной сетки, ширину не указывают.

Круглые отверстия, имеющие зенковку и круглые контактные площадки с круглыми отверстиями (в том числе и зенковкой), изображают одной окружностью. Их форму и размеры оговаривают на поле чертежа. Круглые контактные площадки и контактные площадки произвольной формы, не обозначенные размерами, показывают на чертеже окружностью. Допускается условное изображение контактной площадки, в этом случае в технических требованиях (ТТ) чертежа оговаривают форму и размеры контактной площадки.

Для проставки размеров контактной площадки под многовыводные элементы контактную группу в увеличенном масштабе выносят на поле чертежа. Размер отверстия на чертеже ПП обозначают условно. Размеры отверстий в миллиметрах, наличие металлизации, условное обозначение и число отверстий оговаривают в ТТ чертежа.

Проводники, имеющие заданную ширину, показывают на чертеже. Если такой проводник имеет по длине переменную ширину, то ее указывают на каждом участке. Если проводник с переменной шириной переходит с одного слоя на другой, то размеры его проставляют на изображении этих слоев. При наличии на чертеже печатной платы двух и более проводников, имеющих заданную ширину, допускается их изображать штриховкой, зачернением и другими линиями. На чертеже показывают форму и размеры вырезов на широких проводниках и экранах. Маркировку располагают на чертеже печатной платы с одной или двух сторон. При необходимости способ маркировки указывают в ТТ чертежа. Пример оформления чертежа ПП приведен на рис. 2.5.

2.3. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

Курсовые проекты исследовательского профиля связаны с теоретическими и экспериментальными исследованиями в области конструирования РЭА. В качестве примерных тем курсовых проектов исследовательского профиля могут быть следующие:

разработка оптимального типоразмерного ряда БНК блоков самолетной РЭА;

разработка оптимального типоразмерного ряда радиаторов для теплонагруженных приборов радиоаппаратуры;

исследование различных способов закрепления печатных плат с целью обеспечения защиты ячеек РЭА от вибрационных и ударных воздействий;

исследование различных конструктивных вариантов экранов с целью обеспечения защиты РЭУ от внешнего электромагнитного поля;

исследование различных конструктивных вариантов кожухов с целью обеспечения нормального теплового режима РЭУ;

исследование и разработка алгоритмов автоматизированной трассировки межстоечного монтажа с помощью ленточных кабелей;

пути миниатюризации ГИС СВЧ-устройств;

пути повышения эффективности систем источников вторичного электропитания бортовой РЭА.

Примерное содержание пояснительной записки курсового проекта исследовательского профиля [9].

1. Раскрытие темы проекта, формулирование и обоснование основной задачи исследования, его актуальность.

2. Обзор состояния по литературным источникам, возможные направления решения задачи исследования.

3. Теоретические исследования, выводы основных закономерностей и соотношений. Оптимизация конструкций с помощью современных статистических и других методов, а также методов, базирующихся на использовании ЭВМ с целью повышения эффективности конструкций радиоаппаратуры.

4. Методический план экспериментальных исследований, необходимое оснащение и его назначение при проведении экспериментов, описание экспериментальной установки.

5. Обобщение данных экспериментальных и теоретических исследований, их сопоставление с расчетными. Общие выводы по результатам исследований и их применимость при конструировании РЭА.

6. Определение экономической эффективности внедрения результатов исследования при проектировании конструкций радиоаппаратуры.

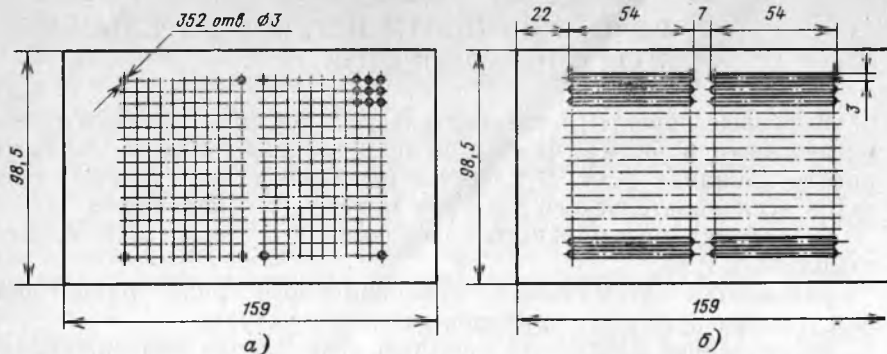


Рис. 2.6. Эскизы кожуха РЭУ с различными коэффициентами перфорации: а — перфорации в виде отверстий; б — перфорации в виде вырезов

Пояснительная записка курсового проекта исследовательского профиля содержит не более 50 страниц.

Графическую часть проекта исследовательского профиля определяет руководитель проекта при составлении задания на проектирование, однако ее объем должен быть не менее 3 листов формата А1. На листы могут выноситься:

- эскизы исследуемых конструкций РЭА (рис. 2.6);
- таблицы результатов расчета или замеров параметров РЭА (табл. 2.11);

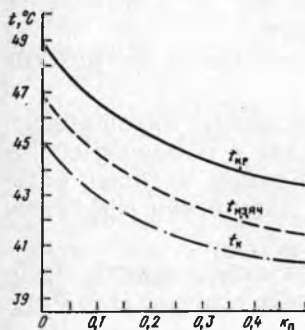


Рис. 2.7

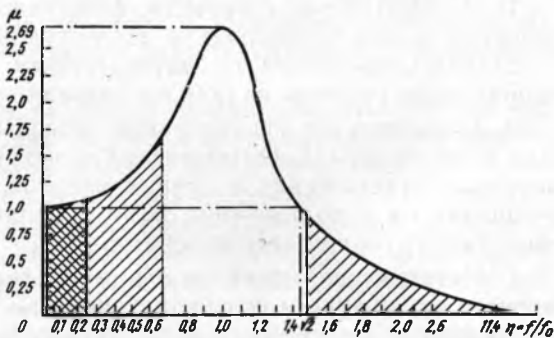


Рис. 2.8

Рис. 2.7. Изменение температуры в различных зонах РЭУ в зависимости от изменения перфорации кожуха:

t_k — температура кожуха; $t_{н.з.яч}$ — температура нагретой зоны ячейки; $t_{кв}$ — температура кожуха кварцевого резонатора

Рис. 2.8. Зависимость коэффициента динамичности от собственной частоты ПП

Таблица 2.11. Результаты расчета теплового режима прибора на ЭВМ при $t_c = 35^\circ\text{C}$

k_{II}	$t_K, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{из. бл}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{из. яч}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ис1}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ис2}}, ^\circ\text{C}$
0	45	46,6	46,9	48,9	77,2	107,7
0,16	43,2	44,5	44,8	46,8	75,1	105,6
0,32	42,1	43,3	43,6	45,6	73,9	104,4
0,64	40,9	41,9	42,2	44,2	72,5	103

Номер платы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Код закрепления	3333	3333	3030	3333	3303	3033	3033	3303	0303	3000	0000	0000	0303	3300	4 точки
Резонансная частота, Гц	792,15	437,85	322,9	6,99	30,28	49,7	92,82	529,49	129,88	150,44	45,7	205,2	19,41	274,35	119,16

распределение температурного или электромагнитного поля исследуемых РЭУ;

графики изменения температуры в зависимости от конструктивных решений разрабатываемого РЭУ (рис. 2.7);

частотные характеристики конструкций, исследуемых на вибрационные воздействия (рис. 2.8, 2.9).

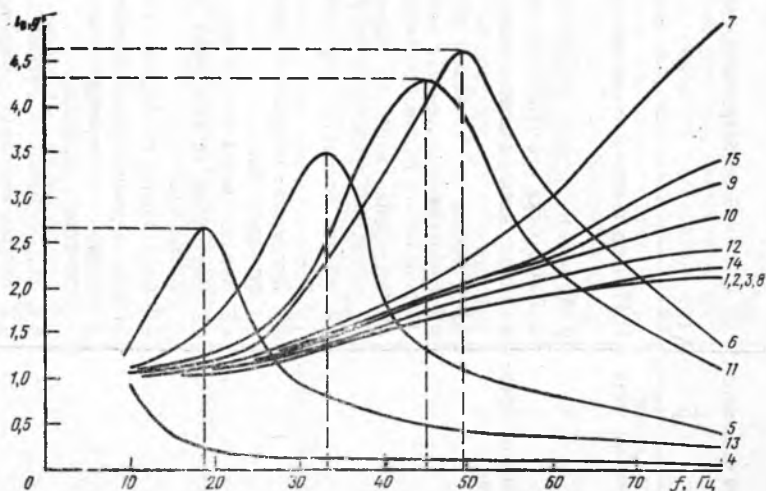


Рис. 2.9. Зависимость вибрационной перегрузки в определенном частотном диапазоне вибрационных воздействий от различных способов закрепления ПП

44 Таблица 2.12. График контроля выполнения курсового проекта

Стадия разработки	Последовательность выполнения работ	Раздел пособия	Раздел расчетно-пояснительной записки	Вид конструкторской документации	Срок выполнения этапов курсового проектирования
Техническое задание	1. Подбор и изучение литературы				До 3-х дней
Техническое предложение	2. Анализ выданного руководителем задания 3. Разработка расширенного технического задания 4. Анализ электрической принципиальной схемы 4.1. Уяснение назначения и функционирования схемы 4.2. Сопоставление условий эксплуатации и технических условий на использование элементной базы 4.3. Выделение наиболее критических элементов по электромагнитной совместимости и тепловому режиму 4.4. Анализ элементов управления, индикации и присоединения 4.5. Выделение модулей согласно модульному принципу конструирования 4.6. Анализ связей между модулями 4.7. Выявление установочных и присоединительных размеров элементной базы 4.8. Составление свободной таблицы анализа элементной базы 5. Анализ расширенного технического задания 6. Анализ существующих конструкций (аналогов) и выбор метода конструирования 6.1. Анализ массогабаритных компоновочных характеристик 6.2. Анализ несущих конструкций, материалов и покрытий 6.3. Выявление и предварительная проработка оригинальных элементов на основе анализа аналогичных конструкций				До конца 1-й недели До конца 2-й недели
Эскизный проект	6.4. Анализ применяемых способов защиты от внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, используемых в аналоге 6.5. Поиск формы устройства (с использованием результатов анализа аналога) 6.6. Анализ показателей стандартизации и унификации 7. Соблюдение технических, эргономических и эстетических ограничений 7.1. Патентный поиск 8. Комплексный анализ целесообразности выполнения проекта 9. Выбор вариантов конструкции РЭУ				До конца 3-й недели
Технический проект	10. Оценка вариантов по интегральному показателю качества 11. Разработка эскизного варианта конструкции РЭУ 12. Окончательная конструкторская разработка РЭУ 12.1. Разработка чертежа общего вида РЭУ 12.2. Конструирование печатных плат 12.3. Конструирование ячеек 12.4. Выбор и обоснование материалов несущих конструкций и покрытий 12.5. Выбор и обоснование электрических соединителей 12.6. Выполнение электромонтажных чертежей 12.7. Обеспечение электромагнитной совместимости 12.8. Обеспечение защиты от механических воздействий и других внешних факторов 12.9. Обеспечение нормального теплового режима				До конца 4-й недели
Рабочий проект	13. Конструкторские расчеты по обеспечению показателей качества разрабатываемого РЭУ 14. Разработка сборочных чертежей и деталей РЭУ 14.1. Разработка чертежей печатной платы 14.2. Разработка сборочных чертежей ячеек 14.3. Разработка чертежей деталей 15. Оформление расчетно-пояснительной записки 16. Подготовка к защите и брошюровка расчетно-пояснительной записки				До конца 7-й недели До конца 12-й недели

2.4. РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Последовательность выполнения курсового проекта с рекомендациями по использованию основных разделов настоящего пособия, в соответствии с требованиями расчетно-пояснительной записки, с перечнем чертежей и конструкторских документов, выполняемых при проектировании конструкций, и примерным графиком работ над курсовым проектом отражены в табл. 2.12.

В процессе выполнения курсового проекта для студентов организуются консультации. Во время консультации руководитель проекта обсуждает со студентами возможные варианты конструкции, рекомендует литературу по частным вопросам, согласовывает результаты расчетов, контролирует выполнение графика работ.

Законченный курсовой проект, подписанный руководителем проекта, защищается перед комиссией, состоящей не менее чем из трех преподавателей. При защите студент в течение 8... 10 мин докладывает о поставленной перед ним технической задаче и путях ее реализации в проекте, приводит анализ этого решения и обосновывает полученные результаты, ссылаясь на выполненные чертежи и расчетно-пояснительную записку. При этом отмечаются оригинальные конструкторские решения и пути дальнейшего совершенствования конструкции РЭУ.

План защиты проекта строится в следующей последовательности [9]:

- 1) тема и актуальность проекта;
- 2) исходные данные (анализ электрической принципиальной схемы и ТЗ);
- 3) техническое решение (компоновка, размещение и трассировка, несущие конструкции, материал, покрытия, соединители);
- 4) защита от дестабилизирующих факторов;
- 5) результаты проверочных конструкторских расчетов;
- 6) применение ЭВМ;
- 7) выводы о выполнении ТЗ и перспективах развития разработанной конструкции РЭУ.

Глава 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

3.1. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ РЭУ

Современный инженер решает задачу проектирования РЭА эвристическими методами в непосредственном взаимодействии с ЭВМ в рамках широко применяемых диалоговых систем. В диалоге с

ЭВМ осуществляется принцип комбинаторики. С помощью ЭВМ эффективно проводятся выбор решения из множества вариантов, который с большей вероятностью близок к оптимальному.

В процессе конструкторского проектирования РЭА, как и в любом другом творческом процессе, можно выделить три вида последовательности производимых операций [11].

1. Логическая последовательность операций — это математически однозначно определенные операции, которые можно корректно описать до уровня элементарных операций, т. е. составить алгоритм обработки информации и описанную последовательность операций выполнить с помощью средств вычислительной техники. К таким алгоритмизируемым последовательностям операций при конструкторском проектировании РЭА относятся расчеты, выполняемые по методике, детализовка, составление спецификаций и т. д. [4].

2. Эвристическая последовательность операций основана на способности инженера выбирать и принимать решения в тех ситуациях, когда тот или иной процесс нельзя полностью, четко и замкнуто описать логически, а можно описать только с помощью множества нечетких рекомендаций и эвристических правил. В этом случае человека нельзя заменить техническими вспомогательными средствами.

3. Интуитивная последовательность операций содержит комплекс неразделимых операций, для выполнения которых нельзя использовать ни логику, ни эвристические правила. Здесь решающими становятся такие качества инженера, как стиль мышления, ассоциации, фантазия, воображение, а также внешняя обстановка (окружающая среда, социальная и идеологическая обстановка и т. д.). Очевидно, что интуиция не может быть предметом методического исследования.

Система эвристических методов, содержащая множество правил, рекомендаций и программ, позволяет принять решение в процессе проектирования РЭА. Процесс принятия решения состоит из следующих основных шести этапов: 1) выявление проблемы; 2) постановка задачи; 3) поиск решения; 4) принятие решения; 5) выполнение решения; 6) оценка полученного результата.

Основная структура процесса принятия решения представлена на рис. 3.1.

Применительно к проектированию РЭА перечисленные выше этапы имеют следующий смысл:

1. Выявление проблемы — определение потребности в разработке нового устройства РЭА. Предполагается, что необходимость в новом устройстве доказана, поэтому в курсовом проектировании этот этап опускается.

2. Постановка задачи — формирование требований к изделию. На этом этапе разрабатывается расширенное техническое задание, которое представляет собой документ, устанавливающий основное

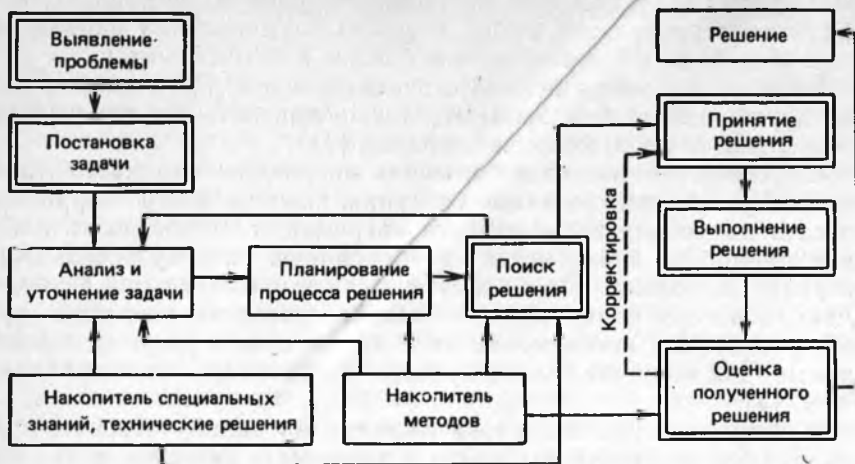


Рис. 3.1. Структура процессов решения творческих задач

назначение и показатели качества изделия, технико-экономические и специальные требования, предъявляемые к изделию (стадия проектирования — ТЗ и техническое предложение).

3. Поиск решения — подбор вариантов конструкций, удовлетворяющих сформулированным на 2-м этапе требованиям, или разработка нового варианта (стадия проектирования — эскизный проект).

4. Принятие решения — выбор предпочтительного варианта из выбранных по критерию качества, который оговаривается в постановке задачи (стадия проектирования — технический проект).

5. Выполнение решения — разработка конструкторской документации на выбранный вариант конструкции РЭА, изготовление опытного образца (стадия проектирования — рабочий проект).

6. Оценка полученного результата — сравнение показателей и параметров разработанной РЭА с техническим заданием.

Студент в процессе работы над курсовым проектом по конструированию РЭА выполняет этапы 2, 3, 4 и (частично) 5.

Результатом выполнения 2-го этапа процесса принятия решения является оформленное расширенное техническое задание и анализ существующих конструкций.

Рассмотрим подробнее содержание отдельных пунктов технического задания, приведенного в Приложении 3.

В пункте 2 «Назначение изделия» осуществляется выбор типа проектируемой РЭА по следующим классификационным признакам [22].

Радио-, оптическая и проводная связь — передача радиосигналов от одного абонента к другому. При наличии промежуточных

приемопередающих устройств получают радиорелейные линии связи.

Радиовещание и телевидение — передача речевых, музыкальных и визуальных сообщений большим группам людей.

Радиоуправление — управление с помощью радиосигналов различными объектами.

Радиотелеметрия — получение информации о работе и состоянии объектов и людей с помощью линий связи.

Радиометеорология — получение информации с помощью искусственных спутников Земли и наземных комплексов о факторах, определяющих погоду.

Радиолокация — определение координат и характеристик объекта с помощью излучаемых и принимаемых радиосигналов.

Радионавигация — особо точное местоопределение объекта с помощью специальных источников радиоизлучения.

Радиоастрономия — получение информации о космических объектах с помощью приема и анализа их радиоизлучения.

Медицинская радиоэлектроника — использование методов и средств радиоэлектроники в биомедицинских исследованиях, в качестве электронных стимуляторов, в создании протезов и диагностических систем.

Радиоизмерения — использование радиоаппаратуры для измерения или имитации различных сигналов.

Устройства обработки данных — часть более сложных радиосистем, предназначенные для ввода и вывода данных, и их обработка с высокой точностью и надежностью.

Устройства записи и воспроизведения сигналов.

Устройства энергетического характера — приспособления для непосредственного воздействия на свойства материалов или объект управления с помощью электромагнитных полей, напряжений или токов.

В пункте 3 «Комплектность изделия» приводятся состав изделия, например блок питания, микропроцессор, пульт управления, дисплей для изделия «Вычислительное устройство». В графах «Покупные изделия» указываются модули 1-го и 2-го уровней, не разрабатываемые конструктором изделия.

В пункте 4 «Технические параметры» указываются основные параметры РЭА, которые влияют на конструкцию устройства, например: потребляемая мощность или энергия, рабочий диапазон радиочастот, длительность и скважность входных и выходных импульсов, уровни логических нулей и единиц для РЭА на цифровых микросхемах, рабочие напряжения и токи в цепях устройства и т. д.

В пункте 5 «Характеристики стандартизации и унификации» определяются типовые конструкции ячеек, блоков, каркасов, стоек, пультов и т. д., система которых регламентируется ГОСТ 20504—81. Для оценки уровня стандартизации изделия используются коэффициенты применяемости $K_{пр}$ и повторяемости $K_{п}$ стан-

Таблица 3.1. Характеристики внешних воздействий

Групп РЭА	Основные						
	Окружающая температура, К		Относительная влажность, %, при 298 К	Удары			
	T_{\min}	T_{\max}		Длительность t_H , мс	Ускорение a_H , м/с ²	Частота ν_H , мин ⁻¹	
Стационарная РЭА, работающая в отапливаемых помещениях (1-я группа)	233	328	80	—	—	—	
Стационарная РЭА, работающая на открытом воздухе (2-я группа)	233	333	93	—	—	—	
Возимая РЭА на транспорте (3-я группа)	Автомобильный	233	333	93	5...10	147	40...80
	Гусеничный	233	333	93	5...10	147	40...80
	Железнодорожный	233	333	93	3...10	392	40...80
Судовая РЭА (4-я группа)	Большие суда	233	333	93	5...10	147	40...80
	Малые суда				5...10	147	40...80
Носимая и портативная РЭА, работающая на открытом воздухе (6-я группа)	233	333	93	5...10	98	40...80	
Носимая и портативная РЭА, работающая в отапливаемом помещении (7-я группа)	233	328	80	5...10	98	40...80	
Самолетная РЭА, работающая в штатных условиях	233	328	93...100 при $T = 321...330\text{K}$	15	117,7	—	
Самолетная РЭА, работающая в аварийных условиях	233	333	98 при $T = 313\text{K}$	5...10	736	—	
Ракетная РЭА	233	328	100	10...12	981	—	
Космическая РЭА	233	328	—	—	—	—	

дартизованных, нормализованных и унифицированных составных частей изделия.

В пункте 6 «Требования к конструкции» устанавливаются требования к внешнему виду изделия, определяемые правилами технической эстетики и условиями эксплуатации. Здесь могут быть указаны форма изделия (прямоугольная, сферическая, цилиндрическая), цвет и материал покрытия, габаритные размеры и масса изделия. Особо оговаривается уровень генерируемого шума (дБ),

характеристики				Дополнительные условия
Вибрации		Линейные ускорения, м/с ²	Пониженное атмосферное давление Н, кПа	
Диапазон частот $f_{\text{н}} \dots f_{\text{в}}$, Гц	Виброускорение a , м/с ²			
10...30	19,6	—	61	—
10...30	19,6	—	61	Воздействие инея и росы, дождя, воздушно-пылевого потока. ГОСТ 16019—78
4...80	78,5	3,12	61	Возникновение инея и росы, дождя, воздушного потока, ГОСТ 16019—78
3...30	19,6	—	61	
2...100	19,6	3,12	61	
4...100	78,5		61	
5...150	58,9			
10...70	37	—	61	
10...30	10,7	—	61	
5...2000	0,98...196		2	
10...70	19,6...34,3		2	
0...500 1,5...2500	196,2 4,9...58,9		0,12 0	

допускаемая температура поверхности корпуса, интенсивность электромагнитного излучения. Последнее определяется санитарными нормами и правилами для рабочих мест и окружающей среды.

В пункте 7 «Характеристики внешних воздействий» приводятся: диапазон температур ($t_{\text{мин}}, \dots, t_{\text{мах}}$, К); относительная влажность (например, 80% при $t=293$ К); длительность $\tau_{\text{н}}$, ускорение $a_{\text{н}}$ ударных импульсов; число ударных импульсов в минуту $\nu_{\text{н}}$; диапа-

зон частот вибрации ($f_H \dots f_B$); амплитуда виброускорения $a(f)$; линейное ускорение, m/c^2 ; пониженное атмосферное давление H_{min} , кПа; скорость воздушно-пылевого потока v , м/с. Характеристики приводятся в режиме хранения и перевозки, а также в режиме работы. Кроме того, в режиме работы определяются характеристики внешних электрического, магнитного и электромагнитного воздействий: напряженность электрического поля E_B , В/м; магнитная индукция B_B , Тл; плотность потока мощности электромагнитного излучения помехи P , мВт/см². При необходимости указываются дополнительные требования: характеристики ионизирующего излучения, солнечной радиации, биологических факторов (плесневые грибки, насекомые, грызуны и др.).

В табл. 3.1 приведены характеристики внешних воздействий для различных групп РЭА в режиме работы [22]. Характеристики внешних воздействий в режиме хранения и транспортирования определяются из табл. 3.1 в зависимости от транспортного средства. По требованию руководителя курсового проекта могут быть представлены частные требования к конструкции РЭА, отличающиеся от приведенных в табл. 3.1.

В пункте 8 «Интерфейс оператора» устанавливаются требования эргономики к конструкции РЭА. Эти требования характеризуют систему оператор — изделие и состоят из двух видов групп: антропометрических и психофизиологических. Здесь указывается, в какой обстановке взаимодействует оператор с изделием, время взаимодействия, характер действий оператора (выработка сигналов управления или прием сигналов от изделия), элементы управления и индикации видимые и невидимые оператору.

Пункт 9 «Входная — выходная информация» содержит сведения о сигналах, поступающих на вход разрабатываемого РЭУ, и о выходных сигналах: спектры сигналов; длительность, амплитуда и частота следования импульсов; напряжения, токи и т. д.

В пункте 10 «Надежность» задается среднее время между отказами изделия либо вероятность безотказной работы за определенное время $P(t)$. Здесь же могут быть указаны методы испытаний на надежность.

Ниже приведен пример оформления расширенного технического задания на изделие «Прибор поиска неисправности».

1. Наименование изделия: «Прибор поиска неисправностей» (ППН).

2. Прибор поиска неисправностей предназначен для отыскания неисправностей ячейки или группы ячеек в блоках цифровой приемной аппаратуры. Поиск неисправностей осуществляется путем проверки наличия контролируемых сигналов на контактах соединителей блоков.

3. Прибор комплектуется двумя кабелями для подключения к соединителям блоков. Кабели предусматривают использование в ППН розеток РП-15-50ГВВ.

4. Диапазон контролируемых напряжений постоянного тока от -15 до $+50$ В. Контролируемые импульсы имеют длительность более 0,5 мкс и напря-

жение до 4,0 В. Питание ППН от сети постоянного тока напряжением 5 В, потребляемый ток — не более 2 А.

5. Коэффициент применяемости — не менее 0,6.

6. Прибор поиска неисправностей относится к группе возимой РЭА. Габаритные размеры прибора не должны превышать $320 \times 160 \times 170$ мм. Масса — не более 4,5 кг. Конструкция прибора должна предусматривать возможность винтового крепления в стойке, размещенной внутри автомобиля. Прибор не должен иметь конструктивных элементов с резонансными частотами в диапазоне 5 ... 25 Гц.

7. Характеристики внешних воздействий одинаковы для режимов хранения, перевозки и работы. Температура окружающей среды может изменяться от -50 до $+65^\circ\text{C}$. Относительная влажность до 98 % при температуре $+30^\circ\text{C}$. Воздействие ударных нагрузок с ускорением до $15g$ длительностью до 10 мс. Вибрация в диапазоне частот 10 ... 80 Гц с ускорением до $3g$. Пониженное атмосферное давление 61 кПа. Линейные ускорения до $2g$. Прибор должен выдерживать воздействия инея и росы.

8. На передней панели прибора должны находиться элементы ручного управления человеком-оператором и элементы индикации неисправностей. Задняя стенка прибора должна быть свободной от каких-либо элементов управления. Расположение передней панели — вертикальное.

9. На вход ППН поступают следующие электрические сигналы:
напряжение постоянного тока положительной полярности $+3$; $+5$; $+6,3$; $+12,6$; $+27$; $+50$ В;
напряжение постоянного тока отрицательной полярности $-6,3$; $-12,6$ В;
последовательность импульсов положительной полярности напряжением 2,4 ... 4,0 В длительностью 0,5 мкс.

Выходная информация о работоспособности ячеек контролируется оптическими устройствами.

10. Среднее время наработки на отказ T_0 должно быть не менее 30 тыс. ч.

11. Среднее время восстановления не более 4 ч. Гарантийный срок эксплуатации — 2 г. Запасные инструмент и приспособление не предусматриваются.

12. Конструкция ППН должна предусматривать работу оператора с ними без применения специальных мер обеспечения безопасности.

13. Программа выпуска — 100 приборов в год. Себестоимость прибора не более 500 руб.

13. Программа выпуска — 100 приборов в год. Себестоимость прибора не более 500 руб.

Студент должен отчетливо понимать поставленную задачу. Значительный психологический эффект для понимания дает анализ и уточнение постановки задачи проектирования. Методически оправдано представление будущего устройства в виде «черного ящика» (рис. 3.2). Структура уточнения постановки задачи проектирования приведена на рис. 3.3 [11].



Рис. 3.2. Модель «черного ящика»



Рис. 3.3. Структура уточнения постановки задачи проектирования

Если постановка задачи уточнена, то, как следует из рис. 3.1, можно продумать план выполнения курсового проекта. При планировании принципиально надо пройти две ступени: сначала наметить стратегию, согласно которой задача рассматривается от начала до конца по укрупненным этапам, а затем тщательно планировать ее осуществление, т. е. выполнение отдельных этапов. Настоящее пособие является стратегическим планом работы над курсовым проектом.

Наиболее ответственными этапами в процессе проектирования РЭА является поиск и принятие решения. При этом следует придерживаться основных принципов [11].

Первый принцип — нужно действовать: так точно, как необходимо, так просто, как допустимо. Он соответствует требованию о достаточной надежности и гарантии технического решения в рамках данных экономических возможностей.

Второй принцип — принцип повторного использования апробированных на практике решений. На рис. 3.4 показана схема алгоритма работы конструктора, решающего конструкторско-технологическую задачу. Сначала он выясняет, какие из уже имеющихся решений можно взять без изменений. Если таких решений нет, то он пытается использовать и приспособить наиболее близкие прототипы. Если и таковых нет, то он заново разрабатывает изделие или его подсистемы, узлы и элементы.

При курсовом проектировании перед студентом обычно стоит задача подобрать пригодные для сравнения варианты технического решения поставленной задачи, выбрать и доработать какое-либо

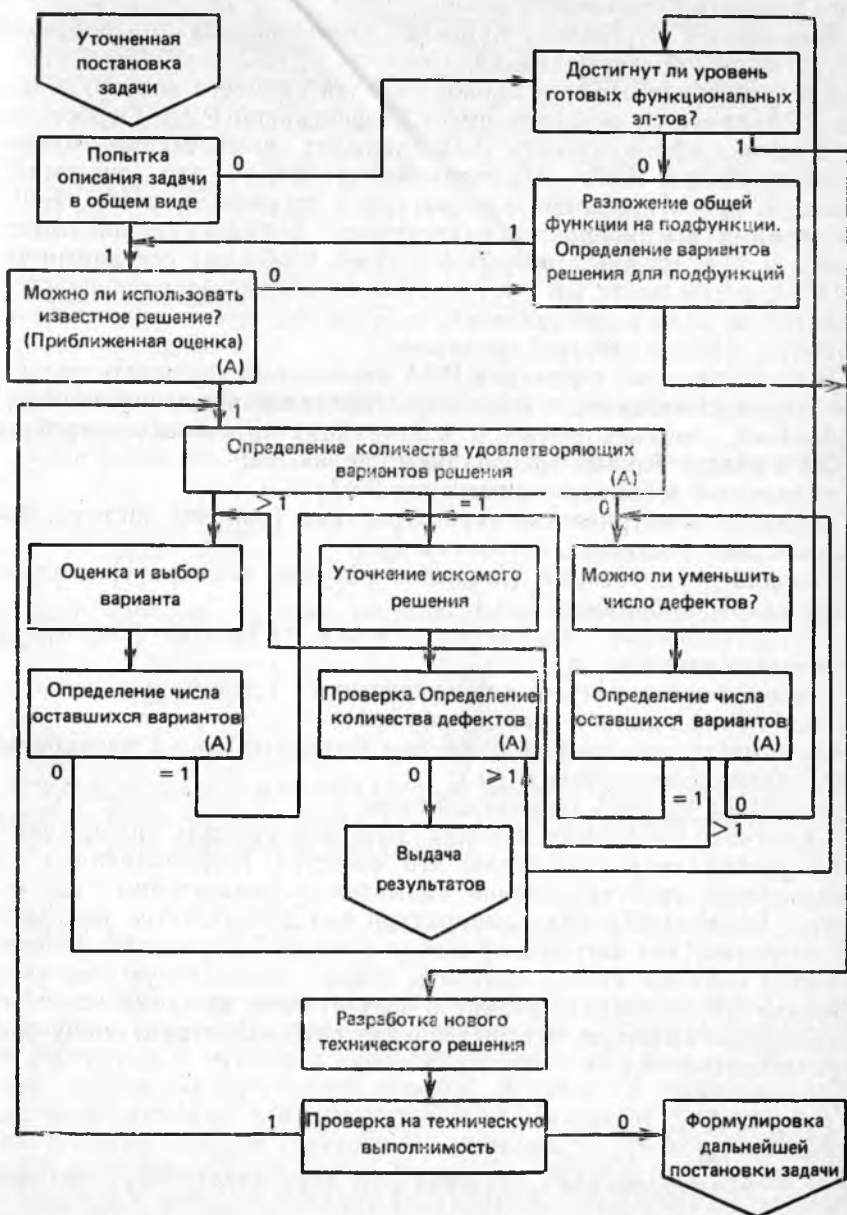


Рис. 3.4. Процесс поиска решения

одно техническое решение. Далее будут подробно рассмотрены основные аспекты этой задачи — задачи поиска и выбора технического решения.

Выполнение курсового проекта заканчивается разработкой конструкторской документации.

Следует отметить, что главной задачей процесса конструирования РЭА является создание высокоэффективной РЭА. Особое место в оценке эффективности РЭА занимает комплексная микроминиатюризация РЭА. Микроминиатюризация — это системный подход к проектированию аппаратуры с применением ИС, БИС, облегченных высокопрочных материалов, функциональной электроники и т. д. Нужно стремиться к тому, чтобы все составные части РЭА, в том числе СВЧ-устройства, источники вторичного электропитания, электромеханические устройства, имели минимальные габариты, массу и энергопотребление.

В процессе проектирования РЭА необходимо учитывать множество взаимосвязанных, а иногда и противоречивых технических требований, предъявляемых к конструкции отдельных устройств и РЭА в целом. Такими требованиями являются:

- назначение и область применения РЭА;
- заданные электрические характеристики (рабочие частоты, быстродействие, мощность, точность и др.);
- условия эксплуатации (диапазон рабочих температур, влажность, удары, вибрации и т. д.);
- конструкционные параметры (масса, габариты, надежность, тепловые режимы и т. д.);
- технико-экономические характеристики (стоимость, технологичность, унификация и стандартизация);
- организационно-производственные факторы (сроки разработки РЭА, серийность и др.);
- наличие и уровень элементной базы.

Совокупность свойств изделия, удовлетворяющих приведенным выше требованиям, определяет его качество. Количественные характеристики свойств изделия называются показателями его качества. Радиоэлектронная аппаратура имеет множество показателей качества, что затрудняет выбор лучшего варианта. Оценку качества изделия можно получить, введя однозначную целевую функцию $\varphi(x_j)$, которая ставит в соответствие каждому варианту конструкции вместо m частных показателей качества x_j одну скалярную величину:

$$\varphi(x_j) = \sum_{j=1}^m \bar{x}_j \Psi_j,$$

где \bar{x}_j — нормированное значение j -го показателя; Ψ_j — весовой коэффициент j -го показателя, причем $\sum_{j=1}^m \Psi_j = 1$.

Таблица 3.2. Таблица экспертных оценок

Показатель качества, x_j	Весовые коэффициенты Ψ_j					
	Цифровые блоки стационарной РЭА	Бытовая переносная РЭА	Самолетная связная аппаратура	Автомобильная РЭА	Цифровая РЭА	
					больших судов	малых судов
Интенсивность отказов λ ,	0,32	0,26	0,18	0,26	0,33	0,27
Потребляемая мощность $P_{\text{потр}}$	0,25	0,1	0,15	0,16	0,13	0,14
Объем V	0,1	0,1	0,26	0,28	0,21	0,28
Масса m	0,1	0,21	0,31	0,18	0,13	0,19
Стоимость C	0,23	0,33	0,1	0,12	0,2	0,12

Нормированные показатели качества определяются следующими выражениями [2]:

если качество изделия улучшается с ростом показателя x_j , то

$$\lambda_j = \frac{x_j - x_{j \min}}{x_{j \max} - x_{j \min}};$$

если качество изделия улучшается с уменьшением показателя, то

$$\lambda_j = \frac{x_{j \max} - x_j}{x_{j \max} - x_{j \min}},$$

где $x_{j \max}$ и $x_{j \min}$ — максимальное и минимальное значения j -го показателя. В случае, когда $x_{j \max}/x_{j \min} > 10$ нормированный показатель определяется из выражения

$$\lambda_j = \frac{\lg x_j - \lg x_{j \min}}{\lg x_{j \max} - \lg x_{j \min}}, \quad \text{либо} \quad x_j = \frac{\lg x_{j \max} - \lg x_j}{\lg x_{j \max} - \lg x_{j \min}}.$$

Определение весовых коэффициентов Ψ_j производится чаще всего эвристическими методами, связанными с учетом мнений группы экспертов. В курсовом проектировании коэффициенты Ψ_j могут быть заданы руководителем проекта. В табл. 3.2 приведены весовые коэффициенты для некоторой РЭА. Значения $x_{j \max}$ показателей, которые следует стремиться уменьшать (масса, стоимость, энергопотребление, объем, интенсивность отказов и т. д.), и $x_{j \min}$ показателей, которые следует увеличивать (коэффициент технологичности, миниатюризации, среднее время наработки на отказ и т. д.) определяются из ТЗ на проект.

3.2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ВЫБОР МЕТОДА КОНСТРУИРОВАНИЯ

При выполнении курсового проекта в качестве исходного материала студент имеет расширенное ТЗ и электрическую принципиальную схему изделия. С анализа и уточнения ТЗ, электрической принципиальной схемы и заданной элементной базы начинается непосредственная работа над конструкцией изделия.

Студент должен тщательно изучить электрическую принципиальную схему изделия, обратив особое внимание на следующие вопросы:

- параметры распространяющихся в схеме радиосигналов (максимальная частота, напряжение, сила токов, длительность и скважность импульсов и т. д.);

- возможность возникновения в схеме паразитных связей и наводок (через общее сопротивление источника электропитания, индуктивные и емкостные);

- пути распространения полезного радиосигнала;

- напряжение и сила тока источников электропитания;

- допустимые уровни напряжений и токов сигнала помехи на входах ИС.

При этом одновременно производится анализ элементной базы изделия, для чего все входящие в схему компоненты вместе со своими техническими параметрами целесообразно представлять в виде таблицы, пример оформления которой показан в табл. 3.3. Анализ элементной базы предполагает изучение следующих вопросов:

- совместимость ЭРЭ и ИС (конструктивная, электрическая, электромагнитная, по условиям эксплуатации);

- соответствие элементной базы условиям эксплуатации, указанным в расширенном ТЗ;

- совместимость элементной базы по надежности.

Массогабаритные характеристики элементов и данные по условиям эксплуатации приведены в паспортных данных на них и в литературе [7, 20].

Рассмотрим пример анализа электрической схемы и элементной базы блока управления светодинамической установкой (БУСУ). Его электрическая принципиальная схема приведена на рис. 3.5.

Электрическая принципиальная схема блока содержит в себе следующие функционально законченные узлы:

- компрессор входного низкочастотного сигнала AR1;

- активные полосовые разделительные фильтры AR2;

- электронные ключи, управляющие выходными усилителями мощности AR2;

- четырёхфазный мультивибратор AR3;

- выходной усилитель мощности AR3;

Таблица 3.3. Характеристика элементной базы

Наименование элемента	Кодичество, шт.	Конструктивные параметры			Допустимые условия эксплуатации				
		Масса, г	Установочная площадь, $\text{м}^2 \times 10^6$	λ_0 1/ч 10^6	Диапазон температур, °С	Вибрация		Ударные перегрузки, г	Линейные ускорения, г
						Частота, Гц	Перегрузки, г		
Транзисторы:									
КТ315В	14	0,18	25	0,5	-60...100	10...600	7,5	2,5	7,5
КТ801А	1	4,0	380	0,7	-40...85	10...600	10	75	25
Тиристор КУ202А	4	24	330	0,85	-55...70	10...600	7,5	75	25
Диоды:									
Д223	10	0,55	100	0,6	-60...100	10...100	10	75	25
Д226	14	2,0	350	0,46	-60...80	2...2500	15	150	150
Стабилитрон КС156А	1	1	60	5	-55...100	10...600	7,5	75	25
Конденсаторы:									
К50-6	12	—	—	2,4	-10...70	5...80	2,5	5	10
К53-1	6	—	—	1,2	-80...85	10...2000	10	20	25
К10-17	4	—	—	0,98	-60...85	10...600	10	20	25
Э10-2	4	—	—	0,82	-60...200	10...600	10	20	25
Резисторы:									
МЛТ-0,125	25	0,15	25	0,3	-60...125	10...2000	15	20	25
МЛТ-0,25	5	0,25	40	0,4	-60...125	10...2000	15	20	25
МЛТ-2	4	3,5	220	0,6	-60...125	10...2000	15	20	25
СП3-16	4	—	—	1,2	-30...90	10...600	15	20	25
Реле РЭС-47	4	9	280	1,6	-60...85	50...1000	15	20	—

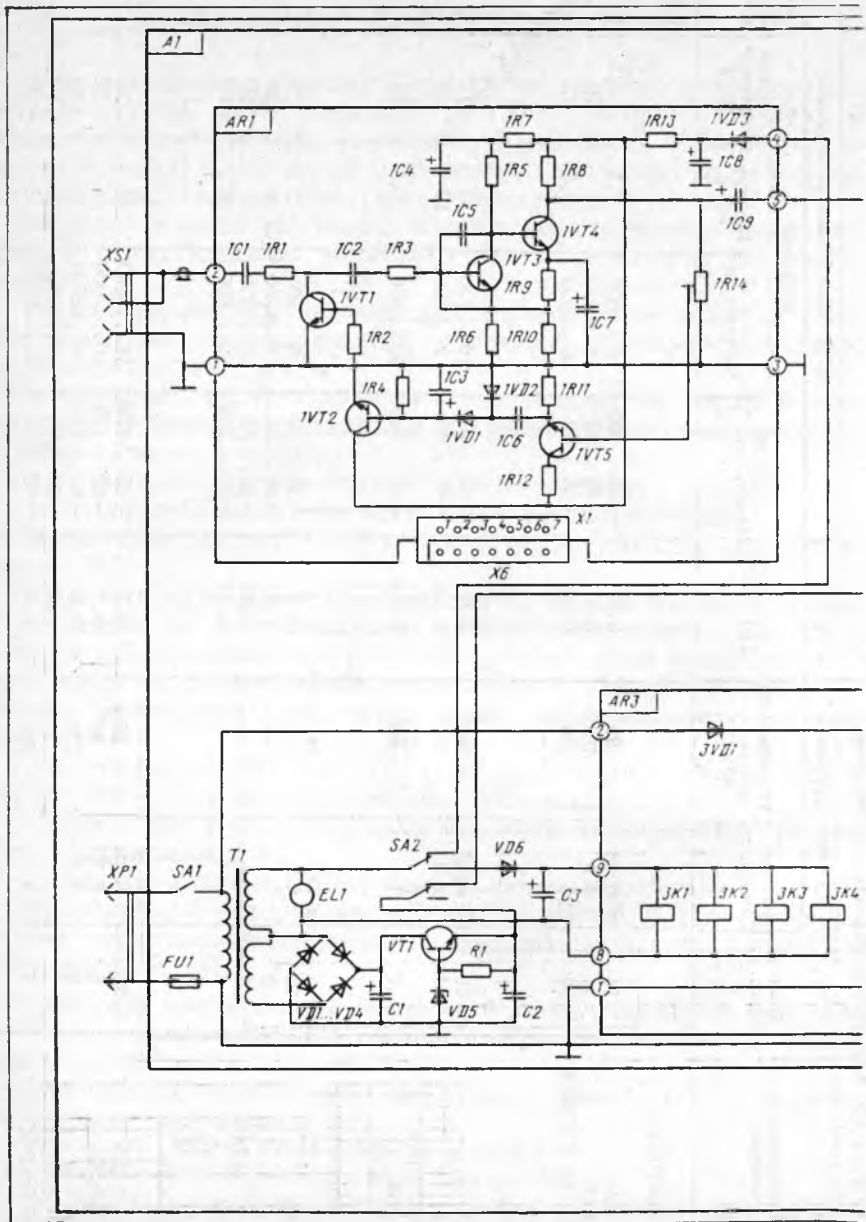
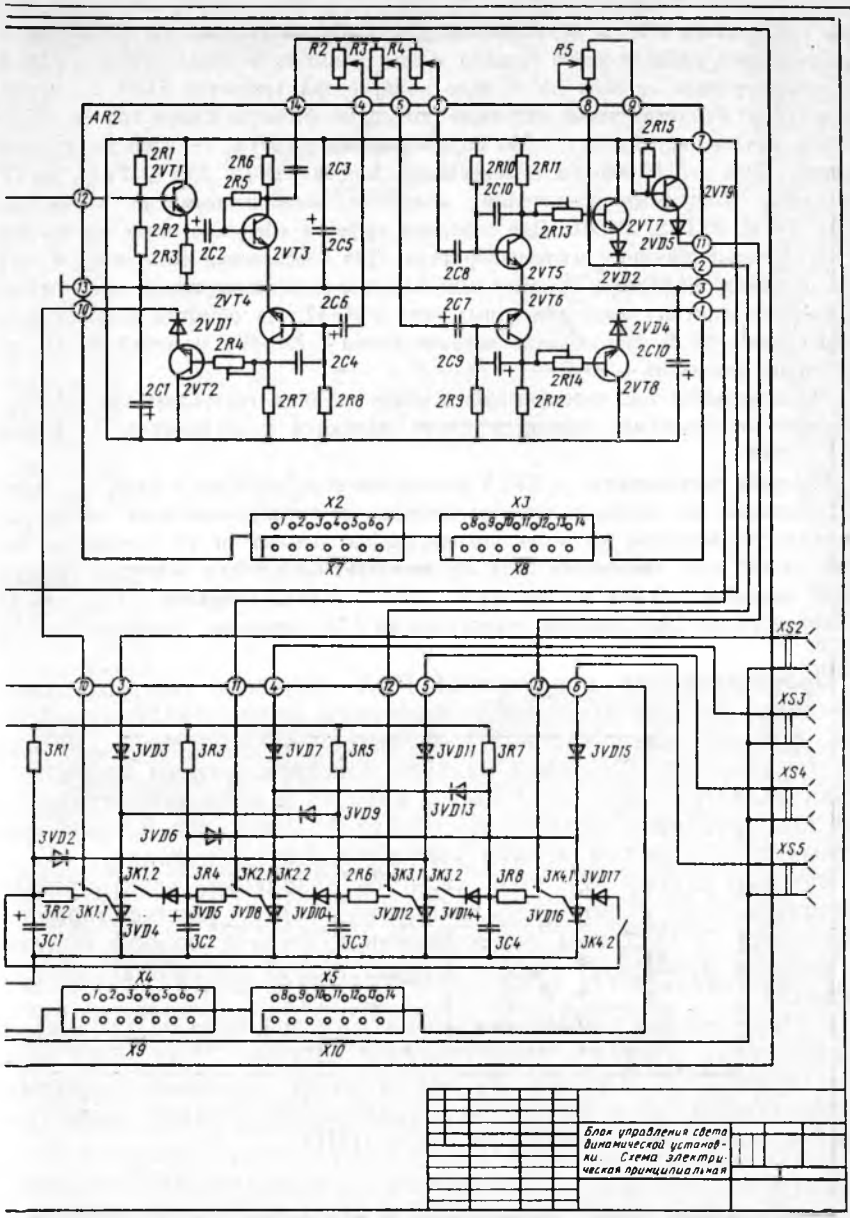


Рис. 3.5. Схема электрическая принципиальная блока управления



светодинамической установкой

цепи коммутации;
источник вторичного электропитания.

Напряжение звуковой частоты (20 Гц ... 26 кГц) от источника поступает через конденсатор 1С1 на управляемый делитель компрессора 1R1, 1VT1. Амплитуда входного управляющего сигнала может меняться в пределах 0,2 ... 20 В, при этом уровень сигнала на выходе компрессора (резистор 1R8) составляет около 0,7 В. Разделительные активные полосовые фильтры имеют три частотные полосы: низкие частоты 20 ... 750 Гц, средние частоты 750 ... 7500 Гц, высокие частоты 7500 ... 16 000 Гц. Электронные ключи (2VT2, 2VT7, 2VT8, 2VT9) управляют выходными усилителями мощности, выполненными на тиристорах 3VD4, 3VD8, 3VD12, 3VD16. Для создания эффекта «бегущие огни» используется схема четырехфазного мультивибратора. Для обеспечения возможности перехода от одного эффекта к другому используются цепи коммутации, выполненные на электромагнитных малогабаритных реле РЭС-47. На обмотки реле подается напряжение +26 В. Напряжение питания блока — 220 В с частотой 50 Гц, потребляемая мощность — 20 Вт.

Максимальный ток, протекающий в цепях питания, составляет 200 мА. Возможными источниками помехи в схеме являются трансформатор Т1 и реле ЗК1 ... ЗК4.

Перечень используемых в БУСУ радиоэлементов приведен в табл. 3.3. Здесь же приведены их основные конструкционные и эксплуатационные параметры. Масса и установочные размеры конденсаторов зависят от их номинала. Как видно из таблицы, элементная база соответствует следующим условиям эксплуатации: диапазон рабочих температур — —10 ... +70°C; вибрация — 10 ... 80 Гц с ускорением до 2,5g; ударные перегрузки до 2,5g; линейные ускорения до 7,5g.

Проектирование современной РЭА основано на модульном принципе, на базе которого разработаны функционально-модульный, функционально-узловой и функционально-блочный методы конструирования. Основной задачей конструкторского проектирования является реализация схемы изделия в виде набора отдельных конструктивно законченных модулей, узлов или блоков, связанных друг с другом цепями электрической коммутации.

Важным этапом при этом является разбиение электрической принципиальной схемы изделия на подсхемы (функциональное разбиение). В курсовом проектировании студент проводит функциональное разбиение, выполняя следующую последовательность операций.

1. Определение примерного числа модулей первого уровня, из которых будет состоять проектируемое изделие. Для этого надо знать суммарную площадь S_{Σ} , занимаемую радиокомпонентами, составляющими электрическую принципиальную схему изделия и устанавливаемыми на печатную плату (ПП):

$$S_{\Sigma} = k_s \sum_{i=1}^n S_{y i},$$

где S_{yi} — установочная площадь i -го компонента [20]; k_s — коэффициент, зависящий от назначения и условий эксплуатации изделия ($k_s = 1 \dots 3$).

Исходя из требований на габаритные размеры изделия, указанных в ТЗ, ориентировочно определяется типоразмер ПП для модулей первого уровня. При этом желательно использовать унифицированный ряд размеров ПП (ОСТ4.010.020—83 «Платы печатные. Основные размеры»): 170×75 , 170×200 , 170×150 мм.

Разделив суммарную площадь компонентов S_2 на площадь печатной платы выбранного типоразмера, можно получить число модулей первого уровня. Следует отметить, что такой подход является оценочным; число модулей может быть скорректировано исходя из условий эксплуатации, назначения изделия, состава его электрической функциональной схемы, применяемого технологического процесса изготовления и т. д. Кроме того, часть электрических компонентов, такие как устройства управления и индикации, выходные и входные элементы электрической коммутации, не могут быть размещены на ПП, они устанавливаются на переднюю или заднюю панель изделия. При функциональном разбиении такие элементы должны быть заранее выделены в отдельную под-схему.

Более точно определить число ячеек в блоке можно на этапе предварительной компоновки, когда будут выбраны варианты конструкции блока и его размеры.

2. Разбиение электрической принципиальной схемы на подсхемы, соответствующие модулям первого уровня. При этом схему представляют ненаправленным мультиграфом, в котором каждому конструктивному элементу (модулю нулевого уровня) ставят в соответствие вершину мультиграфа, а электрическим связям схемы — его ребра. Тогда задача разбиения заключается в том, чтобы «разрезать» мультиграф $G(X, U)$ на отдельные куски $G_1(X_1, U_1)$, $G_2(X_2, U_2), \dots, G_k(X_k, U_k)$ так, чтобы число ребер, соединяющих эти куски, было минимальным [5]. Здесь X — множество вершин, U — множество ребер. Методика расчета изложена в § 4.1.

После функционального разбиения электрической принципиальной схемы изделия необходимо провести анализ существующих конструкций и рассмотреть сравнительные технические характеристики аналогичных конструктивных решений устройства с учетом требований миниатюризации, надежности, качества. При этом следует учитывать особенности проектирования конструкции РЭА в зависимости от функционального назначения, условий эксплуатации, размещения и свойств объекта-носителя.

В настоящее время используются несколько признаков классификации РЭА: по месту размещения [4] (рис. 3.6); по функциональному назначению (см. § 3.1). Кроме этого, можно выделить несколько групп отдельных модулей РЭА первого и второго уровней по характерным признакам обрабатываемых или генерируемых

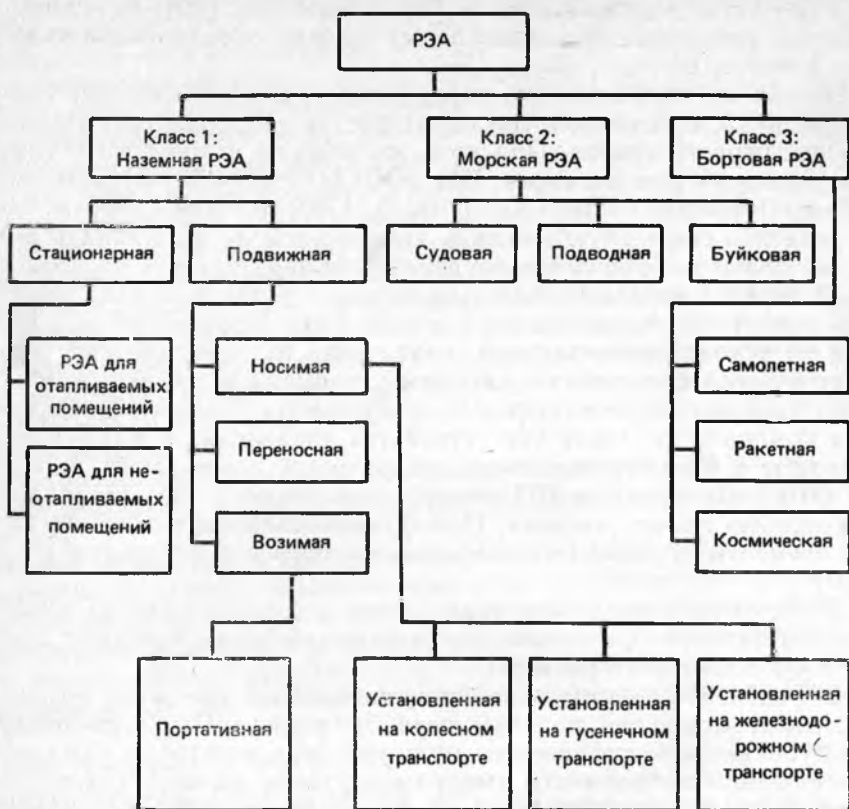


Рис. 3.6. Классификация РЭА по месту размещения

электрических сигналов (рис. 3.7), т. е. классифицировать их по функциональным признакам.

Рассмотрим характерные особенности конструирования некоторых из этих модулей РЭА.

Источники электропитания. Источники электрической энергии, являющиеся неотъемлемой частью любых радиотехнических устройств, представляют собой комплексы элементов, приборов и аппаратов, вырабатывающих электрическую энергию и преобразующих ее к виду, необходимому для нормальной работы радиоустройств.

Все источники электропитания могут быть разделены на две группы:

- источники первичного электропитания;
- источники вторичного электропитания.



Рис. 3.7. Классификация модулей РЭА по характеру электрических сигналов

Источниками первичного электропитания называются устройства, преобразующие различные виды энергии в электрическую. К ним относятся электрические генераторы переменного и постоянного тока, электрохимические источники тока, термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи, фотоэлектрические преобразователи (солнечные батареи) и атомные батареи, преобразующие соответственно механическую, химическую, тепловую, световую энергию и энергию внутриатомного распада в электрическую.

Источниками вторичного электропитания (ИВЭП) называются устройства, преобразующие электрическую энергию одного вида в другой. К ним относятся преобразователи переменного напряжения в постоянное (выпрямители), преобразователи постоянного напряжения в переменное (инверторы), преобразователи переменного напряжения (трансформаторы), преобразователи частоты переменного тока (умножители и делители частоты), аккумуляторные батареи и др.

В связи с тем, что разработчикам и изготовителям РЭА источники первичного электропитания поставляются как комплектующие покупные изделия, представляется целесообразным сделать акцент на разработку ИВЭП, которые, как правило, разрабатываются конструкторами как оригинальные изделия.

Дадим сначала классификацию ИВЭП по мощности и напряжению. По мощности они делятся на источники малой и большой мощности. По напряжению подразделяются на:

милливольтные с напряжением до 1 В;

Таблица 3.4. Рекомендуемые значения напряжений блоков питания

Номинальные значения напряжений, В					
0,1	1	10	100	1000	10000
0,15	1,2	12,6	125	1250	12000
	1,5	15	150	1500	15000
	2,0	20	200	2000	20000
0,25	2,4	27	250	2500	25000
	3,15	30	300	3000	30000
			350	3500	35000
0,4	4,0	40	400	4000	40000
	5,0	50	500	5000	50000
0,6	6,3	60	600	6000	60000
	8,0	80	800	8000	80000

Таблица 3.5. Рекомендуемые значения токов блоков питания

Номинальные значения токов, мА						
0,1	1	10	100	1000	10000	100000
(0,11)	(1,1)	(11)	(110)	(1100)		
(0,12)	(1,2)	12	120	1200	12000	120000
(0,14)	(1,4)	(14)	(140)	(1400)		
0,15	1,5	15	150	1500	15000	150000
(0,18)	(1,8)	(18)	(180)	(1800)		
(0,2)	(2)	20	200	2000	20000	200000
(0,22)	(2,2)	(22)	(220)	(2200)		
0,25	2,5	25	250	2500	25000	250000
(0,28)	(2,8)	(28)	(280)	(2800)		
(0,3)	3	30	300	3000	30000	300000
(0,35)	(3,5)	(35)	(350)	(3500)		
0,4	4	40	400	4000	40000	400000
(0,45)	(4,5)	(45)	(450)	(4500)		
(0,5)	5	50	500	5000	50000	500000
(0,56)	(5,6)	(56)	(560)	(5600)		
0,6	6	60	600	6000	60000	600000
(0,7)	(7)	(70)	(700)	(7000)		
(0,8)	8	80	800	8000	80000	800000
(0,9)	(9)	(90)	(900)	(9000)		

низковольтные с напряжением до 500 В;
высоковольтные с напряжением 500 В и выше.

Часть современных РЭУ, представляющих собой точные измерительные приборы, предъявляют весьма высокие требования к стабильности питающих напряжений. Поэтому ИВЭП целесообразно подразделять на стабилизированные и нестабилизированные.

Источники электропитания переменного напряжения делятся по частоте от 50 Гц до десятков килогерц. Увеличение частоты переменного тока ИВЭП позволяет уменьшить габаритные размеры и массу трансформаторов, дросселей, фильтров и, следовательно, самих ИВЭП.

Стандартными частотами переменных токов являются частоты 50 Гц (наземная промышленная частота) и 400 Гц (самолетная и морская РЭА). Частоты более 1000 Гц пока еще не регламентированы стандартами. В табл. 3.4, 3.5 приведены рекомендуемые номинальные значения напряжений и токов для РЭА. В скобках указаны значения токов, не рекомендуемые для применения в новых разработках.

Проектирование ИВЭП заключается в выборе наиболее рациональной схемы выпрямления, числа и типа вентилях, схемы фильтра и его элементов, в определении параметров трансформатора и сглаживающего дросселя фильтра, в выборе схемы регулирования или схемы стабилизации, определении параметров этих схем, их эксплуатационных характеристик, в выборе — разработке конструкции ИВЭП, в определении их массы, габаритных размеров и стоимости.

Расчет ИВЭП не имеет однозначного решения. Всегда можно разработать несколько устройств с одинаковыми выходными данными, но значительно отличающихся друг от друга по массе, габаритным размерам, стоимости и другим параметрам. Сделать правильный выбор оптимального решения из всего многообразия — это определить требования, предъявляемые к тому или иному виду ИВЭП. Правда, выбор этот осложняется тем, что большинство требований, предъявляемых к источникам питания, имеет противоречивый характер. Так, например, повышение надежности или увеличение КПД источников электропитания вызывает увеличение их массы и габаритных размеров. Повышение требований к стабилизации приводит к снижению КПД. Повышение требований к защите от внешних факторов (влаги, разряженности, радиации) вызывает увеличение габаритных размеров, массы, а следовательно, и стоимости ИВЭП.

В ТЗ ИВЭП учитываются:

- назначение ИВЭП;
- номинальное напряжение и частота тока сети;
- номинальное значение выпрямленного напряжения и тока;
- допустимый коэффициент пульсации на выходе выпрямителя при номинальной нагрузке;
- пределы регулирования выпрямленного напряжения;
- пределы изменения напряжения сети и тока нагрузки;
- допустимые пределы изменения напряжения;
- конструктивные и эксплуатационные требования;
- климатические условия (максимальная и минимальная температура, влажность и давление окружающего воздуха);
- механические воздействия (вибрация, удар).

При конструктивной компоновке ИВЭП необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

1. Элементы схемы должны располагаться таким образом, что-

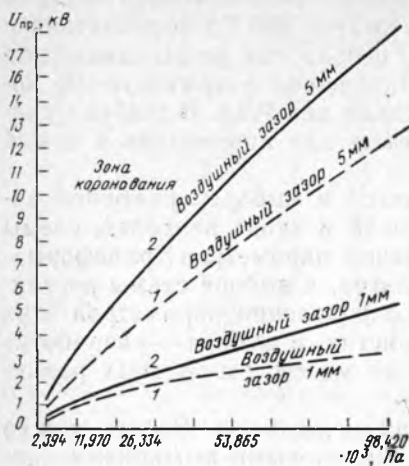


Рис. 3.8. График зависимости пробивного напряжения от атмосферного давления:

1 — на постоянном токе; 2 — на переменном токе

бы электрические связи между ними были возможно более короткими.

2. Для исключения наводок цепей переменного напряжения на цепи выпрямленного напряжения эти цепи следует прокладывать в отдельных жгутах. Жгуты должны быть разнесены друг от друга. С этой же целью трансформатор выпрямителя и дроссель фильтра следует располагать так, чтобы оси их катушек были взаимно перпендикулярны. Трансформаторы и дроссели должны быть по возможности удалены от усилительных элементов.

3. Целесообразно располагать элементы схемы в следующем порядке, начиная от передней панели блока: трансформатор, вентилятор, фильтр, затем стабилизатор, чтобы связи соединителя с выводом стабилизатора были возможно короче. Тяжелые элементы должны быть установлены ближе к точкам крепления шасси.

4. Элементы схемы должны располагаться так, чтобы полупроводниковые приборы (диоды, триоды), а также конденсаторы не подогревались другими элементами, выделяющими тепло (трансформаторами, резисторами и др.).

5. Элементы, находящиеся под высоким потенциалом, должны располагаться отдельно от низковольтных. Не должно быть пересечений высоко- и низковольтных проводов. Высоко- и низковольтные провода нельзя собирать в один жгут.

6. Все элементы должны быть установлены так, чтобы была обеспечена возможность их замены без демонтажа других деталей.

Зависимость атмосферного давления (высотности) от пробивного напряжения по воздуху показана на рис. 3.8.

Для исключения влияния влажности окружающей среды, высотности, а также для улучшения изоляции высоковольтные элементы ИВЭП, скомпонованные вместе, рекомендуется заливать изоляционным составом. Для заливки могут быть использованы различные диэлектрики. При выборе диэлектрика для заливки следует иметь в виду, что при использовании в стабилизаторе высокочастотного преобразователя высоковольтные элементы, и особенно трансформатор, следует заливать диэлектриком с минимальной ди-

электрической проницаемостью. Максимальное пробивное напряжение выбранного для заливки диэлектрика определяет плотность монтажа высоковольтных элементов, а также толщину стенок заливки.

Чаще всего для заливки высоковольтных элементов используются жидкие и воскообразные диэлектрики, а также эпоксидные компаунды. В качестве жидких диэлектриков применяются трансформаторное, конденсаторное и кабельное масла. Жидкие диэлектрики хорошо передают тепло от элементов к стенкам масляной ванны, имеют малую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon_r = 2,1 \dots 2,3$) и достаточно высокую электрическую прочность ($E_{пр} = 12 \dots 20$ кВ/мм). К недостаткам жидких диэлектриков следует отнести старение масел под действием кислорода воздуха, а также резкое ухудшение диэлектрических свойств при попадании в них влаги. Правда, если масляную ванну герметически закрыть, то можно исключить эти недостатки.

Из воскообразных диэлектриков наиболее часто применяются вазелин и церезин. У вазелина $\epsilon_r < 2,6$ и $E_{пр} = 20$ кВ/мм, у церезина $\epsilon_r = 2,1 \dots 2,3$ и $E_{пр} = 15$ кВ/мм. Вазелин представляет собой вязкую массу, а церезин размягчается при температуре $50 \dots 70^\circ\text{C}$. Поэтому высоковольтные элементы вместе с заливочной массой должны быть помещены в коробку.

Компаунды на основе эпоксидных смол после полимеризации быстро отверждаются, т. е. получают неразборные конструкции. Компаунды обладают высокой механической прочностью, гигроскопичны. Электроизоляционные свойства: $\epsilon_r = 3,7 \dots 3,9$; $E_{пр} = 16 \dots 20$ кВ/мм. Кроме этого, для защиты от влаги применяются пропитки лаками и разного вида герметиками.

Защита от перегрева ИВЭП имеет большое значение. При перегреве вентилях ухудшается стабильность напряжения и тока. Существует много способов отвода тепла от нагретых поверхностей элементов. В настоящее время для охлаждения полупроводниковых элементов широко применяют радиаторы. В ряде случаев в качестве радиаторов охлаждения служат стенки шасси, рам.

Пример оформления сборочного чертежа ИВЭП приведен на рис. 3.9.

Примером аппаратуры, производящей аналоговую обработку сигналов, является бытовая РЭА, к которой относятся радиоприемники, телевизоры, магнитофоны и другая подобная аппаратура, отличающаяся тем, что ее производство является, как правило, крупносерийным и массовым.

До недавнего времени при изготовлении бытовой РЭА не стремились к максимальному использованию унифицированных и стандартизированных элементов. Однако требования постоянного совершенствования бытовой РЭА, рост потребительского спроса привели к необходимости создавать типовые, унифицированные конструкции. Этому во многом способствовало появление бытовых

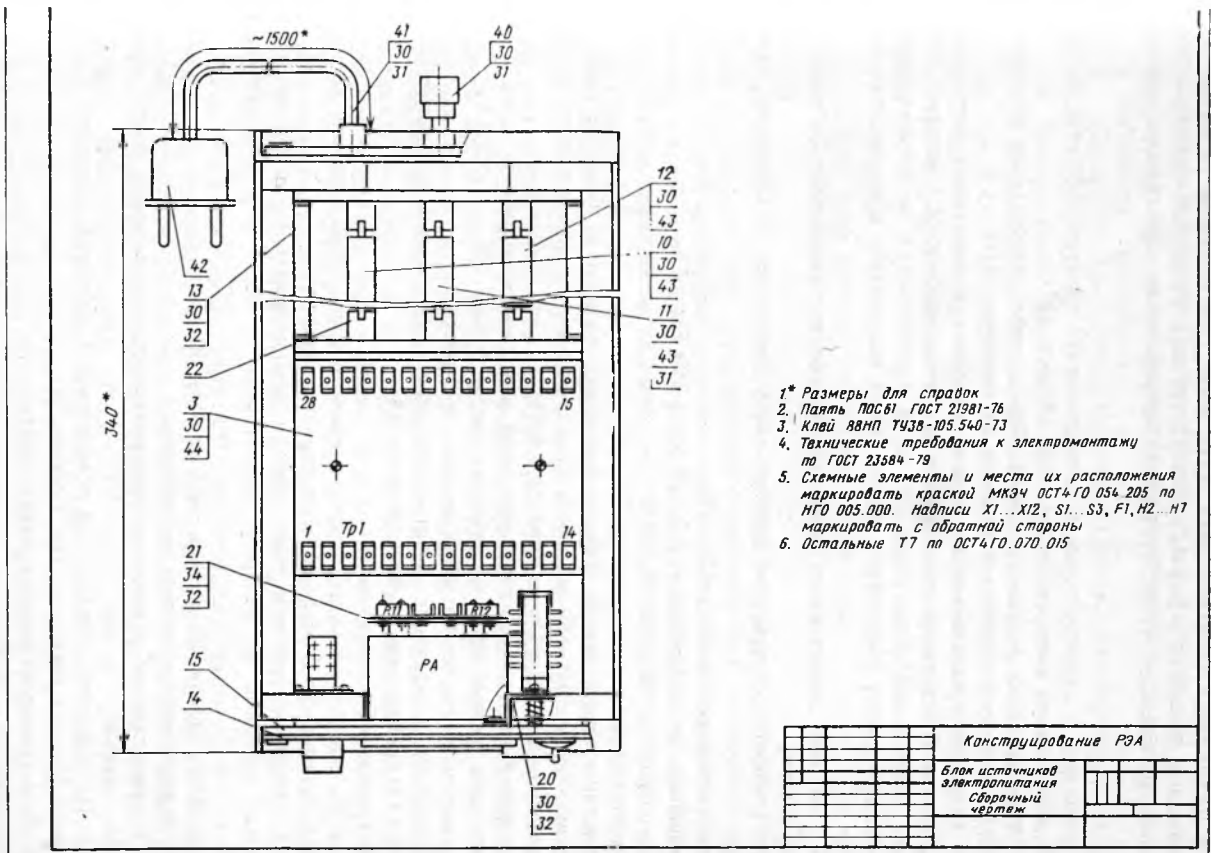
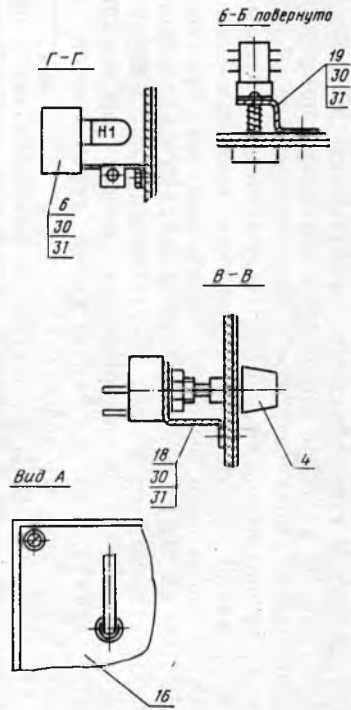
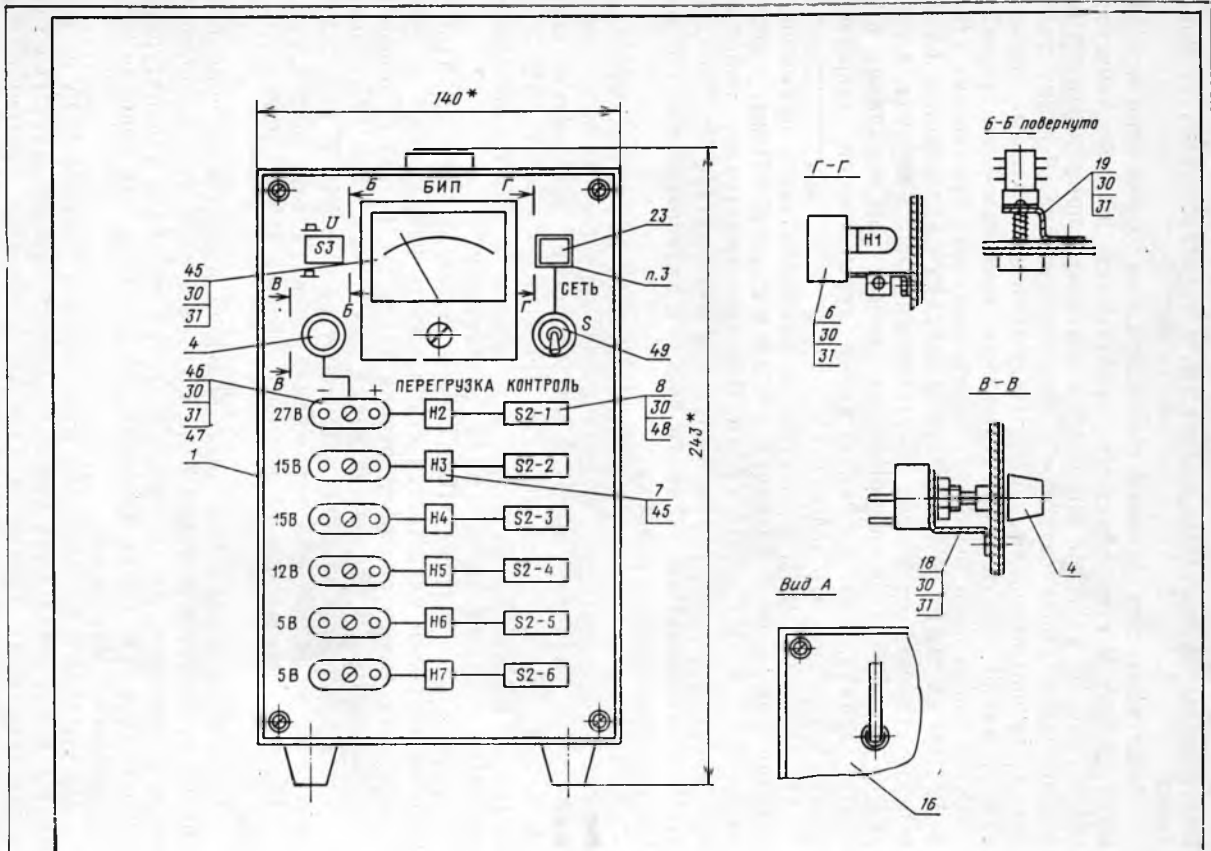


Рис. 3.9. Сборочный чертеж ИВЭП

радиоэлектронных комплексов, представляющих собой совокупность различных сопрягаемых друг с другом устройств, имеющих одинаковое внешнее оформление: усилитель низкой частоты, электропроигрывающее устройство, магнитофонная приставка, тюнер и т. д.

Рассмотрим в качестве примера расширенное ТЗ на проектирование телевизионного приемника цветного изображения «Юность-101».

1. Телевизионный приемник «Юность-101» цветного изображения стереофонический с цифровой обработкой сигналов на кинескопе 42ЛК.

2. Телевизор предназначен для приема цифровых и аналоговых телевизионных сигналов. В телевизоре должна быть обеспечена возможность использования его как законченной функциональной части (приставки) к видеомэгнитофону «ВМ-012», бытовому компьютеру персонального пользования и устройствам для телеигр.

3. Телевизор должен иметь выносную разъемную стереофоническую акустическую систему.

4. Телевизионный приемник должен иметь следующие электрические параметры:

чувствительность не более 50 мкВ;

мощность, потребляемая от сети не более 120 Вт;

напряжение питания $220 \text{ В} \pm 25 \%$;

частота питающего напряжения 50 Гц;

чувствительность канала звука, ограниченная шумами, не более 10 мкВ;

номинальная выходная мощность канала звукового сопровождения на сопротивлении нагрузки 4 Ом не ниже 2×2 Вт;

коэффициент гармоник на номинальной выходной мощности не более 5 %;

диапазон воспроизводимых звуковых частот не уже 100 ... 10 000 Гц;

диапазон регулировки тембров не ниже ± 12 дБ.

5. Уровень унификации и стандартизации, рассчитанный в соответствии с ОСТ 4.ГО.012.040, должен быть не менее 0,8.

6. Требования к конструкции.

6.1. По своей форме, цвету, фактуре, стилю телевизионный приемник должен воспроизводить лучшие образцы бытовой радиоаппаратуры.

6.2. Габаритные размеры телевизора должны удовлетворять условию: относительный удельный вес аппарата должен быть не менее 27 % при заданной массе.

6.3. Масса телевизора должна быть не более 25 кг.

7. Характеристики внешних воздействий.

7.1. Телевизионные приемники транспортируются по железной дороге в заводской упаковке.

7.2. По условиям эксплуатации телевизионный приемник относится к стационарной РЭА 1-й группы по ГОСТ 16019—78.

8. Телевизионный приемник должен иметь:

подключение к сети;

гнездо СГ-3 для подключения стереотелефонов;

гнездо для подключения видеомэгнитофона, телеигровой приставки, персо-

пального бытового компьютера;

квазисенсорное управление всеми режимами работы;

гнездо для подключения антенны;

гнездо для подключения магнитофона;

цифровую индикацию номера программы телевидения.

9. Требования к надежности.

9.1. Среднее время наработки на отказ по результатам испытаний телевизора должно быть не менее 7500 ч.

9.2. Телевизионный приемник должен удовлетворять требованиям ГОСТ 21320—75 «Приемники телевизионные. Нормы надежности, методы испытаний на надежность» и ОСТ 4.205.029—83 «Телевизоры черно-белого и цветного изображения. Общие механические требования по обеспечению надежности».

10. По технике безопасности телевизор должен соответствовать ГОСТ 12.2.006—83.

11. Требования к производству.

11.1. Программа выпуска телевизоров: 50 000 шт./г.

11.2. Себестоимость изготовления телевизора должна быть не выше 400 руб./шт.

Как следует из ТЗ, требования к бытовой аппаратуре достаточно высоки. Кроме того, должны быть гарантированы фирменный стиль и патентная чистота изделия, учтены возможные эргономические решения, выдержаны основные требования современного дизайна: выразительность, гармоничность и композиционная устойчивость, стилевое единство, целесообразность форм и т. д.

Существенные отличительные особенности имеют **модули СВЧ-аппаратуры**, проектируемые главным образом на основе элементов с распределенными параметрами. Требования комплексной микроминиатюризации РЭА привели к широкому использованию в устройствах СВЧ микрополосковых линий передач и элементов на их основе, а также активных полупроводниковых приборов (диодов Ганна, полевых транзисторов и т. д.). Создание широкой номенклатуры полупроводниковых приборов различного функционального назначения позволило перейти к разработке большого числа малогабаритных устройств в виде конструктивно и функционально законченных блоков, способных выполнять такие функции, как генерирование, усиление, преобразование и обработку сигналов. Такие унифицированные устройства получили название модулей [10].

Под *модулем* СВЧ понимается радиоэлектронное изделие СВЧ-диапазона, имеющее законченное конструктивное и схемное выполнение, состоящее из одного или нескольких функциональных узлов СВЧ, неремонтопригодное в условиях эксплуатации, взаимозаменяемое. *Функциональный узел СВЧ* — сборочная единица или деталь, выполняющая одну или несколько функций и предназначенная для работы в СВЧ-диапазоне в составе модуля СВЧ. На рис. 3.10 представлена классификация модулей СВЧ по конструктивно-технологическому исполнению и радиотехническим функциям [10].

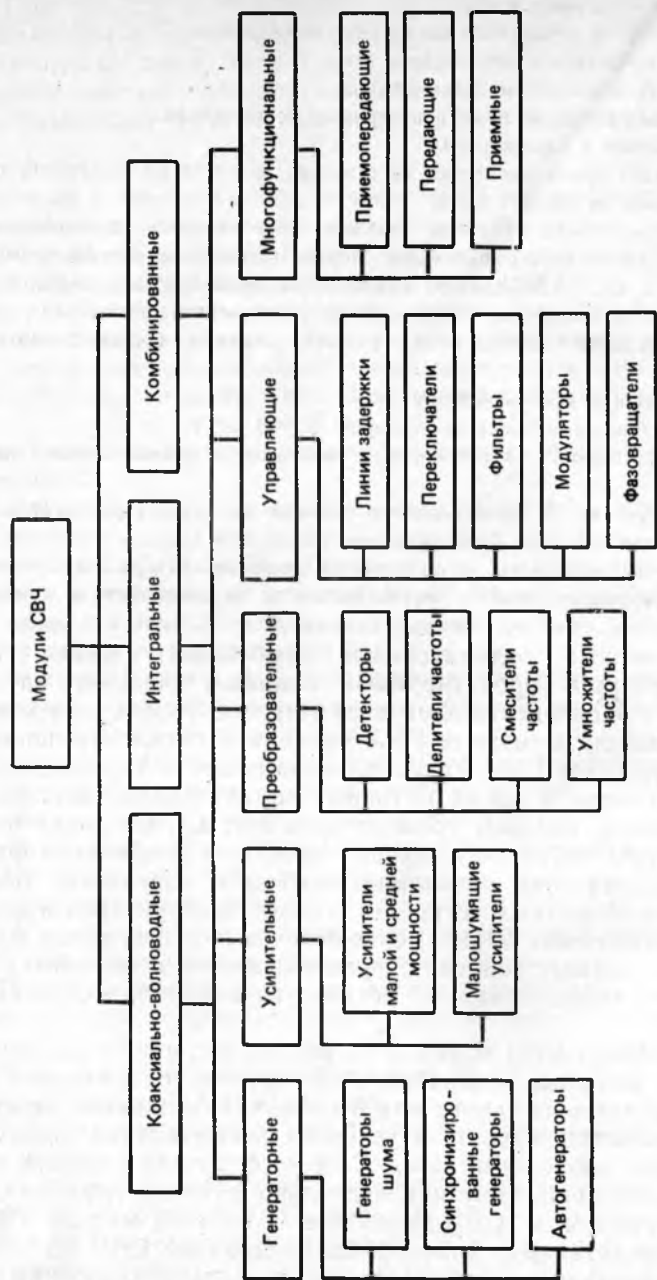


Рис. 3.10. Классификация модулей СВЧ

При разработке конструкции модуля необходимы подробные данные, касающиеся принципов и условий его работы и режимов использования:

электрическая принципиальная схема устройства и основные его характеристики;

диапазон рабочих частот;

проходящая мощность;

наличие и тип навесных компонентов;

число и тип присоединительных элементов;

необходимость герметизации узла и конкретный вид ремонтных работ;

желательный тип конструктивного оформления;

предпочтительный технологический способ изготовления;

предлагаемый объем серийного выпуска.

При конструировании модуля СВЧ прежде всего принимается решение об основных характеристиках конструкции: масса и габариты модуля; степень герметичности корпуса; тип и расположение соединителей; материал подложки функциональных узлов СВЧ; теплоотвод; способ крепления платы в корпусе.

При анализе или выборе элементной базы следует учитывать, что схемы на элементах с сосредоточенными параметрами по своим электрическим характеристикам нередко уступают схемам на элементах с распределенными параметрами. Однако использование элементов с сосредоточенными параметрами позволяет осуществить выигрыш в габаритных размерах, что особенно эффективно в дециметровом диапазоне длин волн.

В результате функционального разбиения электрической принципиальной схемы определяется число плат в модуле СВЧ. Если плат несколько, то появляются проблемы соединения отдельных плат друг с другом, влияния зазора между платами на характеристики схемы. В узлах СВЧ на подложках из органического диэлектрика чаще всего используют одну плату, нередко большого размера; форма ее может быть достаточно сложной, так как подобные диэлектрики легко обрабатываются. В сложных узлах с подложками из неорганических диэлектриков обычно применяют несколько плат прямоугольной формы.

При конструировании **электромеханических устройств РЭА** применяется функционально-узловой метод с применением электромеханических модулей. В настоящее время разработана система электромеханических модулей, разделенная на четыре группы по видам входного воздействия и видам выходного сигнала.

Первая группа — электромеханические модули, имеющие на входе электрический сигнал и на выходе пространственное перемещение. К этой группе относятся: 1) электродвигатели с трубой; 2) электромагнитные муфты.

Вторая группа — электромеханические модули, имеющие на входе пространственное перемещение и на выходе электрический сигнал. К этой группе относятся командные механизмы.

Третья группа — электромеханические модули, имеющие на входе и выходе пространственное перемещение. К этой группе относятся: зубчатые передачи; ограничительные механизмы; соединительные муфты.

Четвертая группа — установочные элементы. К этой группе относятся: стаканы, подогреватели.

В качестве примера применения системы электромеханических модулей при разработке электромеханических устройств РЭА рассмотрим генератор пилообразного напряжения, общий вид которого приведен на рис. 3.11.

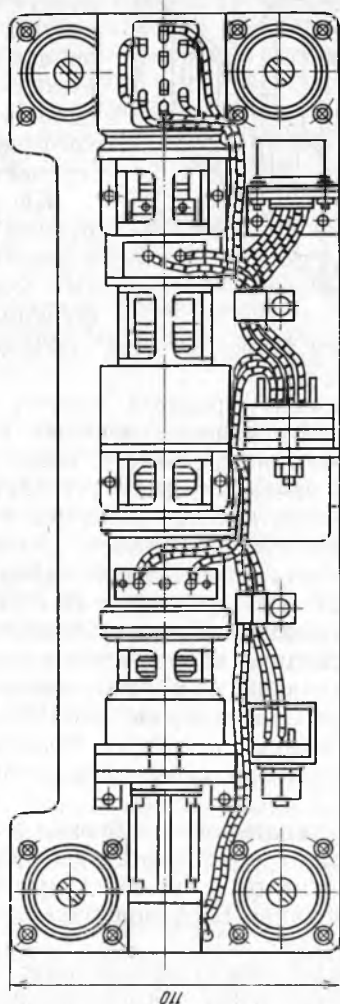
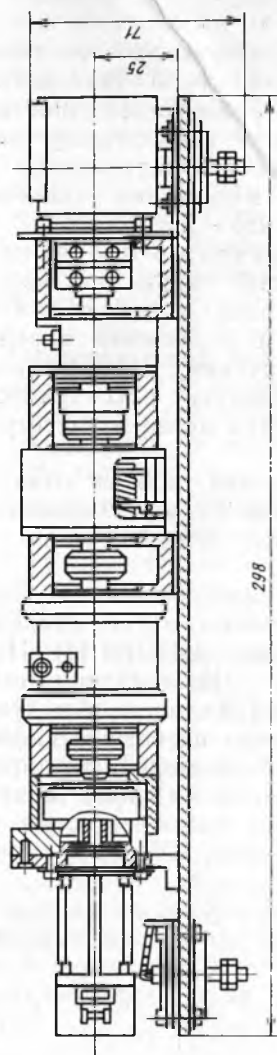
Основные требования, изложенные в ТЗ на генератор пилообразного напряжения, заключаются в том, чтобы разработать малогабаритное электромеханическое устройство, вырабатывающее симметричное линейное пилообразное напряжение с амплитудами $\pm 13,5$ В, длительностью $\tau = 30 \pm 3$ с и нелинейностью выходного сигнала на нагрузке $R_n = 1000$ Ом, не превышающей $\pm 5\%$ при напряжении питания 27 В $\pm 1\%$.

Для расчета основных технических параметров предположительно выбираем двигатель ДП-1-26 ЦР-2К. Его параметры: частота вращения вала $n_{дв} = 7000 \pm 280$ мин⁻¹, $M_{дв} = 0,2$ Н см. В начале определяем необходимую частоту вращения валика потенциометра n . Угол, занятый в потенциометре ПТП-22В1, $\alpha = 330 \pm 1^\circ$, тогда $n = \alpha / (60) = 330 / (60 \cdot 30) = 1,834$ мин⁻¹. Известная частота вращения вала двигателя n , отсюда необходимое передаточное число редуктора $i = n_{дв} / n = 7000 / 1,834 = 3820$. На основании функциональной схемы и произведенного расчета выбираем конкретные модули и комплектующие изделия, универсальный редуктор, муфты сцепления — крестовая и согласования, механизм возврата, предохранительный механизм.

Рассмотрим конструкции блоков РЭА обработки цифровых сигналов, выполненные на элементной базе в виде ИС различного уровня интеграции, в том числе БИС, СБИС и дискретных ЭРЭ. При проектировании современной РЭА на базе ИС применяют в основном три варианта конструкций блоков: книжный, разъемный и кассетный.

Книжный вариант конструкции блока — это пакет функциональных узлов, шарнирно соединенных между собой. Электрическое соединение узлов в таком блоке осуществляется с использованием объединительной платы гибкими печатными, ткаными или опресованными кабелями, а также объемными проводниками. Конструкция книжного варианта блока достаточно сложна, но позволяет получать высокое значение коэффициента заполнения. Книжный вариант конструкции обеспечивает свободный доступ к ИС и микросборкам, навесным элементам и монтажным электрическим соединениям, находящимся во включенном состоянии.

Разъемный вариант конструкции блока (рис. 3.12) также представляет собой набор функциональных узлов с разъемами врубно-



Генератор пилы
размере напряже-
ния: 60В/20А

Рис. 3.11. Общий вид генератора пилообразного напряжения

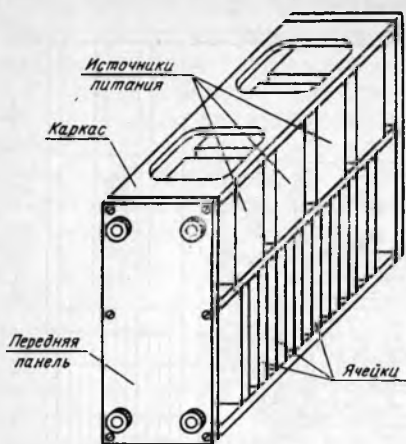


Рис. 3.12. Разъемный вариант конструкции блока

го типа. Конструкция отличается простотой, высокой технологичностью и ремонтопригодностью, однако имеет сравнительно низкую надежность разъемного соединения и меньшее значение коэффициента заполнения по сравнению с книжным вариантом.

Кассетный вариант конструкции блока сочетает в себе книжный и разъемный варианты конструкций, обеспечивает функциональную законченность

составных частей блока за счет объединения ячеек в кассету и их легкосъемность.

При выполнении курсового проекта студент должен выявить аналогичные конструктивные решения и дать их характеристику. При этом он должен произвести поиск с целью обеспечения патентной чистоты проектируемого устройства.

Патентный поиск можно выполнить по тематическим выпускам научно-информационного издания Центрального научно-исследовательского института патентной информации (ЦНИИПИ) «Изобретения в СССР и за рубежом» (с 1986 г. — «Изобретения стран мира»). Тематические выпуски издаются по 116 классам Международной классификации изобретений и содержат патентную информацию, опубликованную в официальном бюллетене Государственного комитета Совета министров СССР по делам изобретений и открытий, а также в патентных бюллетенях высокоиндустриальных капиталистических стран: Великобритании, США, Франции, ФРГ и Японии.

На основе проведенного разбиения электрической схемы и анализа существующих конструкций выбирается метод конструирования устройства в целом и его составных частей. Существующие методы конструирования РЭА подразделяются на три взаимосвязанные группы [1] (рис. 3.13):

по видам связей между элементами;

по способу выявления и организации структуры связей между элементами;

по степени автоматизации конструирования РЭА зависит от назначения аппаратуры и ее функций, преобладающего вида связей, уровня унификации, автоматизации и т. д.

Так, при конструировании устройств с применением ИС применяют топологический метод (преобладают физические связи),

функционально-модульный (в качестве функциональных модулей используются ИС), автоматизированный (размещение ИС на плате, трассировка соединений выполняется с помощью ЭВМ). В свою очередь ИС конструируются методами топологии с применением автоматизации.

Таким образом, существует определенная взаимосвязь и последовательность применения перечисленных методов конструирования, которая состоит, во-первых, в выявлении видов связей между деталями и элементами, во-вторых, в определении структуры и числа (с точки зрения избыточности) связей между элементами и, в-третьих, в определении возможности или невозможности автоматизации выявления и организации структуры связей между деталями и элементами.

Рассмотрим кратко сложившиеся методы конструирования РЭА. На рис. 3.14 приведена классификация видов связей в РЭА.

Геометрический метод. В основу метода положена структура геометрических и кинематических связей между деталями, представляющая собой систему опорных точек, число и размещение которых зависит от заданных степеней свободы и геометрических свойств твердого тела.

Принцип геометрического метода исходит из основных положений геометрии. Любая точка, расположенная в пространстве, обладает тремя степенями свободы. Тело же имеет шесть степеней свободы. Применение геометрического метода к конструированию РЭА приводит к следующим основным положениям.

1. Все возможные перемещения одного тела относительно другого, которые могут встретиться в двух конструктивно связанных телах, полностью определяются числом и местом расположения точек совместного прикосновения. Но так как число совместных точек прикосновения не может быть более шести и менее одной, то одно тело относительно другого может иметь до пяти степеней свободы.

2. Расположение точек соприкосновения тел (точек опоры) должно быть выбрано так, чтобы каждая точка безусловно ограничивала движение тела; если убрать эту точку опоры, то тело получит свободу перемещения в направлении, которое ограничивалось этой точкой.

3. Для лучшего ограничения возможного перемещения тела точки соприкосновения следует располагать так, чтобы плоскость, касательная к любой точке, была по возможности перпендикулярна вероятному перемещению тела, лишённому этой точки опоры.

4. Для того чтобы сохранить при помощи совместных точек касания (опор) заданное положение одного тела относительно другого, необходимо иметь постоянно действующие силы, направленные перпендикулярно плоскости, касательной к точкам опоры, и создающие сжимающие напряжения в этих точках. Такие силы на-

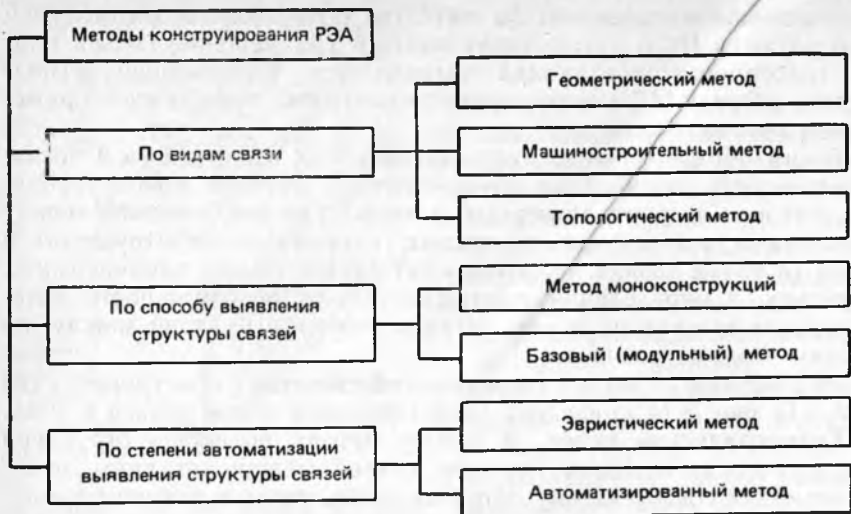


Рис. 3.13. Классификация методов конструирования РЭА



Рис. 3.14. Классификация видов связей в РЭА

зываются замыкающими и являются или силой тяжести тела, или силой действия специальных пружин.

Геометрический метод конструирования целесообразно применять для конструкций, в которых должно соблюдаться точное взаимоположение деталей или обеспечиваться их точное перемещение.

Машиностроительный метод. В основу этого метода конструирования положена структура механических связей между элементами, представляющая собой систему опорных поверхностей. Машиностроительный метод используется для конструирования устройств и элементов РЭА, которые несут большие механические нагрузки и в которых неизбежны вследствие этого большие деформации. При этом точечные опоры, принятые в геометрическом методе, оказываются нецелесообразными, так как могут перегружаться, поэтому их заменяют опорными поверхностями.

Характерные черты машиностроительного метода конструирования следующие:

- применение опорных поверхностей вместо опорных точек;
- возможное увеличение числа опорных поверхностей по сравнению с геометрическим методом;

- расположение опорных поверхностей допускается под любыми углами к возможному перемещению;

- замена замыкающих сил на замыкание формой поверхности, что неизбежно вызывает в подвижных соединениях зазоры, а в неподвижных — большие напряжения;

- обеспечение точности движения и взаимного расположения деталей за счет высокой степени точности их изготовления.

Топологический метод. В основу метода положена структура физических связей между ЭРЭ. Топологический метод, в принципе, может применяться для выявления структуры любых связей, однако конкретное его содержание проявляется там, где связности элементов может быть сопоставлен граф. Основные черты топологического метода следующие:

- сопоставление связности элементов конструкции РЭА графу;

- изоморфизм графов, т. е. свойство эквивалентности строения независимо от различия в геометрическом образе, которое позволяет получить множество преобразований графа, среди которых конструктору удастся найти совершенно непохожее на свой прототип решение;

- использование свойств графов для размещения элементов и ориентации их в пространстве для трассировки линий связи и средств их соединения с элементами.

Топологический метод конструирования применяется, в первую очередь, для создания пленочных ИС, ПП, гибких печатных соединителей.

В табл. 3.6 приведены области конструкторских работ, использующие те или иные методы конструирования.

Т а б л и ц а 3.6. Применение методов проектирования РЭА

Метод конструирования	Области применения метода в процессе проектирования РЭА
Геометрический	Проектирование подвижных соединений, фиксаторов, арретиров, элементов кинематической схемы Проектирование несущих конструкций блоков, ячеек, ПП Компоновка РЭА, размещение ЭРЭ на плате, трассировка электрических соединений
Машинностроительный	
Топологический	

Метод проектирования моноконструкций. Основан на минимизации числа связей в конструкции, он применяется для создания функциональных узлов, блоков, РЭА на основе оригинальной несущей конструкции в виде моноузла (моноблока) с оригинальными элементами. Разработка моноконструкций РЭА связана с многочисленными трудностями и имеет ряд недостатков, а именно: значительное время конструирования и внедрения в серийное производство, ограниченные возможности типизации и унификации, недостаточно высокая надежность, низкая степень ремонтопригодности, сложность внесения изменений в электрическую схему без переделки конструкции, значительная стоимость разрабатываемых и изготавливаемых конструкций.

Базовый (модульный) метод конструирования. В основу метода положен модульный принцип проектирования. Деление базового метода на разновидности связано с ограничениями, схемной и конструкторской унификацией структурных уровней (модулей, функциональных узлов, блоков).

Базовый метод является основным при проектировании современной РЭА, он имеет много преимуществ по сравнению с методом моноконструкций:

на этапе разработки позволяет одновременно вести работу над многими узлами и блоками, что сокращает сроки проведения разработок; упрощает отладку и сопряжение узлов в лаборатории, так как работа любого функционального узла определяется работой известных модулей; резко упрощается конструирование и макетирование; сокращает объем оригинальной конструкторской документации, дает возможность непрерывно совершенствовать аппаратуру без коренных изменений конструкции; упрощает и ускоряет внесение изменений в схему, конструкцию и конструкторскую документацию;

на этапе производства сокращает сроки освоения серийного производства аппаратуры; упрощает сборку, монтаж, снижает требования к квалификации сборщиков и монтажников; снижает стоимость аппаратуры благодаря широкой механизации и автоматизации производства; повышает степень специализации производства;

при эксплуатации повышает эксплуатационную надежность РЭА, облегчает обслуживание, улучшает ремонтпригодность аппаратуры.

3.3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА И КОМПОНОВКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА

Под *компоновкой* понимается процесс размещения комплектующих модулей, ЭРЭ и деталей РЭА на плоскости или в пространстве с определением основных геометрических форм и размеров. В зависимости от уровней модульности различают несколько уровней компоновки аппаратуры: микросхем и ЭРЭ на плате, ячеек в блоке, блоков в шкафу и т. д. Процесс компоновки завершается получением компоновочного эскиза. При компоновке должны быть учтены требования оптимальных функциональных связей между модулями, их устойчивость и стабильность, требования прочности и жесткости, помехозащищенности и нормального теплового режима, требования технологичности, эргономики, удобства эксплуатации, ремонта. Поэтому процесс компоновки устройства должен сопровождаться проведением соответствующих поверочных расчетов, методика которых изложена в гл. 4.

Размещение комплектующих элементов в модулях всех уровней должно обеспечивать равномерное и максимальное заполнение конструктивного объема с удобным доступом для осмотра, ремонта и замены. Замена детали или сборочной единицы не должна приводить к разборке всей конструкции или ее составных частей. Для устойчивого положения изделия в процессе эксплуатации центр тяжести должен находиться возможно ближе к опорной поверхности.

Рассмотрим последовательность выполнения вариантов компоновки блоков РЭА. Выбор варианта конструкции осуществляется исходя из технических требований и условий производства. По условиям производства рекомендуется применять однотипные конструкции ячеек, элементы несущих конструкций, электрические межсоединения, элементы фиксации и крепления.

При компоновке модулей всех уровней необходимо выделить достаточно пространства для межсоединений.

На рис. 3.15 приведены варианты (*a—г*) компоновки блоков РЭА разъемного типа. Ячейка таких блоков снабжается, как правило, электрическим вилочным соединителем, при помощи которого легко вставляется или удаляется из блока. Основным конструктивным элементом блока является каркас 1, на котором фиксируется монтажная панель 3 с установленными на ней гнездовыми соединителями 4. В зависимости от ориентации монтажной панели относительно лицевой панели 2 и расположения ячеек блока 5 существует четыре разновидности компоновки блока.

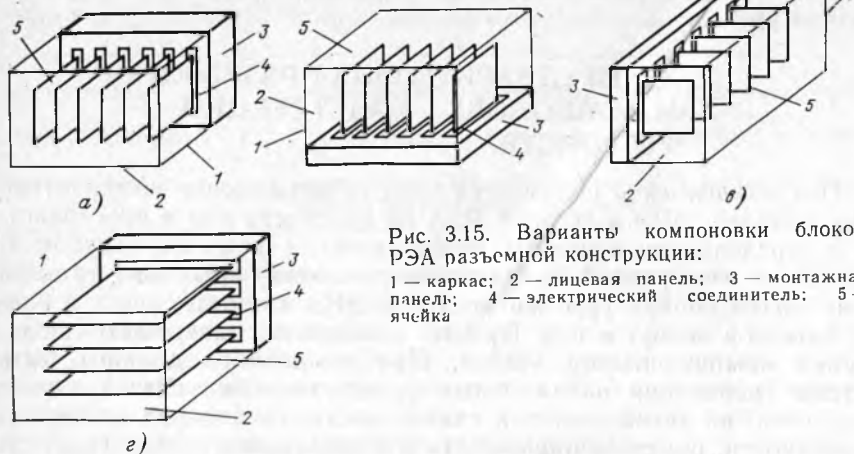


Рис. 3.15. Варианты компоновки блоков РЭА разъемной конструкции:

1 — каркас; 2 — лицевая панель; 3 — монтажная панель; 4 — электрический соединитель; 5 — ячейка

Вертикально-поперечное расположение монтажной панели с вертикальной ориентацией ячеек (вариант а) используют при значительной длине ячеек в однорамных стойках и в конструкциях многорамных стоек. На рис. 3.16 приведен компоновочный эскиз блока управления. Такая компоновка позволяет увеличить коэффициент заполнения объема РЭА, имеет высокую плотность.

Вертикально-поперечное расположение монтажной панели с горизонтальной ориентацией ячеек (вариант г) используют при значительных габаритах ячеек. В этом случае существенно ухудшается тепловой режим блока, поэтому, как правило, в блоке применяется принудительное воздушное охлаждение.

Вертикально-продольное расположение монтажной панели (вариант в) применяют в блоках, имеющих значительную глубину. Пример компоновочного эскиза блока РЭА с таким расположением ячеек приведен на рис. 3.12. Такая конструкция имеет высокую плотность компоновки и рекомендуется для блоков, устанавливаемых в одно- и многорамные стойки.

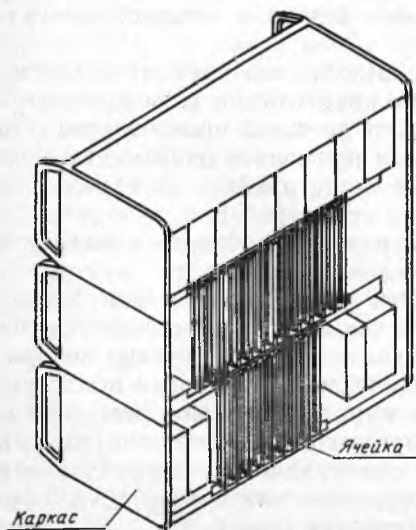


Рис. 3.16. Компоновочный эскиз блока управления

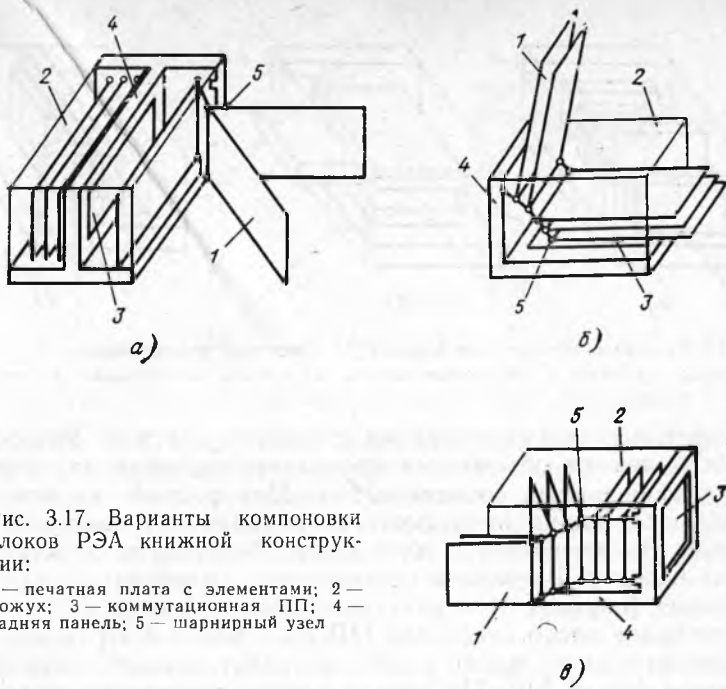


Рис. 3.17. Варианты компоновки блоков РЭА книжной конструкции:
 1 — печатная плата с элементами; 2 — кожух; 3 — коммутационная ПП; 4 — задняя панель; 5 — шарнирный узел

На рис. 3.17 представлены варианты компоновки блоков РЭА книжной конструкции. Механическое объединение ПП между собой и с несущей конструкцией обеспечивается шарнирными узлами 5, позволяющими поворачивать относительно оси раскрытия ПП 1 подобно страницам книги. В рабочем состоянии ПП стягиваются в пакет стяжными винтами. Возможна вертикальная (варианты а, в) и горизонтальная (вариант б) ориентации плат в блоке. Блок по направляющим устанавливается в стойку или монтажное устройство. Межсоединения выполняются объемными проводниками, печатными жгутами, фиксированным паяным соединением. Проводники и жгуты подпаиваются к ПП со стороны подвески плат к коммутационной плате 3, осуществляющей межсоединения ПП 1 согласно электрической принципиальной схеме блока. На задней панели 4 устанавливается внешний соединитель. Конструкция блока позволяет конструировать в рабочем режиме любой электронный узел после удаления стяжных винтов.

Варианты компоновки блоков РЭА кассетной конструкции представлены на рис. 3.18. Кассеты 2 механически соединяются между собой и с несущей конструкцией блока 4 шарниром 5, позволяющим откидывать и контролировать любую кассету. В режиме контроля предусматривается фиксация кассеты в откинутом состоянии. В рабочем состоянии кассеты объединяются в пакет и

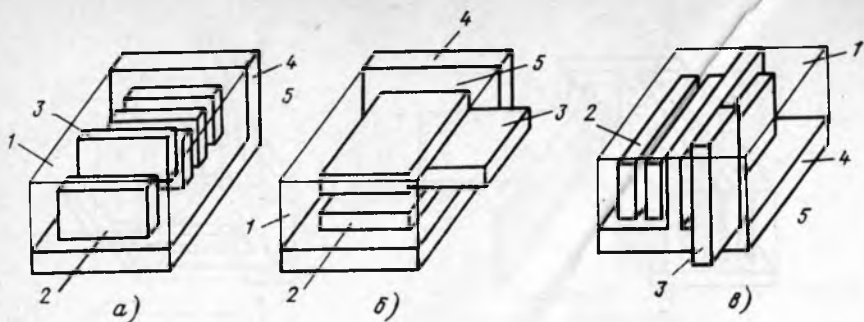


Рис. 3.18. Варианты компоновки блока РЭА кассетной конструкции: 1 — кожух; 2 — кассета; 3 — откиннутая кассета; 4 — несущая конструкция; 5 — шарнир

крепятся к несущей конструкции стяжными винтами. Межсоединения выполняются объемными проводниками, жгутами, фиксируемыми соединениями, соединителями. При разработке монтажной схемы блока нужно предусмотреть подвижность монтажа искусственным увеличением его длины для обеспечения откинутого состояния кассеты. Возможна вертикальная (варианты *а*, *в*) и горизонтальная (вариант *б*) ориентация кассет в блоке.

Примерное число ячеек или ПП $N_{я}$ в блоке РЭА определяется на этапе функционального разбиения электрической принципиальной схемы (см. § 3.2). На этом же этапе ориентировочно определяются площадь ячейки и ее габариты.

Ширина блока выбирается исходя из ширины ПП (ячейки) $B_{я}$ и ширины зоны коммутации $B_{к}$. Обычно в блоках микроэлектронной аппаратуры $B_{к} = 30 \dots 40$ мм. Длина пакета ячеек 1 будет определяться числом ячеек $N_{я}$ и их высотой $H_{яi}$ (рис. 3.19):

$$L_{п.я} = \sum_{i=1}^{N_{я}} H_{яi}$$

Длина блока в этом случае

$$L_{б} = \sum_{i=1}^{N_{я}} H_{яi} + L_{к} + L_{y}$$

где $L_{к}$ — длина зоны межблочной коммутации 3; L_{y} — длина зоны передней панели 4. Длина блока определяется его типом и обычно не может быть изменена, поэтому, если число ячеек оказывается больше того числа, которое может уместиться в размере $L_{я}$ блока, следует переходить на двухрусную конструкцию.

При компоновке блоков СВЧ внешние габаритные размеры жестко ограничены местом размещения блока. Например, приемопередающий модуль антенной фазированной решетки (ФАР), ра-

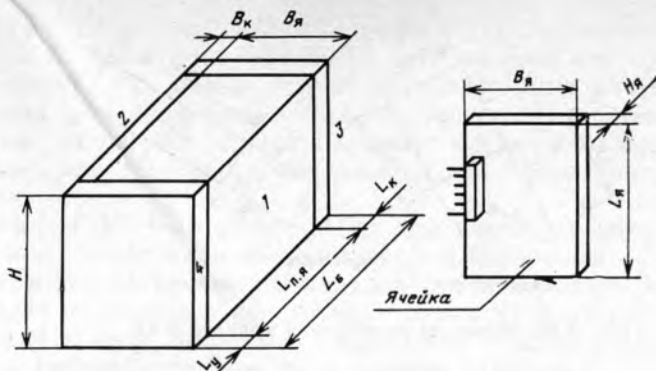


Рис. 3.19. Конструктивные зоны блока разъемной конструкции

ботающий на свой излучатель, имеет ограничения на поперечные размеры, обусловленные расстоянием между излучателями. Обычно излучатели расположены на антенном полотне в вершинах равностороннего треугольника со стороной размером $\lambda/2$, где λ — длина волны. Как показано на рис. 3.20, существуют два варианта выбора поперечных размеров модуля. В варианте *a* модуль представляет собой в поперечном сечении прямоугольник с размерами $0,5\lambda \times 0,43\lambda$, в варианте *б* — прямоугольник с размерами $0,25\lambda \times 0,86\lambda$. Конструктивно более удобным является вариант *б*, так как СВЧ-модули имеют, как правило, «одноэтажную» конструкцию.

Аналогично выбираются размеры модулей прямоугольной решетки.

При компоновке блоков СВЧ пассивные элементы схемы располагаются на подложках, представляющих собой прямоугольные пластины с наиболее типовым размером 60×48 мм². При необходимости подложка может быть разделена на части: 12×15 , 15×24 , 24×30 , 30×48 мм². Разработаны и используются ситалловые подложки с размерами 75×48 , 150×48 мм². Толщина подложек составляет 0,25; 0,5 или 1,0 мм.

Активные полупроводниковые приборы располагаются между платами, осуществляя хороший тепловой контакт с корпусом модуля.

Одной из важнейших задач, решаемой на этапе предварительной компоновки изделия, является выбор типа внутривзблочного электрического монтажа. Его тип определяется используемой элементной базой, рабочим диапазоном радиочастот, условиями эксплуатации и вариантом конструкции модуля. В РЭА используют два способа электромонтажа: объемный (жгуты, провода, кабель) и плоский (печатный монтаж) [4].

Основными конструктивными элементами электромонтажа являются:

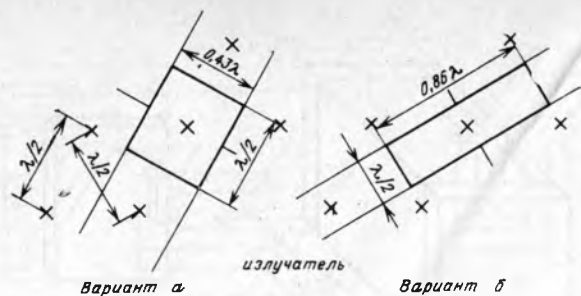


Рис. 3.20. Варианты размещения модулей ФАР

- 1) элементы экранирования и заземления;
- 2) провода, кабели и материалы для монтажа;
- 3) элементы крепления провода, жгута и кабеля;
- 4) соединительные элементы электрического монтажа;
- 5) одно- и многослойный печатный монтаж;
- 6) монтажные соединения приборов, блоков и узлов РЭА.

Электромонтаж внутри блока можно разделить на две группы: электрическое соединение модулей первого уровня (кассет и ячеек) между собой;

электрические соединения массива модулей первого уровня с элементами управления, индикации и коммутации, расположенными на каркасе или корпусе блока.

Для электрического соединения массива модулей первого уровня с элементами на корпусе блока используется, как правило, объемный электромонтаж. На конструкцию объемного электромонтажа решающее влияние оказывает частотный диапазон работы устройства. В блоках, работающих на средних и низких частотах (до 1 МГц), монтаж выполняется объемным гибким проводом либо плоским кабелем. Их выбор зависит от силы тока, напряжения, частоты и условий эксплуатации. При проектировании необходимо придерживаться следующих рекомендаций: 1) минимальный внутренний радиус изгиба проводника должен быть не менее диаметра провода с изоляцией; 2) провода питания переменного тока следует свивать для уменьшения возможных наводок; 3) провода, подводящие к сменным элементам, должны иметь некоторый запас по длине, допускающий повторную заделку провода; 4) провода не должны касаться острых металлических кромок; 5) монтажные провода должны обеспечивать свободный доступ к элементам конструкции при изготовлении, осмотре, контроле и ремонте; 6) монтажные провода целесообразно свивать в жгут, при этом обеспечивается возможность расчленения монтажных операций на более простые и уменьшается стоимость монтажных работ.

В блоках, работающих на высокой частоте (1 ... 300 МГц), весьма ощутимым становится влияние паразитных емкости и ин-

дуктивности элементов электро монтажа. При этом отдельные участки электро монтажа становятся источниками или приемниками радиопомех. С целью устранения паразитных связей между отдельными узлами применяют электромагнитные экраны, а электро монтаж выполняют экранированным или коаксиальным кабелем. Объем электрического монтажа внутри блока при этом увеличивается.

В блоках СВЧ (свыше 300 МГц) для электрического монтажа используются коаксиальные линии связи и волноводы.

Электрическое соединение модулей первого уровня между собой зависит от варианта конструкции блока. Для блоков книжной и кассетной конструкций такое соединение осуществляется также объемным гибким проводом либо плоским кабелем.

Для разъемного варианта конструкции большое распространение получило использование объединительной ПП, что позволяет существенно уменьшить габаритные размеры изделия, упростить сборку и повысить ремонтпригодность. Однако следует учесть, что многослойные печатные платы (МПП) имеют неудовлетворительные контакты в межслойных соединениях, что снижает надежность и технологичность конструкции. Предпочтительным является использование проводного монтажа на двусторонней печатной плате (ДПП). Применение плат проводного монтажа не уменьшает помехоустойчивости логических элементов, размещаемых на них, так как индуктивности, взаимоиндуктивности и емкости проводников плат печатного и проводного монтажа примерно одинаковы [4].

После выбора варианта конструкции изделия и типа электрического монтажа необходимо произвести предварительные расчеты теплового режима, вибро- и ударопрочности, а также таких показателей, как масса, коэффициент заполнения объема, надежность. Методика этих расчетов приведена в гл. 4.

В зависимости от места размещения модуля РЭА и условий его эксплуатации будут воздействовать различные дестабилизирующие факторы (см. табл. 3.1). Нормальными климатическими условиями являются: $t = 25 \pm 10^\circ\text{C}$, влажность 45 ... 80%, атмосферное давление $H = (8,36 \dots 10,6) \cdot 10^4$ Па. Кроме климатических факторов на модуль РЭА воздействуют механические нагрузки, электромагнитные помехи и паразитные наводки. Конструкция модуля должна быть устойчива ко всем дестабилизирующим факторам.

На этапе предварительной разработки конструкции модуля необходимо решить следующие основные вопросы, связанные с защитой от дестабилизирующих факторов:

необходимость герметизации корпуса модуля;

защита РЭА от воздействия ионизирующего излучения (если оно существует);

выбор способа защиты от механических воздействий: вибрации и ударов;

выбор способа защиты от действующих электромагнитных помех и паразитных наводок;

выбор способа обеспечения нормального теплового режима модуля.

Наиболее радикальным способом защиты элементов РЭА от влаги, пыли, песка, плесневых грибков является **герметизация**, т. е. обеспечение непроницаемости корпуса модуля для газов и жидкостей. Различают индивидуальную, общую, частичную и полную герметизацию [22].

Индивидуальная герметизация допускает замену элементов РЭА при выходе их из строя. При общей герметизации замена элементов и ремонт возможны только при демонтаже герметичного корпуса. Для частичной герметизации РЭА применяют пропитку, обволакивание и заливку лаками, пластмассами или компаундами на органической основе. Полная герметизация достигается при использовании корпуса специальной конструкции из металлов, стекла и керамики с высокой степенью непроницаемости. Герметичный корпус заполняется сухим воздухом либо инертным газом при атмосферном или повышенном давлении не более $12 \cdot 10^4$ Па. Газовое заполнение не ограничивает рабочую температуру, повышает пробивное напряжение, предотвращает окисление металлов. Полная герметизация может осуществляться также с помощью разъемного соединения через вакуумную резину.

Герметизация корпусов блоков осуществляется сваркой основания и крышки корпуса или с помощью паяного демонтируемого соединения корпуса с крышкой. Герметизация сваркой применяется для блоков, не подлежащих ремонту, объем которых не превышает $0,5 \text{ дм}^3$. Вскрытие таких блоков возможно только путем механического снятия сварного шва. Такой способ обеспечивает натекание на более $1,33 \cdot 10^{-10} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$ [8]. Натекание газа B_n (или скорость истечения газа из объема) определяет степень герметичности: $B_n = V \cdot \Delta p / t$, где V — объем газа внутри блока; дм^3 ; Δp — избыточное давление внутри блока, Па; t — срок службы или хранения блока, с.

Герметизация с помощью паяного демонтируемого соединения применяется для блоков, объем которых составляет $0,5 \dots 5,0 \text{ дм}^3$. Этот способ обеспечивает натекание $B_n = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$, что гарантирует работоспособность блока в течение 12 лет. Конструктивные элементы герметизации корпусов блоков паяным соединением приведены на рис. 3.21 [8]. Для устранения перегрева блока во время пайки между корпусом и крышкой вблизи паяного соединения применяется канавка для отвода тепла. В паяном соединении проволока над прокладкой укладывается по всему периметру соединения. Один конец проволоки через паз в крышке выводится из зоны соединения и укладывается в тепловую канавку.

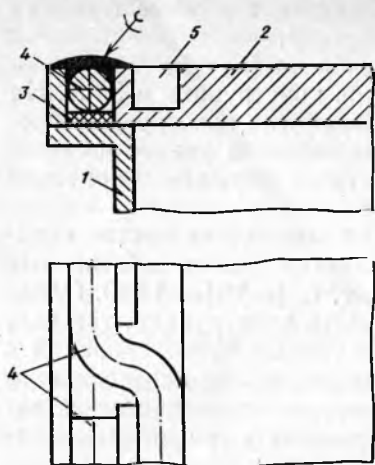


Рис. 3.21. Герметизация корпуса блока с помощью паяного соединения:

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — резиновая прокладка; 4 — проволока; 5 — тепловая канавка

Для блоков, объем которых превышает 3 дм^3 , герметизация осуществляется с помощью уплотнительных прокладок. Этот способ обеспечивает натекание $B_n = 1,33 \times 10^{-4} \text{ дм}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Наиболее часто герметизируют модули СВЧ, микроблоки, интегральные микросборки.

При герметизации модулей повышенной мощности важно обеспечить нормальный тепловой режим, так как их перегрев выше,

чем модулей с перфорированным корпусом. Конструктивные решения этой задачи сводятся к уменьшению тепловых сопротивлений корпусов и несущих конструкций путем подбора материалов с повышенной теплопроводностью, использования специальных теплоотводящих устройств вплоть до тепловых трубок и термоэлектрических элементов на основе эффекта Пельтье.

Необходимо учитывать, что герметичность корпуса во многом определяет внешняя коммутация. Для внешних соединений по цепям питания, ввода и вывода низкочастотных сигналов используются специальные гермовводы типа РСГ или РПС1, для ввода — вывода СВЧ-сигналов — коаксиально-полосковые вакуум-плотные соединители.

В условиях **воздействия ионизирующего излучения** на модуль РЭА его корпус должен выполнять функцию защиты от радиации. Из материалов наиболее устойчивыми к воздействию радиации являются металлы. У большинства металлов при этом возрастает в 2—3 раза предел текучести, снижается ударная вязкость на 10...30%, повышается удельное сопротивление ρ . Наименьшей радиационной стойкостью обладают электротехнические стали и магнитные материалы, у которых изменяется магнитная проницаемость. Защитный экран может быть выполнен многослойным из металлов с высоким кулоновским барьером, например свинца и поглощающих прослоек. При этом значительно возрастают масса и габариты изделия.

В процессе эксплуатации РЭА подвергается **воздействию внешних механических нагрузок**: вибрации, ударов и линейного ускорения. По степени защищенности РЭА от этих воздействий различают два понятия: устойчивость и прочность. *Устойчивость* — свойство объекта при заданном воздействии выполнять заданные функции и сохранять значения своих параметров в пределах нор-

мы. *Прочность* — свойство объекта выполнять заданные функции после прекращения механических воздействий.

При воздействии механических нагрузок на блок РЭА происходит деформация и перемещение элементов конструкции и ЭРЭ. На этапе предварительной компоновки и разработки конструкции блока необходимо обеспечить как минимум вибро- и ударопрочность изделия. При этом можно использовать следующие критерии прочности:

1. Выполнение условия непересечения множества частот спектра действующих нагрузок $\{\omega_i\}$ и множества частот собственных колебаний блока и его элементов $\{\omega_{0j}\}$, т. е. $\{\omega_i\} \cap \{\omega_{0j}\} = 0$. Однако это условие еще не определяет прочность конструкции, так как, с одной стороны, при его невыполнении уровни виброускорений и виброперемещений могут быть еще недостаточными для возникновения отказа, а с другой стороны, при непересечении частот возникающие в системе перегрузки могут превышать допустимые значения.

2. Условие непревышения действующих на конструктивные элементы перегрузок допустимых уровней. Последние определяются типом ЭРЭ, используемыми материалами и т. д. Действующие ударные и виброускорения рассчитываются по методике, изложенной в § 4.5.

3. Условие непревышения возникающих в системе перемещений допустимых уровней, которые, в свою очередь, определяются конструкцией блока, имеющимися зазорами в системе, например расстоянием между соседними платами. Методика расчета перемещений изложена в § 4.5.

Очевидно, что в случае невыполнения приведенных условий необходимо как-то видоизменить конструкцию блока, найти способ защиты его от механических нагрузок. При этом делать элементы конструкции настолько прочными, чтобы они выдерживали максимальные динамические перегрузки, нецелесообразно, так как приводит к значительному увеличению массы. В свою очередь увеличение массы приводит к снижению частоты собственных колебаний элемента f_0 , а вследствие этого и к неизбежному возрастанию динамических перегрузок.

Как следует из анализа зависимости коэффициента динамичности системы от расстройки, все способы защиты можно разделить на три группы.

1. Смещение спектра частот собственных колебаний в более высокочастотную область, что приводит к достижению значения коэффициента динамичности при заданной вибрации близкого к единице ($\mu \approx 1$).

2. Повышение демпфирующих свойств конструкции, т. е. увеличение рассеяния энергии колебаний вследствие трения в элементах конструкции и «внутреннего трения» в материалах. При этом μ также стремится к 1.

Очевидно, что первые два способа могут быть эффективными только при условии, что возмущающие вибро- и ударные перегрузки не превышают допустимых для элементов конструкции уровней.

3. Смещение частот собственных колебаний конструкции в область ниже частот вынужденных колебаний с помощью виброизоляции. Виброизоляция осуществляется с помощью амортизаторов, а также за счет применения упругих прокладок. В этом случае коэффициент динамичности становится меньше единицы ($\mu < 1$).

Рассмотрим эти способы несколько подробнее.

1. Как следует из соотношения $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$, увеличить значение частоты собственных колебаний f_0 можно, уменьшив массу блока M или увеличив жесткость конструкции k . Масса блока определяется главным образом элементной базой, которая задает косвенным образом габариты несущих конструкций. Поэтому существенное снижение массы, которое соответствует к тому же требованию микроминиатюризации, достаточно сложно.

Наиболее распространены методы повышения жесткости конструкции за счет изменения способов крепления и площади плат, а также применения ребер жесткости. Влияние способов крепления, размеров и толщины платы на частоту собственных колебаний может быть определено по формулам § 4.5. Методы эффективны в случае, если диапазон частот действующей вибрации не превышает 400 ... 500 Гц [25].

Следует учитывать, что действующие на блок механические нагрузки могут иметь различные значения по разным направлениям в пространстве. Поэтому элементы конструкции должны быть расположены так, чтобы в направлении максимальных действующих нагрузок жесткость элементов была максимальной. Например, вертикальное размещение ячеек в блоке является предпочтительным для условий кинематического возбуждения.

2. Улучшение демпфирующих свойств конструкции достигается включением в конструкции плат специальных демпфирующих покрытий из вибропоглощающих материалов, внутреннее трение которых в десятки и сотни раз больше, чем у стеклотекстолита. При этом резонансные колебания могут быть снижены в широком диапазоне частот при незначительном увеличении массы и габаритов конструкции.

В табл. 3.7 [3] представлены основные параметры вибропоглощающих материалов.

Конструкции плат с демпфирующими слоями можно разделить на два типа:

- о внешним демпфирующим слоем (рис. 3.22,а);
- с внутренним демпфирующим слоем (рис. 3.22,б).

Т а б л и ц а 3.7. Параметры вибропоглощающих материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, Е·10 ⁻⁷ , Па	Коэффициент механических потерь η
Листовой:			
анат	1400	140	0,48
ВМЛ-25	1570	500	0,40
Мастика:			
адем-НШ	1150	540	0,25
антивибрит-5М	1600	240	0,25
антивибрит-7М	1600	200	0,30
Композиционный материал полиакрил- ВС, полимерная прослойка	1200	6	0,65
Металлополимерный листовой материал випопит, полимерная прослойка	1200	12	1,25

В конструкциях с внешним слоем основным типом деформации является растяжение—сжатие демпфирующего слоя, а в конструкциях с внутренним слоем—сдвиг. Применение демпфирующего слоя в несколько десятых долей миллиметра в конструкциях с внутренним слоем позволяет уменьшить амплитуду резонансных колебаний в несколько раз. В конструкциях с внешним слоем такой же эффект наблюдается, когда толщина демпфирующего слоя в 5—10 раз превышает толщину несущего слоя [3].

3. Основным способом виброизоляции РЭА является установка ее на амортизаторы. Амортизаторы подразделяются на низко-, средне- и высокочастотные. Низкочастотные амортизаторы виброизолируют частоты в диапазоне 5 ... 600 Гц, среднечастотные— в диапазоне 15 ... 600 Гц и высокочастотные в диапазоне 35 ... 2000 Гц [22].

На этапе предварительной компоновки в случае необходимости следует произвести выбор типа амортизаторов и схемы их размещения. Механическая система имеет в общем случае шесть частот собственных колебаний. При значительном интервале между максимальной и минимальной из шести частот собственных колебаний системы трудно избежать совпадения одной из них с частотой вынуждающих колебаний. Поэтому при выборе схемы амортизации предусматривают меры по сужению спектра собственных частот и исключению связанных колебаний. На рис. 3.23 приведены различные схемы расположения амортиза-

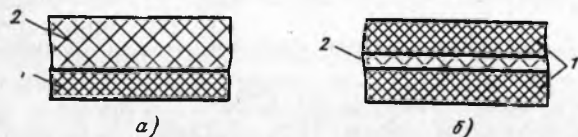


Рис. 3.22. Схема конструкции с демпфирующим слоем:

1 — несущий слой; 2 — демпфирующий слой

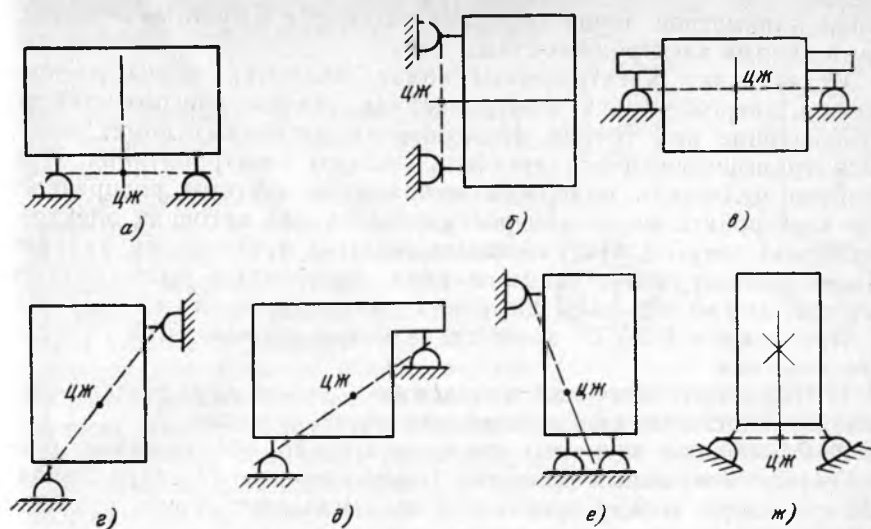


Рис. 3.23. Схема амортизации

торов (ЦЖ — центр жесткости системы). При выборе схемы амортизации следует учитывать:

- совмещение центра тяжести с центром масс;
- равное нагружение каждого амортизатора;
- совмещение центра тяжести с центром жесткости;
- симметричное крепление амортизаторов относительно координатных плоскостей;
- установку на амортизаторы ограничителей, препятствующих разрушению упругих элементов.

После выбора схемы амортизации производят статический и динамический расчеты, методики которых приведены в § 4.5. Основные параметры различных типов амортизаторов приведены в [15, 22].

При компоновке РЭА необходимо решать вопросы электромагнитной совместимости элементов, в частности защиты от электромагнитных, электрических и магнитных помех.

Источники помех находятся как вне (внешние помехи) РЭУ, так и внутри их (внутренние помехи). Внешние помехи возникают от грозовых разрядов, радиопередающих устройств, щеточных двигателей, сварочных аппаратов и автомобилей. Помехи от сети электропитания происходят из-за нестабильности напряжения и частоты; появление импульсных помех обусловливается перегрузкой в сети и пусковыми токами при включении оборудования. Внутренние помехи появляются из-за наличия паразитных связей, не предусмотренных конструкцией, и помех рассогласо-

вания параметров линии передачи сигнала с входными — выходными цепями электронных схем.

Источниками электрических помех являются шины распределения энергии, блоки электропитания, статические потенциалы, возникающие при трении. Источниками магнитных помех являются трансформаторы и дроссели системы электропитания. При наличии пульсации выходного напряжения системы распределения электропитания можно рассматривать как источник электромагнитной энергии. Излучающими энергию источниками являются синхронизирующие схемы и цепи, подводящие высокочастотные сигналы во все узлы цифровой вычислительной аппаратуры.

При защите РЭА от воздействия помех производятся следующие действия.

1. Выделяют источники и приемники помех, определяют максимальное значение сигналов помехи на входах схем.

2. Размещают элементы схем, тщательно продумывают расположение монтажных проводов (уменьшают петли связи, увеличивают зазоры между проводниками, уменьшают длины совместного прохождения проводников и т. д.).

3. Усложняют схему введением фильтров на линиях входа — выхода, устраняют помехи по линиям электропитания с помощью радиочастотных фильтров.

4. Экранируют входные цепи чувствительных схем.

5. Для элементов РЭА разрабатывают кожухи-экраны.

Мероприятия по п. 2 не приводят к увеличению стоимости разрабатываемой аппаратуры. Мероприятия по п. 3—5 удорожают аппаратуру, но в некоторых случаях их выполнение оказывается необходимым.

Для локализации в замкнутом объеме пространства электрического поля применяют экраны. Конструктивная форма экрана зависит от экранируемого изделия и обычно выполняется в виде параллелепипеда, цилиндра или сферы. Методика расчета эффективности экранирования изложена в § 4.2.

Эффективность экранирования электромагнитного поля прямоугольного, цилиндрического и сферического экранов выражается примерно следующим соотношением: $\mathcal{E}_s^p = \mathcal{E}_s^u + 6,0 \text{ дБ} = \mathcal{E}_s^c + 9,6 \text{ дБ}$. По эффекту экранирования указанные три принципиальные конструктивные разновидности экранов можно расположить в следующей последовательности: прямоугольный, цилиндрический и сферический. Это соотношение справедливо для экранов, изготовленных из одинакового металла и с равными толщинами стенок, причем расстояние между параллельными пластинами прямоугольного экрана равно диаметру сферического или цилиндрического. Преимущество цилиндрического экрана по сравнению со сферическим и, в свою очередь, прямоугольного по сравнению с обеими этими конструкциями обусловлено тем, что плоская волна имеет лучшее соотношение волновых сопротивле-

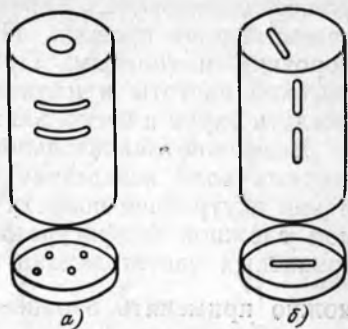
Рис. 3.24. Расположение отверстий в экранах:
 а — правильное; б — неправильное

ний пространства и экрана, и поэтому происходит большее отражение волны.

Конструктивная форма экрана сравнительно мало влияет на его экранирующие характеристики. Решающее значение имеют: материал, из которого изготовлен экран, толщина стенки и размеры экрана. Незначительное влияние формы экрана является весьма ценным обстоятельством, так как позволяет при расчете, конструировании и определении эффективности существующих экранов применять расчетные формулы экранирования прямоугольного, цилиндрического и сферического экранов к экранам, близким им по конструкции. Так, если имеется экран с прямоугольным сечением, то его можно заменить цилиндрическим экраном, если его стороны примерно равны. Экраны различной конфигурации, имеющие по трем координатам почти одинаковую протяженность, можно для расчета заменять эквивалентным сферическим экраном.

Для магнитных экранов действует обратная закономерность. В этом случае между эффективностью затухания прямоугольного, цилиндрического и сферического экранов имеется следующая зависимость: $\mathcal{E}_s^c = \mathcal{E}_s^u + 3,6 \text{ дБ} = \mathcal{E}_s^u + 9,6 \text{ дБ}$, т. е. по экранирующему эффекту на первом месте находится сфера, затем цилиндр и, наконец, прямоугольный экран. Это положение имеет следующее физическое объяснение. Магнитоэстатические экраны действуют по принципу замыкания магнитного потока в магнитной массе экрана. Чем меньше сопротивление экрана этому потоку, тем больше экранирующий эффект. Конструкция экрана в виде шара или цилиндра более полно отвечает этому требованию по сравнению с прямоугольным экраном.

В конструкциях экранов часто необходимо предусматривать отверстия, например, для доступа к регулируемым элементам экранируемых устройств, для введения проводов, для обеспечения теплового режима и т. д. Во всех экранах отверстия должны быть расположены так, чтобы они не препятствовали протеканию вихревых токов в толще экрана. На рис. 3.24,а показано правильное расположение отверстий в цилиндрическом экране, а на рис. 3.24,б — неправильное расположение. Как правило, надо избегать большого числа отверстий и больших их размеров. В магнитоэстатических экранах швы и разрезы не должны идти поперек ожидаемого направления магнитных силовых линий.



Для всех видов электростатических экранов очень важно хорошее заземление, характеризующееся малым сопротивлением заземляющего провода. Провод должен быть как можно более коротким и толстым. При экранировании электрических полей высокой частоты и наличии больших экранов целесообразно заземлять экран в нескольких точках.

Возможно значительное искажение структуры поля переотраженных волн вследствие технологических погрешностей изготовления внутренней полости экрана, а также присутствия под экраном сложной конфигурации экранируемых узлов. Для учета резонансных частот экрана при размещении под ним аппаратуры

можно применять неравенство $\lambda_{рез} \cong \sqrt[3]{V_э - V_у}$, где $V_э$ — объем экрана; $V_у$ — объем экранируемого устройства. Изменяя внутренние размеры экрана, можно менять и его резонансные частоты, поэтому при конструировании экранов с учетом возможных резонансов в их внутренней полости необходимо выбирать внутренние размеры полости так, чтобы длина волны поля помехи не попадала в спектр собственных длин волн экрана — была бы больше наибольшей длины волны резонанса внутренней полости экрана, или подбирать внутренние размеры экрана экспериментальным путем, варьируя их в небольших пределах относительно первоначального выбранного значения для полного устранения резонансов. Другая возможность изменить резонансные частоты экрана состоит в подборе конфигурации его внутренней полости. Определенный положительный эффект дает также применение рифленого материала для стенок и нанесение поглотителя на внутреннюю поверхность металлического экрана, что уменьшает коэффициент отражения от стенок экрана.

Эффективность экранирования зависит от фильтрации электрических сетей управления, сигнализации, связи и электропитания, проходящих через экран, вводимых в экран и выходящих из него.

Фильтры электрических цепей, входящих в экранируемый объем или проходящий через него, размещают как внутри, так и вне экранов и аппаратуры. Фильтры не перестраивают и не переключают. К ним предъявляются следующие специфические требования:

малые потери в полосе прозрачности и достаточно высокое затухание во всей полосе задерживания, занимающей очень широкий интервал радиочастотного диапазона;

способность эффективно работать при сильных проходящих токах, высоких напряжениях, высоких уровнях мощности;

сохранение основных технических характеристик в полосах пропускания и задержания при механических и климатических нагрузках.

Важнейшим фактором, определяющим эксплуатационную надежность РЭА, является **тепловой режим**. Основная задача обес-

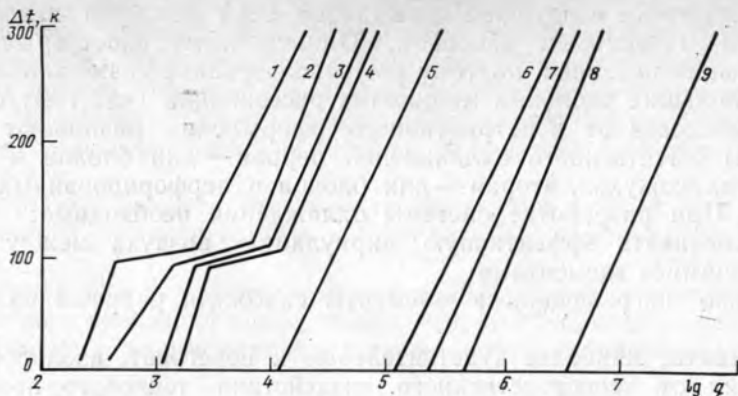


Рис. 3.25. Области применения различных способов охлаждения

печения нормального теплового режима заключается в создании таких условий, при которых количество тепла, рассеянного в окружающую среду, будет зависеть от мощности тепловыделения блока.

Совокупность устройств, применяемых для обеспечения нормального теплового режима РЭА, называют системой охлаждения (СО), или системой обеспечения теплового режима (СОТР). Эта система выбирается на стадии эскизного проектирования. На этой стадии известна довольно ограниченная информация: потребляемая блоком мощность $P_{\text{потр}}$, мощности входных и выходных сигналов $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$, максимальная температура окружающей среды t_0 , примерные габаритные размеры корпуса блока $L_1 \times L_2 \times L_3$, допустимые температуры ЭРЭ (из анализа элементной базы) $t_{\text{доп}}$, коэффициент заполнения объема блока k_3 . Эти данные можно использовать для предварительного выбора СОТР. Для этого определяют среднюю плотность теплового потока от корпуса блока q :

$$q = P_t / S_k,$$

где $P_t = P_{\text{потр}} + P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$ — суммарная мощность тепловыделения в блоке; S_k — условная площадь поверхности теплообмена корпуса блока; $S_k = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3 k_3]$. Другим показателем является допустимый перегрев наименее теплостойкого элемента $\Delta t = t_{\text{доп min}} - t_0$. На рис. 3.25 приведены графики, характеризующие области целесообразного применения различных способов охлаждения [18]: естественное воздушное (области 1 и 2), принудительное воздушное (области 2, 3 и 4), естественное жидкостное (4), принудительное жидкостное (5, 6 и 7), естественное испарительное (6, 7, 8), принудительное испарительное (7, 8, 9).

Естественное воздушное охлаждение РЭА является наиболее простым и дешевым способом. Однако интенсивность такого охлаждения невелика, поэтому его использование возможно лишь при небольших удельных мощностях рассеивания ($< 0,1 \text{ Вт/см}^2$). В зависимости от конструктивного оформления различают две системы естественного охлаждения: первая — для блоков в герметичных кожухах, вторая — для блоков в перфорированных кожухах. При разработке системы охлаждения необходимо:

обеспечивать эффективную циркуляцию воздуха между нагревающимися элементами;

сильно нагревающиеся элементы снабжать ребрами охлаждения;

элементы, наиболее чувствительные к перегреву, изолировать экранами от непосредственного воздействия теплового потока;

обеспечивать надежный тепловой контакт между источниками теплоты и поверхностями охлаждения.

Принудительное воздушное охлаждение (ПВО) применяется при значениях q до 1 Вт/см^2 . Различают три основные схемы ПВО: внутреннее перемешивание, наружный обдув, продувку (рис. 3.26).

Естественное жидкостное охлаждение платы с элементами или больших элементов РЭА путем погружения их в жидкость, обладающую более высокой теплоотдачей, применяется редко, так как влечет за собой существенное усложнение конструкции.

Принудительное жидкостное охлаждение используется при высоких удельных мощностях рассеивания. Наибольшее распространение этот способ получил при охлаждении больших элементов (электродов мощных ламп, трансформаторов и т. д.).

Естественное испарительное охлаждение заключается в погружении блока в жидкость, над которой имеется паровой объем, отвод тепла осуществляется в процессе кипения жидкости на охлаждаемой поверхности. Широкое применение получают фитильные испарительные системы и «тепловые трубы». В этих системах для транспортировки жидкости используется капиллярный эффект.

При принудительном испарительном охлаждении жидкость с помощью насоса прокачивается через специальные каналы

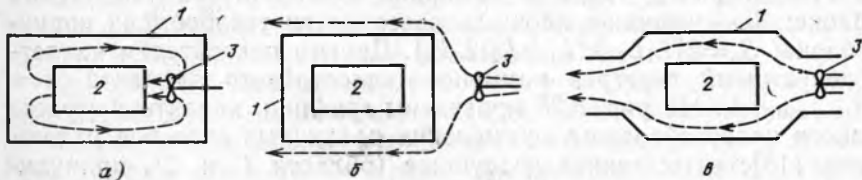


Рис. 3.26. Схемы принудительного воздушного охлаждения:

а — внутреннее перемешивание; б — наружный обдув; в — продувка; 1 — кожух; 2 — платы с элементами; 3 — вентилятор

в охлаждаемых узлах. Этот способ является самым эффективным.

Для охлаждения отдельных элементов РЭА, требующих более низких температур, чем остальные, применяются микрохолодильники. В качестве микрохолодильников применяются вихревые трубки, термоэлектрические батареи, устройства криогенной техники и т. д.

Методика расчета теплового режима блока РЭА при естественном и принудительном воздушных охлаждениях приведена в § 4.4.

Компоновка и предварительная разработка конструкции блока должна производиться с учетом основного принципа ремонтнопригодности — взаимозаменяемости и доступа к сменным узлам.

3.4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА И ОЦЕНКА ЕГО КАЧЕСТВА

В курсовом проекте задания, как правило, содержатся требования проектирования модулей не выше второго уровня. Поэтому при окончательной разработке конструкции можно выделить проектирование ячейки и блока.

Разработка конструкции ячейки. Ячейка является модулем первого уровня. На рис. 3.27 приведена классификация ее конструкций [8]. Предполагается, что на этапе предварительной компоновки определены: общее число ячеек, электрическая принципиальная схема каждой ячейки, размеры ПП (§ 4.1). Тогда следующая работа может быть разбита на следующие этапы.

1. Выбирается базовая несущая конструкция (БНК) ячейки. При этом следует учитывать, что для использования при проектировании модульного принципа конструирования разработаны ГОСТ 20504—75 и ведомственные нормалы, определяющие системы унифицированных типовых конструкций модулей. Все модули системы должны быть совместимы между собой по конструкционным, электрическим и эксплуатационным требованиям и обеспечивать функциональную полноту при построении аппаратуры определенного назначения.

Применение унифицированных базовых несущих конструкций (УБНК) позволяет обеспечить комплексное решение задач унификации модулей, существенно сократить сроки и стоимость проектирования аппаратуры, выполнить требования ремонтнопригодности. Конструкции УБНК ячеек, применяемые в различных отраслях промышленности, а также типовые ячейки, приведены в [2, 4, 8, 22]. На рис. 3.28 дан пример оформления сборочного чертежа источника стабилизированных напряжений. Данная конструкция имеет в своем составе ребристые радиаторы для обеспечения требуемого теплоотвода от транзисторов.

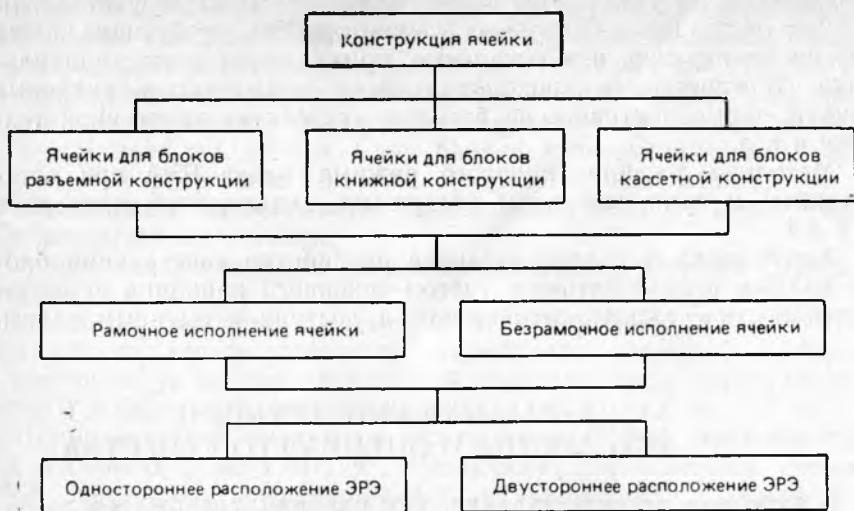


Рис. 3.27. Классификация конструкций ячеек

2. Решается задача рационального размещения корпусов ИС и ЭРЭ на ПП. При этом основными критериями являются: плотность упаковки, обеспечение нормального теплового режима, равномерное распределение масс элементов по поверхности платы. При этом целесообразно использовать автоматизированные методы.

3. Выбирается вариант электрического соединения ячейки с монтажной платой или панелью. Электрические соединения выполняются с помощью соединителей, соединительных плат, переходных контактов, плоских кабелей и монтажных проводов.

Соединители используются в ячейках, к которым предъявляют требования легкосъемности и быстрого электрического соединения. Соединительные платы и переходные контакты используют в печатных узлах, к которым предъявляют требования высокой надежности электрических соединений, малых габаритных размеров и массы. Плоские кабели применяются в печатных узлах для блоков книжной конструкции.

Наибольшее распространение получили соединители типов РППМ26, ГРППМ5, ГРППМ6, ГРППМ7, ГРППМ8, ГРППМ10, ГРППМ1, ГРППЗ, СНП58, СНП59, СНП34, ОНП-ВМ-4, РПП72, ОНП-МГ-14, СНП15, РППМ16, РППМЗ [2, 16].

Следует учесть, что не менее 10 % выходных контактов соединителей должно быть зарезервировано.

4. Определяется способ установки ИС и ЭРЭ на ПП. Установка корпусных ИС и ЭРЭ на ПП должна производиться в со-

ответствии с ОСТ 4.ГО.010.030 для соответствующих групп эксплуатации РЭА. Навесные элементы устанавливаются на микрополосковые платы СВЧ согласно ОСТ 4.ГО.054.209.

5. Проектирование ПП [4, 20, 5]. В первую очередь необходимо провести трассировку ПП. Эта задача в большинстве случаев может быть решена эффективно лишь автоматизированными методами [4, 5]. Ручная трассировка может быть рекомендована в курсовом проектировании только при проектировании очень простых плат либо микрополосковых плат СВЧ.

После трассировки производится расчет минимальных необходимых размеров элементов проводящего рисунка ПП с учетом протекающих токов (§ 4.3). Определяются: диаметр контактных площадок, ширина проводников и зазоров между ними; зазоры между проводниками и контактными площадками. Исходя из этих данных уточняется класс точности ПП и способ ее изготовления.

Далее необходимо оценить помехоустойчивость ячейки, например по методике, изложенной в § 4.2. На этом проектирование ПП заканчивается.

6. Определяется прочность ячейки в условиях механических воздействий — вибраций и ударов. Методика оценки вибро- и ударопрочности приведена в § 4.5. При необходимости следует изменить конструкцию ячейки: ввести дополнительные ребра жесткости, вибропоглощающие покрытия, амортизаторы.

7. В случае, если ячейка работает в условиях воздействия сильных внешних электромагнитных помех, нарушающих нормальную работу, проектируется экран. Методика определения требуемой эффективности экрана и расчет его конструктивных параметров приведены в § 4.2.

8. Осуществляется выбор защитных покрытий ПП. Для защиты от влаги печатных проводников применяются органические лаки ЭП-730 и УР-231, обеспечивающие твердое, прочное покрытие, выдерживающее температуру от -60 до $+120$ °С. Используются также бакелитовые лаки А, Б, ЭФ.

Разработка конструкции блока РЭА. Блок является основным элементом при функционально-блочном конструировании. Он объединяет кассеты, ячейки, печатные узлы и другие элементы. Разработку конструкции блока можно разделить на следующие этапы.

1. Выбор БНК модулей первого или второго уровней. Модулем второго уровня являются блоки, типовая конструкция которых представлена на рис. 3.29. Размер b может принимать значения: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160, 200, 240, 320, 360 мм. Типовые конструкции каркасов, применяемых при проектировании цифровой аппаратуры, представлены на рис. 3.30.

В некоторых случаях, например при проектировании бытовой аппаратуры, целесообразнее разрабатывать оригинальную несую-

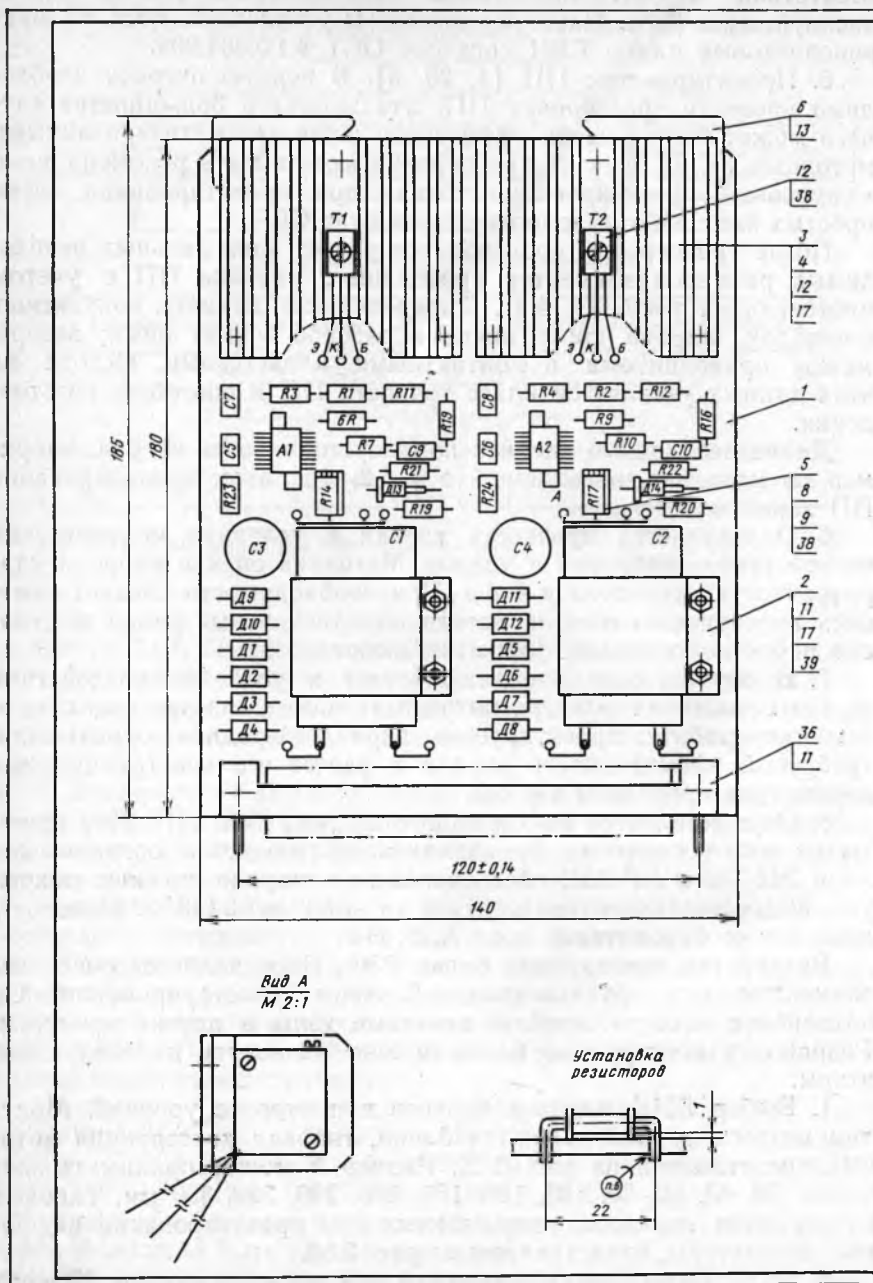
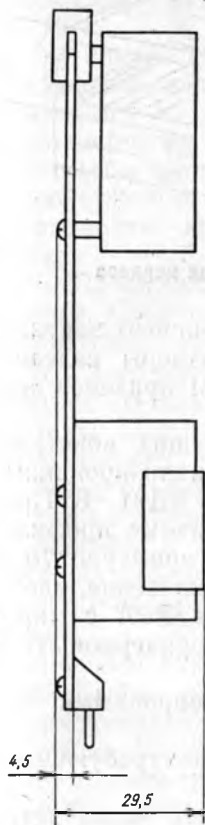


Рис. 3.28. Сборочный чертеж ячейки стабилизатора



1. Все размеры для справок
2. Установку элементов производить по ОСТ4ГО.010.030. Элементы устанавливать по вар. IIа
3. Транзисторы Т1,Т2 ставить на пасту КЛ78 ГОСТ19783-74
4. Маркировка элементов показана условно
5. Резьбовые соединения стопорить по НГО.019.001 вид 26 Б, зеленый
6. Паять по СБ1 ГОСТ 21931-76
7. Выступающие выводы разъема обрезать на высоту 1мм над платой
8. Остальные технические требования по ОСТ4 ГО.070.015

Конструирование РЭА

Источник стабили-
зированных напря-
жений Сборочный
чертеж

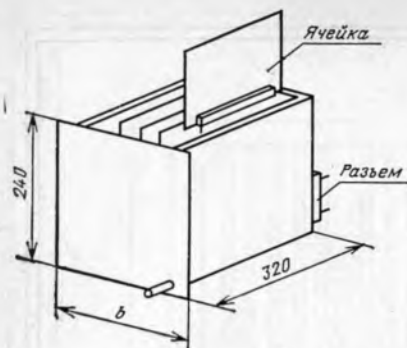


Рис. 3.29. Блок частичный

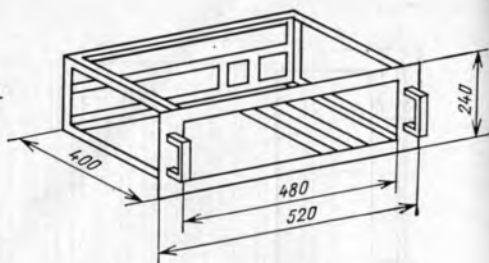


Рис. 3.30. Конструкция каркаса

щую конструкцию. Это позволяет повысить коэффициент заполнения объема, уменьшить массу и габаритные размеры изделия. В качестве примера такой конструкции на рис. 3.31 приведен чертеж автомобильной антенны.

2. Проектирование или выбор элементов несущих конструкций. При этом рекомендуется использовать специализированные профили, выполненные из алюминиевых сплавов АД31. В Приложении 1 представлены наиболее часто применяемые профили.

Масса несущих конструкций РЭА составляет примерно 70 % от общей массы аппаратуры. Поэтому задача уменьшения массы БНК является весьма актуальной. При создании РЭА с минимальной массой несущих конструкций следует придерживаться следующих правил [13]:

- выполнять все элементы конструкции равнопрочными без большого запаса по прочности;

- обеспечивать высокую жесткость способами, не требующими увеличения массы;

- упрощать несущую конструкцию до наименьшего числа деталей;

- широко применять легкие сплавы и пластмассы;

- выбирать рациональную форму профилей несущих конструкций;

- вводить в детали различные отверстия, выемки, проточки, чтобы избежать лишнего материала, не несущего нагрузки;

- вводить в тонколистовые детали отбортовки и выдавки, позволяющие повысить жесткость конструкции;

- использовать гальванические и лакокрасочные покрытия, имеющие минимальную массу.

Особое внимание следует уделить трем вопросам:

- выбор технологического варианта исполнения конструкции (литая, сварная, клепаная и т. д.);

выбор марки конструкционного материала;
выбор метода осуществления разъемных и неразъемных соединений деталей (свинчивание, сварка и т. д.).

Вопросы конструирования элементов несущих конструкций рассмотрены в учебной литературе [4, 16] и справочниках [8, 22, 23].

3. Проектирование элементов крепления и фиксации. Они должны обеспечивать требуемую надежность соединения при минимальных массогабаритных показателях. При этом рассматриваются вопросы:

способы крепления отдельных узлов конструкции;

конструкции направляющих, штырей, ловителей и т. д.;

варианты крепления при эксплуатационном осмотре и ремонте.

4. Проектирование элементов управления и индикации аппаратуры. Следует руководствоваться требованиями эргономики и технической эстетики при проектировании РЭА.

5. Проектирование конструктивных элементов защиты блока РЭА от механических воздействий. Методика выбора и расчета системы амортизации приведена в § 4.5. На этом этапе необходимо выбрать:

схему размещения амортизаторов и их число;

типы амортизаторов;

способы и элементы подводки к амортизированному блоку внешних электрических цепей;

способы предохранения крепежных изделий от самоотвинчивания;

способы повышения жесткости элементов конструкции.

6. Выбор конструктивных элементов электрического монтажа. Рассматриваются следующие вопросы:

выбор способа обеспечения электрических соединений (пайка, сварка, накрутка и т. д.);

выбор припоя и флюса;

выбор марки материала, сечения жилы, вида изоляции монтажных проводов;

выбор способа крепления жгутов, кабелей и проводов к несущим конструкциям блока;

выбор способа крепления навесных ЭРЭ на панели и другие элементы несущей конструкции;

выбор типов электрических соединителей;

7. Проектирование элементов заземления и экранов. На этом этапе необходимо определить:

способ осуществления контактных соединений в цепях заземления;

конструкцию элементов, лепестков заземления;

конструкцию и материал экрана.

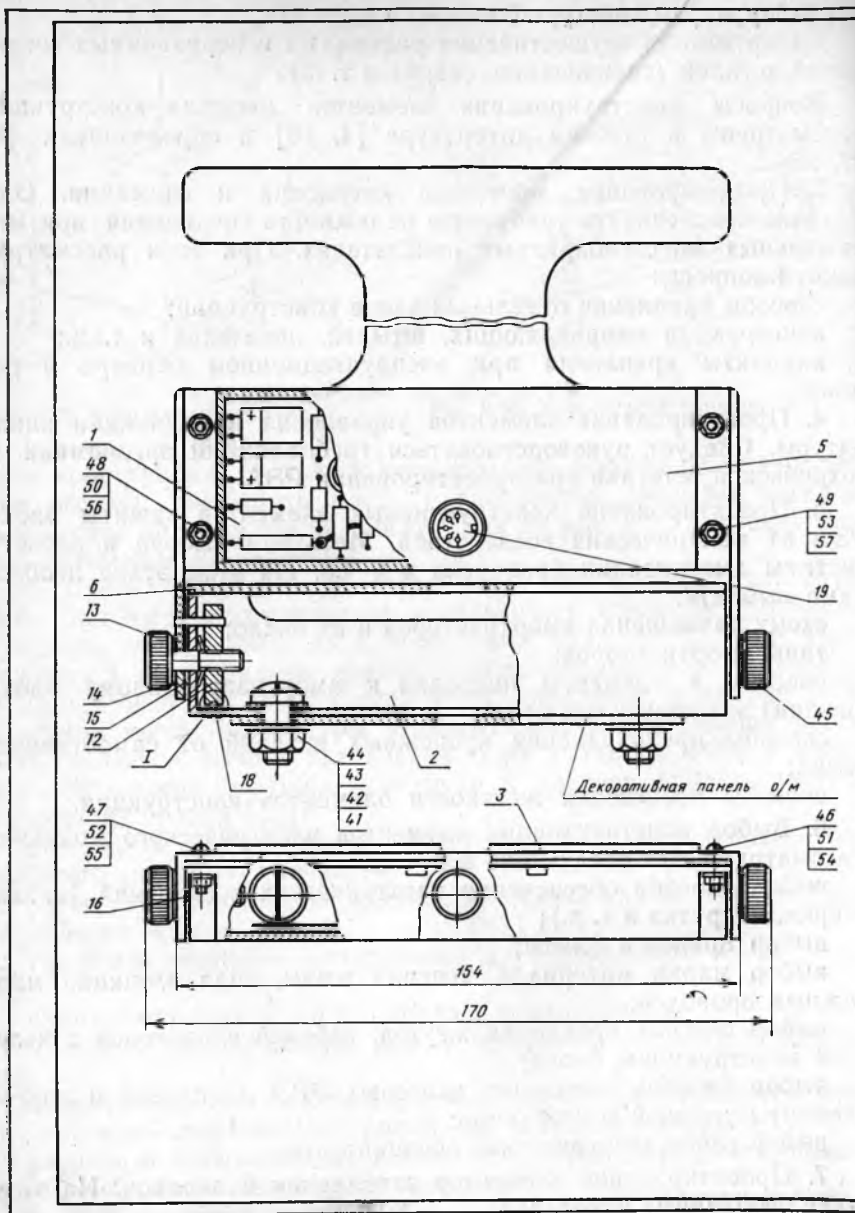


Рис. 3.31. Сборочный чертеж антенны



Вид I
удличено
М 1:1



1. Размеры для справок
2. Сборку и монтаж производить по данному чертежу в соответствии с ОСТ 4.ГО.054.089
3. Паять ПОС-61, ГОСТ 21931-76. Допускается паять ПОСК50-Ю ГОСТ 21931-16 или ПОС-40 ГОСТ 21931-76
4. Лудить ПОС-61 Допускается лудить ПОС-40 ГОСТ 21931-76
5. Винты поз. 46, 47, 48, 49 и шайбу поз. 50, 51, 52, 53 стопорить по ОСТ 4ГО 019-200.28.Г белый
6. Пломбировать замазкой У-20-А ТУ-38-105-351-71
7. Остальные технические требования по ОСТ 4ГО.070.015

						Конструирование	Р5А
						Антенна	
						Сборочный черт.	

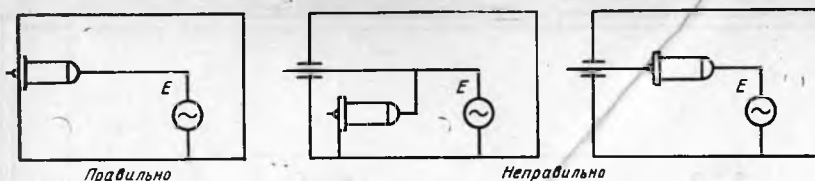


Рис. 3.32. Установка проходных конденсаторов

Методика расчета эффективности экранирования приведена в § 4.2. При проектировании экранов, кроме достижения необходимых электрических параметров, необходимо решить сопряженные задачи, например обеспечение технологичности конструкции, удобство использования и т. д. Экраны обычно изготавливаются из тонколистового проката. Процесс производства включает такие основные операции, как заготовку, формообразование, сборку и отделочные работы.

Для подавления помех, проникающих во внутреннюю область экрана по электрическим цепям, применяются помехоподавляющие конденсаторы типа КЗ, КБП и дроссели. Помехоподавляющие свойства проходного конденсатора очень сильно зависят от его размещения и способа крепления. Проходной конденсатор устанавливается на плоскость экрана (рис. 3.32).

8. Выбор конструктивных элементов СОТР [15, 21]. Здесь должны быть рассмотрены и выбраны:

- конструкции воздухопроводов, теплообменников, фильтров;
- тип вентилятора;
- типы радиаторов (см. § 4.4);
- форма и расположение вентиляционных отверстий [15];
- конструкция тепловых экранов.

В подтверждение правильного выбора элементов СОТР должен быть проведен расчет теплового режима всего блока, например, по методике, изложенной в § 4.4.

9. Выбор защитных и защитно-декоративных покрытий. Для каждой детали надо выбрать конкретный вид покрытия.

Следует учитывать, что металлические покрытия образуют с основным материалом детали контактную пару. Покрытие с отрицательным потенциалом по отношению к металлу детали называется анодным, с положительным — катодным. Чем больше разница электрохимических потенциалов между контактирующими металлами, тем интенсивнее разрушается под действием коррозии катод. При анодном покрытии вследствие коррозии разрушается само покрытие, при катодном — основной материал детали.

В качестве наиболее распространенных материалов покрытий для стали используются кадмий, цинк, хром, олово, никель; для сплавов меди — хром, никель, олово, серебро, золото.

Из неметаллических химических способов покрытия широкое распространение получили фосфатирование, оксидирование и анодирование. Образованная на поверхности металлов защитная пленка химически пассивна, устойчива, имеет хороший декоративный вид, толщина покрытий — от 1 до 15 мкм. Используются также лакокрасочные покрытия.

Вид и толщину покрытий выбирают в зависимости от назначения, условий эксплуатации [16].

10. Выбор способов маркировки деталей и сборочных единиц. Здесь должны быть определены способы маркировки:

проводов, кабелей;

ячеек, функциональных узлов, печатных плат и т. д.

11. Оценка требований комплексной микроминиатюризации. Ниже приведена рекомендуемая методика расчета уровня миниатюризации РЭА.

1) Определяется коэффициент применяемости ИС различной степени интеграции. Степенью интеграции g называют десятичный логарифм от числа n эквивалентных элементов, образующих ИС: $g = \lg n$. Тогда можно представить следующие градации ИС: $g = 0$ — дискретные элементы; $g \geq 1$ — микросхемы с малой степенью интеграции ($100 > n \geq 1$); $g \geq 2$ — микросхемы со средней степенью интеграции ($1000 > n \geq 100$); $g \geq 3$ — микросхемы с высокой степенью интеграции ($n \geq 1000$).

Коэффициент применяемости микросхем g -степени интеграции определяется по формуле

$$K_{\text{пр ИС } g} = \frac{\sum_{i=1}^m n_{gi} N_{gi}}{\sum_{g=0}^3 \sum_{i=1}^m n_{gi} N_{gi}},$$

где N_{gi} — число микросхем i -го типа g -й степени интеграции; n_{gi} — число эквивалентных элементов в микросхеме i -го типа g -й степени интеграции; m_g — число типов микросхем g -й степени интеграции.

2) Определяется коэффициент заполнения объема модулей первого уровня, входящих в состав изделия:

$$K_{3.01} = \sum_{q=1}^p m_q V_q / V_1,$$

где m_q — число корпусов микросхем q -го типа в модуле 1-го уровня; V_q — установочный объем корпуса микросхем q -го типа; V_1 — объем модуля 1-го уровня; p — число типов корпусов микросхем.

3) Определяется коэффициент заполнения объема модулей на уровне $d \geq 2$ (блока, стойки и т. д.):

$$K_{з.о.d} = \sum_{i=1}^{m_{d-1}} V_{i,d-1}/V_d,$$

где $V_{i,d-1}$ — объем i -го модуля $d-1$ -го уровня; m_{d-1} — число модулей $d-1$ -го уровня; V_d — объем модуля d -го уровня.

4) Определяется коэффициент качества F_g применяемой в изделии элементной базы. За высший уровень, по отношению к которому ведется сравнение, применяется количественный показатель качества микросхем с высокой степенью интеграции (СБИС):

$$F_g = \sum_{j=1}^r \frac{\bar{y}_{jg}}{y_{jg}} \varphi_{jg},$$

где φ_{jg} — значимость j -го показателя качества микросхемы g -й степени интеграции; r — число показателей качества; $\bar{y}_{jg} = y_{jg}/n_g$; y_{jg} — значение j -го показателя качества микросхемы; n_g — число эквивалентных элементов в микросхеме g -й степени интеграции.

Все сравниваемые показатели должны иметь одинаковую направленность влияния на качество изделия. Например, с уменьшением значений выбранных показателей качество повышается. Показатели, не удовлетворяющие этому условию, пересчитываются по формуле

$$\bar{y}'_{jg} = 1/\bar{y}_{jg}.$$

В качестве критериев сравнения микросхем выбираются следующие показатели: масса $M_g = y_{1g}$ объем $V_g = y_{2g}$, энергопотребление $W_g = y_{3g}$, надежность $y_{4g} = 1/|\ln \lambda_g|$; стоимость $C_g = y_{5g}$. Оценка показателей надежности в логарифмическом масштабе обусловлена необходимостью приведения в соответствие величин, отличающихся друг от друга на один-два порядка для различных степеней интеграции микросхем.

Коэффициенты значимости φ_{jg} можно определить исходя из следующих соображений. Средняя интенсивность отказов эквивалентного элемента микросхемы 3-й степени интеграции — $\bar{\lambda}_{\text{БИС}}$. Средняя интенсивность отказов эквивалентного элемента микросхемы g -й степени интеграции — $\bar{\lambda}_g$. Тогда такую же вероятность безотказной работы, как у более надежной СБИС $P_1(t)$, можно получить, используя h_g -кратное резервирование, причем кратность резервирования определяется по формуле

$$h_g = \frac{\ln(\bar{\lambda}_{\text{БИС}} t)}{\ln(\bar{\lambda}_g t)}.$$

В результате h_g -кратного резервирования масса эквивалентного модуля с резервированием увеличивается:

$$M_{\text{эkv}} g = h_g m_3,$$

где m_3 — масса одной резервируемой микросхемы.

Аналогично увеличатся объем $V_{\text{эkv}}$, энергопотребление $W_{\text{эkv}}$, стоимость $C_{\text{эkv}}$: $V_{\text{эkv}} g = h_g v_3$, $W_{\text{эkv}} g = h_g \omega_3$, $C_{\text{эkv}} g = h_g c_3$, где v_3 , ω_3 , c_3 — объем, энергопотребление, стоимость резервируемой микросхемы соответственно. Следовательно, значимость показателя безотказной работы микросхем выше значимости других показателей во столько раз, во сколько они ухудшаются при резервировании по сравнению с одной СБИС, т. е.

$$\varphi_{Mg} = \varphi_{Vg} = \varphi_{Wg} = \varphi_{Cg} = \varphi_{Hg} / h_g.$$

С учетом требований нормирования $\sum_{j=1}^r \varphi_{jg} \equiv 1$ получаем

$$\varphi_{Hg} = \frac{h}{4+h}, \quad \varphi_{Mg} = \varphi_{Vg} = \varphi_{Wg} = \varphi_{Cg} = \frac{1}{4+h}.$$

Подставляя значения φ_{jg} в выражение для коэффициента качества, находим F_g .

5) Определяется обобщенный показатель уровня миниатюризации

$$\mu = K_{3.0d} \sum_{g=1}^{l \parallel} K_{\text{пр.ИСg}} F_g,$$

где l — число степеней интеграции микросхем, используемых в изделии.

12. Оценка технологичности конструкции в целом. С этой целью определяются коэффициенты унификации и технологичности.

Коэффициент унификации изделия

$$K_y = \frac{E_y + D_y}{E + D},$$

где $E_y = E_{y.з} + E_{y.п} + E_{ст}$ — число унифицированных сборочных единиц в изделии; $D_y = D_{y.з} + D_{y.п} + D_{ст}$ — число унифицированных деталей, являющихся составными частями изделия и не вошедших в E_y ; $E_{y.з}$ и $D_{y.з}$ — число заимствованных унифицированных сборочных единиц и деталей; $E_{y.п}$ и $D_{y.п}$ — число покупных унифицированных сборочных единиц и деталей; $E_{ст}$ и $D_{ст}$ — число стандартных сборочных единиц и деталей; E и D — общее число сборочных единиц и деталей. Данный показатель выражает унификацию изделия, учитывая все его составные части, исключая крепежные детали.

Методика расчета коэффициента технологичности приведена в [8].

4.1. КОМПОНОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ БЛОКА РЭА

Чтобы определить число ячеек (модулей 1-го уровня), необходимых для размещения всех ЭРЭ устройства, надо решить задачу компоновки или функционального разбиения. Предварительно электрическая принципиальная схема блока должна быть представлена ненаправленным мультиграфом [5].

Конструктивными ограничениями в задаче функционального разбиения являются: число кусков разрезания мультиграфа k ; максимальное число конструктивных элементов или максимальная площадь, занимаемая ими, ограниченные размерами ПП для модуля 1-го уровня; максимальное число внешних связей каждого отдельного куска графа, ограниченное числом контактов используемого соединителя.

Для функционального разбиения в настоящее время рекомендуется использовать последовательный и итерационный алгоритмы, а также их комбинации [5]. При этом целесообразно применять как логические, так и эвристические методы. Электрическая принципиальная схема изделия разбивается на функционально законченные узлы исходя из принципа работы и электрических связей между отдельными ЭРЭ. Далее находится установочная площадь каждого функционального узла S_{x_i} (x_i — условное обозначение i -го узла; $i = 1, 2, \dots, N$ — число функциональных узлов). На рис. 4.1 представлен последовательный алгоритм функционального разбиения электрической принципиальной схемы.

1. Исходными данными являются: матрица смежности функциональных узлов, представленных в виде вершин мультиграфа $[a_{ij}]$. Вершиной графа под номером 0 является множество внешних соединителей изделия, а также элементов, не устанавливаемых на модуль 1-го уровня (ячейку). Элементами матрицы смежности являются числа электрических связей между вершинами.

Здесь же вводятся: максимальное число связей каждого формируемого модуля m и его максимальная установочная площадь, определяемая размерами ПП; установочные площади каждой вершины S_{x_i} , $i = 1, 2, \dots, N$.

2. По матрице смежности определяем локальные степени вершин:

$$\rho(x_i) = \sum_{j=0}^N a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

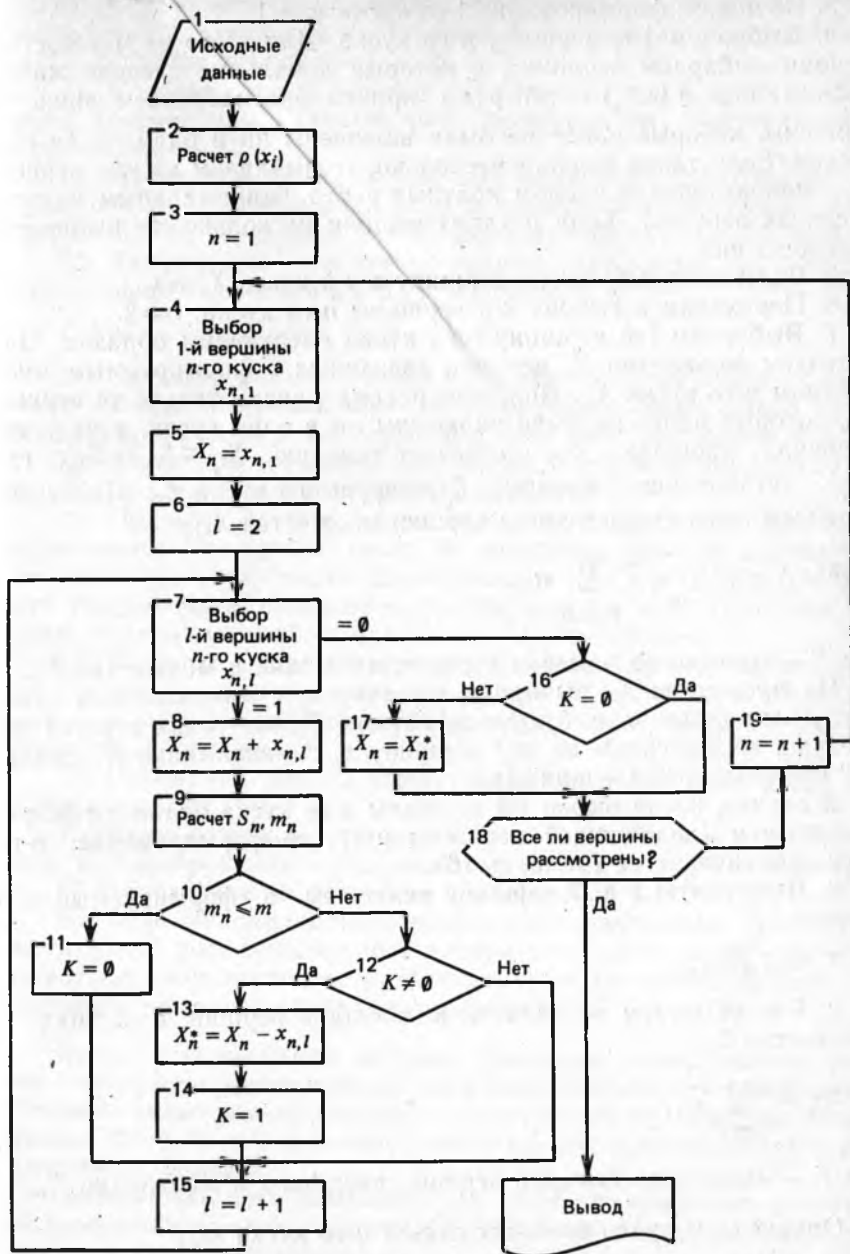


Рис. 4.1. Схема последовательного алгоритма функционального разбиения

3. Начинаем формирование 1-го куска: $n=1$.

4. Выбираем 1-ю вершину n -го куска. Для этого из множества вершин выбираем вершины, у которых локальные степени минимальны, т. е. $\rho(x_{n,1}) = \min \rho(x_i)$, причем рассматриваем лишь те вершины, которые ранее не были включены ни в один из $(n-1)$ кусков. Если таких вершин несколько, то выбираем из них вершину с максимальным числом кратных ребер (минимальным числом смежных вершин). Если и таких вершин несколько, то выбираем любую из них.

5. Включаем выбранную вершину в n -й кусок $X_n = x_{n,1}$.

6. Переходим к выбору 2-й вершины n -го куска; $l=2$.

7. Выбираем l -ю вершину n -го куска следующим образом. Определяем множество X_s вершин, связанных с формируемым множеством n -го куска X_n . При этом рассматриваем только те вершины, которые ранее не были включены ни в один кусок, а их установочная площадь S_{x_i} отвечает условию $S_{x_i} \leq S_m - S_{X_n}$, где S_{X_n} — установочная площадь формируемого куска X_n . Далее определяем относительные веса вершин множества X_s :

$$\delta(x_i) = \rho(x_i) - 2 \sum_{p \in E} a_{ip},$$

где E — множество номеров вершин, входящих в множество X_n .

Из множества X_s выбираем вершину x_j с минимальным относительным весом, т. е. $\delta(x_j) = \min \delta(x_i)$. Если таких вершин несколько, то выбираем из них вершину x_j с максимальной локальной степенью: $\rho(x_j) = \max \rho(x_i)$.

В случае, когда выбор l -й вершины n -го куска окажется безрезультатным (подходящей вершины нет), то формирование n -го куска заканчивается (далее п. 16).

8. Выбранную в п. 7 вершину включаем в формируемый n -й кусок:

$$X_n = X_n + x_{n,l}.$$

9. Рассчитываем установочную площадь вершин, входящих в множество X_n :

$$S_{X_n} = \sum_{i \in F} S_{x_i},$$

где F — множество номеров вершин, входящих в множество X_n .

Определяем число внешних связей n -го куска m_n :

$$m_n = \sum_{i \in F} \delta(x_i) = \sum_{i \in F} \rho(x_i) - 2 \sum_{i \in F} \sum_{p \in F} a_{ip}.$$

10. Сравниваем рассчитанное число внешних связей m_n и максимальное допустимое их число m . Если $m_n \leq m$, то переходим к п. 11. В противном случае — п. 12.

11. Считаем, что включение l -й вершины в n -й кусок отвечает всем требованиям. Данный факт регистрируем значением $k=0$. Переходим к п.15.

12. Проверяем, было ли удачным включение в n -й кусок предыдущей ($l-1$)-й вершины. Если предыдущий цикл прошел успешно ($k=0$), то переходим к п.13. Если нет ($k=1$), то — к п.15.

13. Запоминаем множество вершин n -го куска, которое было получено до включения в его l -й вершины, т. е.

$$X_n^* = X_n - x_{n,l}$$

14. Считаем, что включение l -й вершины в n -й кусок не отвечает условию неперевышения числа внешних связей куска максимального значения и регистрируем этот факт значением $k=1$.

15. Переходим к выбору следующей ($l+1$)-й вершины n -го куска: $l=l+1$. Повторяем процедуру, начиная с п. 7.

16. Подошли к этапу, когда вся установочная площадь S_m использована. Проверяем, было ли выполнено условие ограничения по числу внешних связей формируемого куска, т. е. $m_n \leq m$. Если это условие было выполнено, то переходим к п.18. При этом считаем, что n -й кусок сформирован, т. е. X_n определено.

17. В случае, когда условие ограничения числа внешних связей не выполнено, формируемое множество X_n оставляем таким, каким оно было после последнего удачного цикла выбора очередной вершины, т. е. $X_n = X_n^*$.

18. Проверяем, все ли вершины рассмотрены. Если все, то переходим к п.20.

19. Если остались еще нерассмотренные вершины, то переходим к формированию следующего ($n+1$)-го куска, начиная с п.4.

20. Определяем число кусков мультиграфа.

На этом функциональное разбиение заканчиваем. Следует отметить, что последовательный алгоритм не дает оптимального варианта функционального разбиения, поэтому целесообразно производить несколько вариантов разбиения.

Пример функционального разбиения. Рассмотрим функциональное разбиение электрической принципиальной схемы блока управления, который является составной частью модуля штамповки в составе гибкого автоматизированного участка (ГАУ). Модуль штамповки предназначен для автоматизации загрузочно-разгрузочных операций.

Электрическая принципиальная схема блока предварительно разбита на 14 функционально законченных узлов. Конструктивные параметры функциональных узлов приведены в табл. 4.1.

Выбираем размеры ПП ячеек 170×75 мм. В качестве соединителя используем РППМ26-50Ш. В этом случае установочная площадь ячейки составляет

Таблица 4.1. Конструктивные параметры функциональных узлов

Номер узла	Функциональное назначение	Входящие элементы					число, шт.	Установочная площадь элемента, мм ²	Установочная площадь узла, мм ²
		Микросхемы	Полупроводниковые приборы	Конденсаторы	Резисторы	Прочие элементы			
1	Узел сопряжения	K155		K10	МЛТ	15	146,25	3094	
						10	67,5		
						6	37,5		
2	Узел управления столом	K155		K10	МЛТ	3	146,25	649	
						2	76,5		
						2	37,5		
3	Узел управления	K155		K10	МЛТ	10	146,25	2303	
						8	67,5		
						8	37,5		
4	Узел сравнения	K155		K10	МЛТ	8	146,25	1844	
						7	67,5		
						1	89,25		
						2	37,5		
						1	37,5		
5	Узел регистров	K155			ОМЛТ	13	146,25	1976	
						2	37,5		
6	Узел пуска и обнуления	K155		K10		5	146,25	1847	
						10	67,5		
7	Узел выработки команд управления манипулятором	K155		K53	ОМЛТ	2	89,25	3474	
						7	37,5		
						14	146,25		
						12	67,5		
						1	89,25		
8	Узел логики	K155		КМ-6		8	37,5	293	
						1	226,8		
9	Узел сравнения	K155 K293				2	146,25	476	
						1	146,25		
10	Узел сопряжения	K293			ОМЛТ	1	37,5	1140	
						6	146,25		
11	Узел логики	K155		K10	ОМЛТ	7	37,5	1953	
						7	146,25		
						8	67,5		
12	Узел выработки команд управления подъемником	K293			ОМЛТ	1	89,25	439	
						8	37,5		
13	Узел сопряжения	K293				3	146,25	439	
						3	146,25		
14	Узел выходных усилителей		2Т301 КТ801 КД510 КД411			1	262,5	1419	
						1	262,5		
						1	52,6		
						1	62,5		
						8	67,5		
				K10 K53	МЛТ	1	89,25		

7200 мм². Суммарная установочная площадь всех узлов блока составляет 21 346 мм². Следовательно, примерное число ячеек с учетом коэффициента заполнения равно 5 ... 6.

На рис. 4.2 приведен мультиграф электрической принципиальной схемы блока управления. Узлом с индексом 0 обозначены все внешние связи блока с элементами управления и индикации. Матрица смежности этого мультиграфа имеет следующий вид:

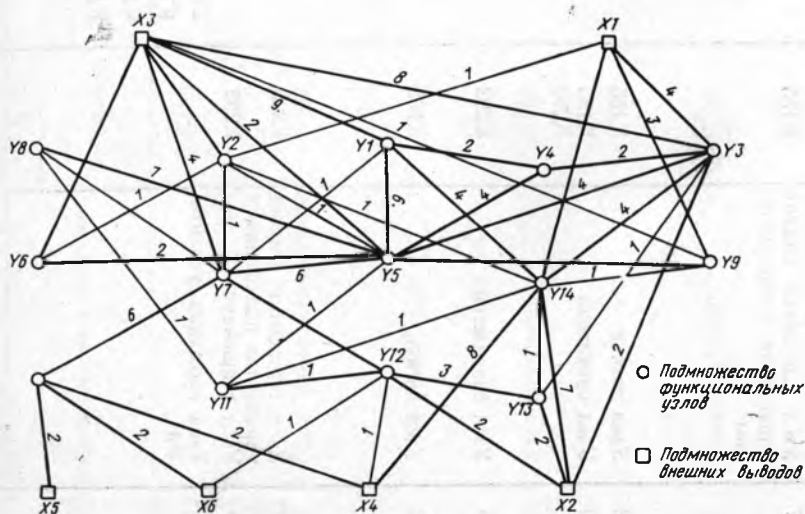
$$[a_{ij}] = \begin{array}{c|cccccccccccccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ \hline 0 & 0 & 9 & 13 & 14 & 10 & 2 & 3 & 4 & 10 & 4 & 6 & 10 & 4 & 2 & 21 \\ 1 & 9 & 0 & 0 & 0 & 2 & 6 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 2 & 13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 14 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 10 & 2 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 6 & 1 & 4 & 4 & 0 & 2 & 6 & 7 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 6 & 1 & 0 & 1 & 0 & 6 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 8 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 10 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 11 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 12 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 0 \\ 13 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 1 \\ 14 & 21 & 4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$


Рис. 4.2. Мультиграф схемы блока управления

Произведем функциональное разбиение блока с учетом следующих ограничений: $S_m=7200$ мм², $m=50$.

1. Определяем локальные степени вершин:

$$\rho(x_1)=22, \rho(x_2)=17, \rho(x_3)=22, \rho(x_4)=18, \rho(x_5)=35, \rho(x_6)=7, \rho(x_7)=23, \\ \rho(x_8)=19, \rho(x_9)=7, \rho(x_{10})=12, \rho(x_{11})=14, \rho(x_{12})=11, \rho(x_{13})=7, \rho(x_{14})=30.$$

2. Минимальные локальные степени, равные 7, имеют вершины x_6 , x_9 и x_{13} . Из них минимальное число смежных вершин — 3 имеет x_9 . Поэтому включаем вершину x_9 в 1-ю ячейку:

$$x_9 \in \text{я1}.$$

3. С вершиной x_9 связаны x_5 и x_{14} . Определяем их относительные веса:

$$\delta(x_5)=35-2 \cdot 2=31; \delta(x_{14})=30-2 \cdot 1=28.$$

Минимальный вес имеет x_{14} , поэтому включаем ее в 1-ю ячейку и определяем установочную площадь и число внешних связей:

$$S_{\text{я1}}=476+1419=1895 \text{ мм}^2; m=7+30-2 \cdot 1=35.$$

4. Определяем относительные веса вершин, связанных с x_9 и $\delta(x_1)=14$, $\delta(x_2)=15$, $\delta(x_3)=20$, $\delta(x_{11})=31$, $\delta(x_{11})=12$, $\delta(x_{13})=5$. Включаем в я1 вершину с минимальным весом — x_{13} . Тогда

$$S_{\text{я1}}=1895+439=2334 \text{ мм}^2; m_{\text{я1}}=35+5=40.$$

5. Определяем относительные веса вершин, связанных с x_9 , x_{13} , x_{14} : $\delta(x_1)=14$, $\delta(x_2)=15$, $\delta(x_3)=18$, $\delta(x_5)=31$, $\delta(x_{11})=12$, $\delta(x_{12})=5$. Включаем в я1 узел X_{12} :

$$S_{\text{я1}}=2334+439=2773 \text{ мм}^2; m_{\text{я1}}=40+5=45.$$

Условия ограничения пока выполняются.

6. Находим $\delta(x_1)=14$, $\delta(x_2)=15$, $\delta(x_3)=18$, $\delta(x_5)=31$, $\delta(x_7)=17$, $\delta(x_{11})=10$. Включаем в я1 узел X_{11} , тогда

$$S_{\text{я1}}=2773+1953=4726 \text{ мм}^2; m=45+10=55.$$

Таким образом, включение узла X_{11} в 1-ю ячейку привело к недопустимому увеличению числа внешних связей. Однако установочная площадь ячейки еще позволяет ее дальнейшее заполнение узлами с установочной площадью не более 1474 мм².

7. Находим относительные веса вершин, связанных с я1:

$$\delta(x_1)=14, \delta(x_2)=15, \delta(x_3)=18, \delta(x_5)=29, \delta(x_7)=17, \delta(x_8)=17.$$

Минимальный вес имеет узел X_2 , однако его установочная площадь ($S_{x_1}=3094$ мм²) не позволяет включить его в 1-ю ячейку. Поэтому включаем узел X_3 :

$$S_{\text{я1}}=4726+649=5375 \text{ мм}^2; m_{\text{я1}}=55+15=70.$$

По-прежнему $m_{\text{я1}} > m$. Оставшаяся на ячейке площадь составляет 1825 мм².

8. Находим $\delta(x_1)=14$, $\delta(x_3)=18$, $\delta(x_4)=14$, $\delta(x_5)=27$, $\delta(x_6)=5$, $\delta(x_7)=15$, $\delta(x_8)=17$. Из этих вершин в 1-ю ячейку можно включить только узел X_8 , так как установочная площадь остальных узлов слишком велика. Тогда имеем:

$$S_{\text{я1}}=5375+293=5668 \text{ мм}^2; m_{\text{я1}}=70+17=87.$$

По-прежнему $m_{я1} > m$, оставшаяся площадь составляет 1532 мм².

9. Из оставшихся вершин только узел X_{10} имеет установочную площадь, позволяющую включить его в 1-ю ячейку. Однако это не приводит к уменьшению числа внешних связей. Следовательно, в ячейку я1 могут быть включены только узлы $X_9, X_{12}, X_{13}, X_{14}$. На этом формирование ячейки я1 закончено:

$$S_{я1} = 2773 \text{ мм}^2, m_{я1} = 45.$$

10. Матрица смежности мультиграфа с учетом вершин, вошедших в 1-ю ячейку, примет вид:

$$[a_{ij}^1] = \begin{matrix} & & 0 & я1 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 10 & 11 \\ \begin{matrix} 0 \\ я1 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 10 \\ 11 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccccccccc} 0 & 31 & 9 & 13 & 14 & 10 & 2 & 3 & 4 & 10 & 6 & 10 & \\ 31 & 5 & 4 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 & 3 & 0 & 0 & 2 & \\ 9 & 4 & 0 & 0 & 0 & 2 & 6 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & \\ 13 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \\ 14 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 10 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 2 & 2 & 6 & 1 & 4 & 4 & 0 & 2 & 6 & 7 & 0 & 1 & \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \\ 4 & 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 6 & 1 & 0 & 1 & 6 & 0 & \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & \\ 10 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \end{array} \right. \end{matrix}$$

11. Минимальную локальную степень среди оставшихся вершин имеет узел $X_6, \rho(x_6) = 7$. Включаем ее во 2-ю ячейку:

$$X_6 \in я2.$$

12. Определяем относительные веса вершин, связанные с $X_6: \delta(x_2) = 15, \delta(x_5) = 31, \delta(x_7) = 21$. Включаем в я2 узел X_2 , тогда

$$S_{я2} = 1847 + 649 = 2496 \text{ мм}^2; m_{я2} = 7 + 15 = 22.$$

13. С вершинами x_6 и x_2 связаны узлы X_5, X_7 . Находим их относительные веса: $\delta(X_5) = 29, \delta(X_7) = 19$. Включаем в я2 узел X_7 :

$$S_{я2} = 2496 + 3474 = 5970 \text{ мм}^2; m_{я2} = 22 + 19 = 41.$$

14. Находим относительные веса вершин, связанных с я2: $\delta(x_1) = 20, \delta(x_5) = 17, \delta(x_8) = 17, \delta(x_{10}) = 0$. Включаем в я2 узел X_{20} :

$$S_{я2} = 5970 + 1140 = 7110 \text{ мм}^2, m_{я2} = 41.$$

Т а б л и ц а 4.2. Результаты функционального разбиения

Номер ячейки	Входящие узлы	Установочная площадь, мм ²	Число внешних связей	Коэффициент заполнения
1	$X_9, X_{12}, X_{13}, X_{14}$	2773	45	0,39
2	X_2, X_6, X_7, X_{10}	7110	41	0,99
3	X_5, X_8, X_{11}	4222	50	0,59
4	X_3, X_4	4147	36	0,58
5	X_1	3094	22	0,43

Оставшаяся на 2-й ячейке площадь не позволяет включить в нее ни один из свободных узлов. Следовательно, формирование 2-й ячейки закончено: $я2 \ni X_2, X_6, X_7, X_{10}$; $S_{я2} = 7110 \text{ мм}^2$, $m_{я2} = 41$.

15. Матрица смежности примет вид:

$$[a_{ij}^{II}] = \begin{array}{c|cccccccc} & 0 & я1 & я2 & 1 & 3 & 4 & 5 & 8 & 11 \\ \hline 0 & 0 & 31 & 26 & 9 & 14 & 10 & 2 & 10 & 10 \\ я1 & 31 & 5 & 4 & 4 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 \\ я2 & 26 & 4 & 9 & 1 & 0 & 0 & 9 & 1 & 0 \\ 1 & 9 & 4 & 1 & 0 & 0 & 2 & 6 & 0 & 0 \\ 3 & 14 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 10 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 2 & 9 & 6 & 4 & 4 & 0 & 7 & 1 \\ 8 & 10 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 1 \\ 11 & 10 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

16. Минимальную локальную степень имеет узел X_{11} . Включаем его в 3-ю ячейку. Определяем относительные веса смежных с ним вершин: $\delta(x_5) = 33$, $\delta(x_8) = 17$. Включаем в я3 узел X_8 :

$$S_{я3} = 1953 + 293 = 2246 \text{ мм}^2 \quad m = 14 + 17 = 31.$$

17. Находим относительный вес смежной вершины x_5 : $\delta(x_5) = 19$. Включаем вершину x_5 в я3: $S_{я3} = 2246 + 1976 = 4222 \text{ мм}^2$, $m_{я3} = 31 + 19 = 50$.

18. Находим $\delta(x_1) = 10$, $\delta(x_3) = 14$, $\delta(x_4) = 10$. Включаем в я3 узел X_4 : $S_{я3} = 4222 + 1844 = 6066 \text{ мм}^2$, $m_{я3} = 50 + 10 = 60$. Нарушается условие ограничения по внешним связям. Оставшаяся площадь составляет 1134 мм^2 . Ни один из оставшихся узлов уже не может быть включен в 3-ю ячейку. Следовательно, 3-я ячейка содержит узлы X_{11} , X_8 и X_5 : $S_{я3} = 4222 \text{ мм}^2$, $m_{я3} = 50$.

19. Матрица смежности принимает вид:

$$[a_{ij}^{III}] = \begin{array}{c|cccccc} & 0 & я1 & я2 & я3 & 1 & 3 & 4 \\ \hline 0 & 0 & 31 & 26 & 22 & 9 & 14 & 10 \\ я1 & 31 & 5 & 4 & 4 & 4 & 2 & 0 \\ я2 & 26 & 4 & 9 & 10 & 1 & 0 & 0 \\ я3 & 22 & 4 & 10 & 9 & 6 & 4 & 4 \\ 1 & 9 & 4 & 1 & 6 & 0 & 0 & 2 \\ 3 & 14 & 2 & 0 & 4 & 0 & 0 & 2 \\ 4 & 10 & 0 & 0 & 4 & 2 & 2 & 0 \end{array}$$

20. Объединяем узлы X_4 и X_3 в ячейку я4:

$$S_{я4} = 2303 + 1844 = 4147 \text{ мм}^2, \quad m_{я4} = 36.$$

21. На ячейке я5 размещаем язел X_2 : $S_{я5} = 3094 \text{ мм}^2$, $m_{я5} = 22$.

Результаты функционального разбиения сводим в табл. 4.2. Средний коэффициент заполнения $k_s = 0,59$.

4.2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Целью расчета электромагнитной совместимости является определение работоспособности устройства в условиях воздействия перекрестных помех в линиях связи, а также внешних электромагнитных полей.

Расчет перекрестных помех в линиях связи. Схема возникновения перекрестных помех между соседними проводниками представлена на рис. 4.3. Исходные данные для расчета являются: E — напряжение генератора в активной линии связи, $E = E_0 e^{j\omega t}$; ω — круговая частота генератора; R_1, R_2, R_3 — сопротивления нагрузок в активной и пассивной линиях; тип электрических соединений; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды между проводниками; δ — расстояние между проводниками (конструкционные параметры линий связи приведены в табл. 4.3); помехоустойчивость микросхем U_n ; длина области связи проводников l .

Диэлектрическая проницаемость среды между проводниками, расположенными на наружных поверхностях платы, покрытой лаком, $\epsilon_r = 0,5 (\epsilon_n + \epsilon_l)$, где ϵ_n и ϵ_l — диэлектрические проницаемости материала платы и лака (для стеклотекстолита $\epsilon_n = 6$ для лаков УР-231 и ЭП-9114 $\epsilon_l = 4$).

1. Определяем взаимные емкости C и индуктивности M линий связи по формулам, приведенным в табл. 4.3, для заданного типа электрических соединений.

2. Вычисляем сопротивление изоляции между проводниками активной и пассивной линий связи. Для проводников, расположенных на одной поверхности ПП,

$$R_n = \rho_{\square} \delta / l, \quad (4.1)$$

где ρ_{\square} — удельное поверхностное сопротивление основания ПП (для ПП из стеклотекстолита $\rho_{\square} = 5 \cdot 10^{10}$ Ом, из гетинакса — 10^9 Ом).

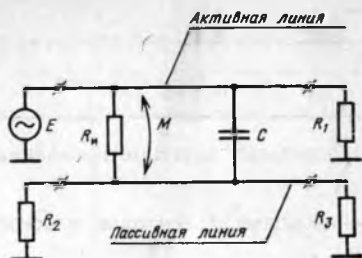
Сопротивление изоляции между проводниками, расположенными в объеме многослойной печатной платы на внутренних слоях или на противоположных сторонах двусторонней платы, определяется из выражения

$$R_n = \rho_v h / F, \quad (4.2)$$

где h — толщина зазора между проводниками; F — площадь проекции одного проводника на другой; ρ_v — удельное объемное сопротивление диэлектрика основания ПП (для стеклотекстолита $\rho_v = 5 \cdot 10^9$ Ом·м, для гетинакса $\rho_v = 5 \cdot 10^8$ Ом·м).

Рис. 4.3. Схема возникновения перекрестных помех

3. Определяем действующее напряжение помехи на сопротивлениях R_2 и R_3 . При расчете помехоустойчивости печатных узлов нагрузки пассивной и активной линий можно считать входные сопротивления микросхем. Расчет проводится по формуле



$$U_{R_2, R_3} = \frac{E_0}{R_2 + R_3} \left| \frac{R_2 R_3}{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_n}{1 + j\omega C R_n}} \pm j\omega M \frac{R_{2,3}}{R_1} \right|. \quad (4.3)$$

4. Сравним действующее напряжение помехи в пассивной линии с помехоустойчивостью микросхемы. Если $U_{R_2, R_3} \gg U_{\text{п}}$, то необходимо изменить конструкционные параметры ПП или электрического монтажа.

На этом расчет перекрестных помех заканчивается.

Расчет электромагнитного экранирования. Исходными данными для расчета электромагнитной помехоустойчивости являются: конструкционные параметры изделия или его узлов; спектр частот помехи $[f_i]$ и соответствующие им напряженности электрического поля $E(f_i)$ или магнитной индукции $B(f_i)$; допустимые значения напряженности $E_{\text{д}}(f_i)$ или магнитной индукции $B_{\text{д}}(f_i)$.

Наибольшее воздействие на работоспособность узлов РЭА оказывает магнитная составляющая электромагнитного поля B . Когда магнитное поле частотой f пересекает замкнутый контур площадью S , то в контуре возникает ЭДС U :

$$|U| = 2\pi f S |B|. \quad (4.4)$$

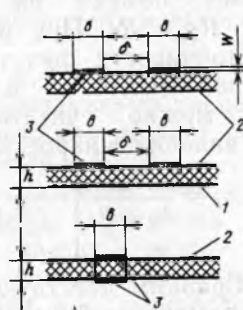
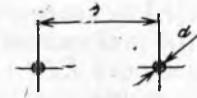
Рассчитанное по формуле (4.4) напряжение U является напряжением помехи для чувствительных элементов устройства. В случае анализа помехоустойчивости печатных узлов чувствительными элементами обычно являются микросхемы, тогда S — наибольшая площадь замкнутого контура, образованного заземляющим и сигнальным проводниками.

Если $|U| \geq U_{\text{п}}$ и нет возможности уменьшить площадь контура S , то необходим электромагнитный экран, эффективность которого

$$\Delta_{\text{н}} = 20 \lg(|U/U_{\text{п}}|). \quad (4.5)$$

Главное назначение экрана — ослабление напряженности электрического (E) или магнитного (H) полей. В зависимости от назначения различают экраны с внутренними источниками помехи и экраны внешнего электромагнитного поля, во внутренней полости которых помещаются чувствительные к помехам узлы.

Таблица 4.3

Тип линии связи	Схема
<p>Параллельные печатные проводники:</p> <p>1 — проводящая земляная плоскость;</p> <p>2 — основание печатной платы;</p> <p>3 — проводники</p>	
<p>Параллельные круглые проводники</p>	

На рис. 4.4 приведена классификация электромагнитных экранов по трем признакам: типу поля помехи, конструктивной форме, материалу и конструкции стенок экрана.

1. Определяем тип поля помехи. Область пространства вокруг условного излучателя электромагнитной помехи делится на ближнюю ($r < \lambda/2\pi$) и дальнюю ($r > \lambda/2\pi$) зоны, где r — расстояние от излучателя до экрана; λ — длина волны помехи. Если излучатель представить в виде электрического диполя, то в ближней зоне существенно преобладает электрическое поле, в случае представления излучателя рамкой с током в ближней зоне преобладает магнитное поле. В первом случае можно говорить об электростатическом, а во втором — о магнитостатическом полях. Например, высоковольтные элементы и приборы могут быть представлены элект-

Расчетные формулы

С, пФ

М, мГн

$$\frac{1,06\epsilon_r l}{\lg [2\delta / (W + b)]}$$

$$2l \left(\ln \frac{2l}{\delta + b} \right)$$

$$\frac{340 \epsilon_r l}{\frac{2\delta}{b} \left(\frac{2\delta}{b} + 2 \right) A \left(A + 0,175 \frac{2\delta}{b} \right)}$$

$$2l \left(\frac{\delta + b}{h} + \ln \frac{2l}{\delta + b} \right)$$

$$A = 2 \operatorname{arctg} \frac{b}{4h} + \frac{b}{4h} \ln \left(\frac{16h^2}{b^2} + 1 \right)$$

$$2l \ln \frac{2l}{h}$$

$$0,075 \epsilon_r l \ln \frac{b}{h} \left[1 + \frac{h}{b} \left(1 + \lg \frac{2b}{h} \right) \right]$$

$$\frac{12,1\epsilon_r l}{\lg (2\delta / d)}$$

$$2l \left(\ln \frac{2l}{\delta} - 1 \right)$$

рическим диполем, а катушки индуктивности, трансформаторы, печатные проводники — рамкой с током. В дальней зоне излучения мощности электрического и магнитного полей равны. В электронной аппаратуре экранируют как источники, так и приемники помехи. Вследствие принципа взаимности эффективность экранирования в том и другом случаях одинакова.

2. Выбираем конструктивную форму экрана в зависимости от экранируемого изделия в виде параллелепипеда, цилиндра или сферы (рис. 4.5). Форма экрана влияет в первую очередь на характеристическое сопротивление среды вблизи него и, как следствие, на эффективность экранирования. Кроме этого, форма экрана влияет на его резонансные свойства, а именно, на значение частоты



Рис. 4.4. Классификация электромагнитных экранов

ты, на которой происходит резкое увеличение магнитного или электрического поля внутри экрана. Чтобы сравнивать экраны различных форм, вводится обобщенный параметр — эквивалентный радиус $R_э$. Для экрана прямоугольной формы

$$R_э = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} l_1 l_2 l_3},$$

для цилиндрического экрана

$$R_э = \sqrt{\frac{3}{16} D^2 h},$$

для сферического экрана $R_э = r_э$.

Нижшая резонансная частота экрана может быть определена по приближенной формуле

$$f_{рез} \approx \frac{138}{R_э} 10^6. \quad (4.6)$$

Значение $f_{рез}$ не должно входить в спектр частот помехи.

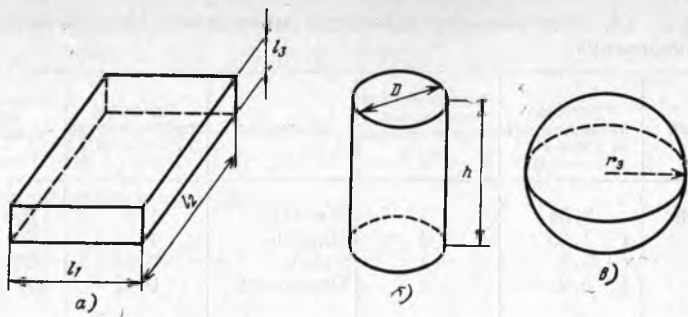


Рис. 4.5. Форма электромагнитных экранов:
 а — прямоугольная; б — цилиндрическая; в — сферическая

3. Выбираем материал и конструкцию стенок экрана. Материал стенок экрана оказывает наибольшее влияние на эффективность экранирования. Величиной, характеризующей экранирующее действие материала экрана, является глубина проникновения δ (на такой глубине напряженность электрического поля уменьшается в e раз);

$$\delta = 0,52 (\pi f \mu_r \sigma)^{-0,5}, \quad (4.7)$$

где f — частота поля помехи, МГц; μ_r — относительная магнитная проницаемость; σ — удельная проводимость материала экрана, См/м.

Для немагнитных металлов $\mu_r = 1$, а для ферромагнитных материалов μ_r зависит от частоты f . Для стали эта зависимость может быть учтена следующим образом:

$$\mu_r \approx 150 - 30f \text{ при } f < 4 \text{ МГц,}$$

где f — частота, МГц.

Если экран работает в магнитном поле ближней зоны, эффективность магнитных материалов значительно выше немагнитных, так как $\mu_r \gg 1$. В электромагнитном поле дальней зоны немагнитные материалы, обладающие большей проводимостью по сравнению с магнитными, обеспечивают более высокую эффективность. В табл. 4.4 приведены электрические параметры наиболее применяемых для экранирования материалов.

Для электромагнитного экранирования используются тонколистовые и фольгированные материалы толщиной 0,01...0,05 мм. Широко применяются сеточные экраны. Это объясняется тем, что металлические сетки легки, а сеточные экраны проще в изготовлении, удобны в сборке и эксплуатации, не препятствуют свободным конвективным потокам воздуха, светопроницаемы и позволяют получить достаточно высокую эффективность во всем диапазоне радиочастот. Недостатком сеточных экранов является невысокая механическая прочность. Экранирующие свойства металлических

Таблица 4.4. Электрические параметры материалов, применяемых для экранирования

Материал	Удельная проводимость σ , См/м 10^{-7}	Относительная магнитная проницаемость μ_r	Материал	Удельная проводимость σ , См/м 10^{-7}	Относительная магнитная проницаемость μ_r
Алюминий	3,54	1	Железо	1,0	1100...22 000
Латунь	1,25	1	Никель	1,38	12...80
Медь	5,8	1	Сталь	0,66	150
Серебро	6,2	1	Пермаллой	0,42	80...8000

сеток проявляются главным образом в результате отражения электромагнитной волны от их поверхности. Параметрами сетки, определяющими ее экранирующие свойства, являются: шаг сетки s_c , радиус проволоки r_n и удельная проводимость материала сетки.

4. Рассчитываем эффективность экранирования выбранного экрана и, при необходимости, требуемую толщину экрана. Ниже приводятся формулы для расчета эффективности экранирования экранов разной формы из различных материалов.

А. Расчет магнитоэлектрического экрана. На рис. 4.6 представлена условная схема магнитоэлектрического экранирования за счет шунтирования магнитного поля на частотах $0 \dots 1000$ Гц.

Для цилиндрического экрана (рис. 4.6,а) эффективность экранирования в случае $\mu_r > 1$ определяется формулой

$$\mathcal{E}_H^H = 20 \lg [1 + 0,25 (1 - r_1^2/r_2^2) (\mu_r + 1/\mu_r - 2)], \quad (4.8)$$

следовательно, для заданных \mathcal{E}_H^H , μ_r и r_2 определим толщину экрана:

$$d^H = r_2 \left[1 - \sqrt{1 - 4 (10^{\mathcal{E}_H^H/20} - 1) / (\mu_r + 1/\mu_r - 2)} \right]. \quad (4.9)$$

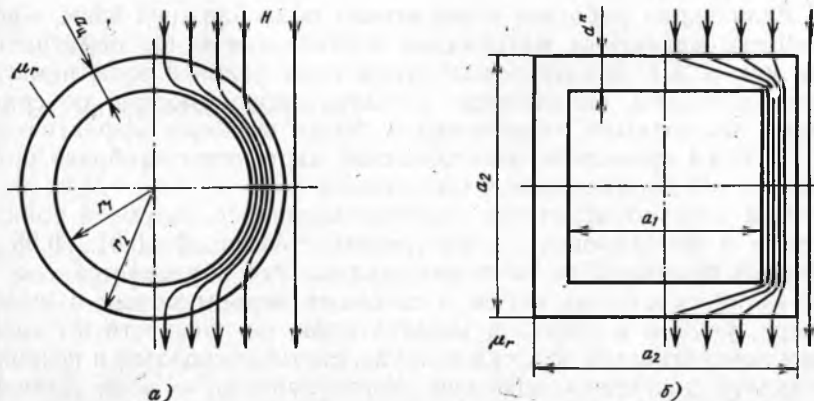


Рис. 4.6. Магнитоэлектрический экран цилиндрической (а) и прямоугольной (б) форм

Для прямоугольного экрана (рис. 4.6,б)

$$\mathcal{E}_H^n = 20 \lg [1 + (1 - a_1^2/a_2^2)(\mu_r + 1/\mu_r - 2)], \quad (4.10)$$

тогда

$$d^n = 0,5 a_2 \left[1 - \sqrt{1 - (10^{\mathcal{E}_H^n/20} - 1)/(\mu_r + 1/\mu_r - 2)} \right]. \quad (4.11)$$

Для сферического экрана

$$\mathcal{E}_H^c = 20 \lg \left[1 + 0,22 \left(1 - \frac{(r_s - d^c)^3}{r_s^3} \right) \left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right) \right], \quad (4.12)$$

тогда

$$d^c = r_s \left[1 - \sqrt[3]{1 - 4,5 (10^{\mathcal{E}_H^c/20} - 1)/(\mu_r + 1/\mu_r + 2)} \right]. \quad (4.13)$$

В целом эффективность магнитостатических экранов шунтированием магнитного поля невелика. Так, экран, изготовленный из специального сплава «Армако», у которого $\mu_r = 3000$, при радиусе 40 см и толщине 1 см обеспечивает эффективность 31,5 дБ.

Б. *Расчет электростатического экрана.* Ориентировочно эффективность экранирования плоского листового электростатического экрана можно оценить по формуле

$$\mathcal{E}_E \simeq 20 \lg [5r_s^3 / (a^2 a_1 - a a_1^2)], \quad (4.14)$$

где r_s — радиус эквивалентного плоского экрана; $r_s \simeq \sqrt{S_s/\pi}$; S_s — площадь поверхности экрана; a — расстояние между источником и приемником помехи; a_1 — расстояние от экрана до приемника помехи.

Для электростатических экранов замкнутой формы эффективность экранирования

$$\mathcal{E}_E = 20 \lg (60\pi d\sigma). \quad (4.15)$$

Таким образом, минимальная толщина экрана

$$d_{\min E} = 10^{\mathcal{E}_E^*/20} / (60\pi\sigma),$$

где \mathcal{E}_E^* — необходимая эффективность экранирования.

В. *Расчет электромагнитных экранов в дальней зоне излучения.* Электромагнитный режим экранирования охватывает частотный диапазон $10^3 \dots 10^9$ Гц при условии, что расстояние экрана от источника помех больше $(5 \dots 6)\lambda$, а поперечные размеры экрана меньше длины волны помехи.

Эффективность экранирования сплошного электромагнитного экрана в дальней зоне излучения определяется формулой [4]:

$$\mathcal{E}_s = 20 \lg |\operatorname{ch}(\kappa d)| + 20 \lg |1 + 0,5 (Z_b/Z_s + Z_s/Z_b) \operatorname{th}(\kappa d)|, \quad (4.16)$$

где d — толщина стенки экрана; Z_b — характеристическое сопротивление окружающего пространства, для плоской волны $Z_b =$

$= 120\pi \text{ Ом}$; Z_3 — характеристическое сопротивление металла, из которого сделан экран:

$$Z_3 = \sqrt{\pi/\mu_r\mu_0/\sigma} e^{j\pi/4}, \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м};$$

κ — коэффициент вихревых токов:

$$\kappa = \sqrt{\pi/\mu_r\mu_0\sigma} e^{j\pi/4}.$$

После выбора материала экрана можно построить график зависимости $\mathcal{D}_3(d)$ для нижней частоты помехи.

Значение d , при котором обеспечивается необходимое экранное затухание, является минимальной толщиной стенок экрана.

Г. *Расчет электромагнитных экранов в ближней зоне излучения.* Эффективность экранирования цилиндрического электромагнитного экрана в ближней зоне излучения рассчитывается по формуле (4.16), причем величина $Z_{в}$ для экранирования электрической составляющей поля

$$Z_{в} = Z_{вE}^u = -j(2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 r_3^u)^{-1},$$

а для экранирования магнитной составляющей

$$Z_{в} = Z_{вH}^u = -j2\pi j\mu_r\mu_0 r_3^u. \quad (4.17)$$

Здесь r_3^u — радиус цилиндрического экрана. Для сферического экрана

$$Z_{вE}^c = -j 18 \cdot 10^9 / (f r_3^c, \sqrt{2}); \quad Z_{вH}^c = j 79 \cdot 10^{-7} f r_3^c / \sqrt{2}, \quad (4.18)$$

где r_3^c — радиус сферы. Для прямоугольного экрана-коробки

$$Z_{вE}^n = -j 36 \cdot 10^9 / f r_3^n; \quad Z_{вH}^n = j 158 \cdot 10^{-7} f r_3^n, \quad (4.19)$$

где r_3^n — половина расстояния между стенками экрана, обращенными к источнику поля помехи. Остальные величины, входящие в (4.16), рассчитываются так же, как для экранирования в дальней зоне.

В области низких частот (до 10^4 Гц) для случая экранирования электрического поля в ближней зоне выполняется условие $|Z_{вE}/Z_3| \gg |Z_3/Z_{вE}|$, тогда

$$\mathcal{D}_{3E} = 20 \lg |1 + 0,5 Z_{вE} \sigma d|. \quad (4.20)$$

При экранировании магнитного поля в ближней зоне в низкочастотном диапазоне экран из магнитных металлов и сплавов имеет эффективность экранирования

$$\mathcal{D}_{3H} = 20 \lg |1 + \mu_r d / (2r_3)|,$$

а из немагнитных материалов

$$\mathcal{D}_{3H} = 20 \lg |1 + \kappa^2 r_3 d / 2|.$$

Д. Расчет перфорированных и сеточных экранов. Для перфорированных экранов эффективность экранирования [14]

$$\mathfrak{E}_{\Delta E(H)} = 20 \lg \left[\sqrt{\sigma \delta Z_{BE(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{r_s} \left(\frac{a-D}{a}\right)^2 \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6} e^{\frac{2\pi d}{m}} \right], \quad (4.21)$$

где a — расстояние между центрами отверстий; D — диаметр отверстий, m — наибольший размер отверстия в экране. Эта формула применима для диапазона длин волн, пока $\lambda > m\pi$. При $\lambda \approx m\pi$ эффективность экранирования становится незначительной.

Для экранов, изготовленных из сеточных материалов, за толщину экрана принимают эквивалентную толщину сетки $d_c = \pi r_s^2 / S_c$.

Формула для расчета эффективности таких экранов принимает вид

$$\mathfrak{E}_{\Delta E(H)} = 20 \lg \left[\sqrt{d \sigma Z_{BE(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{r_s} e^{\frac{2\pi r_s}{S_c - 2r_s}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6} \right]. \quad (4.22)$$

Эффективность экранов, изготовленных из электрически тонких материалов, в том числе с металлизированными поверхностями, определяется выражением

$$\mathfrak{E}_{\Delta E(H)} = 20 \lg \left[1,25\pi \sqrt{d \sigma Z_{BE(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{r_s} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6} \right], \quad (4.23)$$

где d — толщина слоя металла.

Если рассчитанная эффективность экранирования больше требуемой, то на этом расчет заканчивают. В противном случае необходимо изменить конструкционные параметры: толщину, размер отверстий и т. д.

Пример расчета помехоустойчивости модуля. Модуль первого уровня выполнен в виде ячейки на двусторонней печатной плате третьего класса точности из стеклотекстолита СФ-2Н-35, покрытой лаком УР-231. Ширина проводников и расстояние между ними равны 0,3 мм. Максимальная длина области связи проводников активной и пассивной линий — 80 мм. Максимальное напряжение в активной линии составляет 1,63 В на частоте 100 кГц. В ячейке использованы микросхемы типа 133 ЛАЗ.

В состоянии логической «1» помеха слабо влияет на срабатывание логического элемента, поэтому рассмотрим случай, когда на входе микросхемы логический «0». При этом $U_{ВХ}^{«0»} = 0,4$ В, $I_{ВХ}^{«0»} = 1,6$ мА, $U_{ВЫХ}^{«0»} = 0,4$ В, $I_{ВЫХ}^{«0»} = 16$ мА. Тогда можно определить входное и выходное сопротивления $R_{ВХ}^{«0»} = U_{ВХ}^{«0»} / I_{ВХ}^{«0»} = 250$ Ом,

$$R_{ВЫХ}^{«0»} = U_{ВЫХ}^{«0»} / I_{ВЫХ}^{«0»} = 250 \text{ Ом.}$$

1. Определяем взаимные емкость и индуктивность параллельных проводников на поверхности ПП. Диэлектрическая проницаемость в этом случае

$$\epsilon_r = 0,5(\epsilon_n + \epsilon_a) = 5;$$

$$C = \frac{1,06 \epsilon_r l}{\lg [2\delta / (t + b)]} = \frac{1,06 \cdot 5 \cdot 0,08}{\lg [2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} / (0,3 \cdot 10^{-3} + 0,035 \cdot 10^{-3})]} = 1,68 \text{ пФ};$$

$$M = 2l \ln \frac{2l}{\delta + b} = 2 \cdot 0,08 \ln \frac{2 \cdot 0,08}{(0,3 + 0,3) 10^{-3}} = 0,89 \text{ мГн.}$$

2. Вычисляем сопротивление изоляции между проводниками активной и пассивной линий связи:

$$R_{\text{и}} = \rho_{\square} \frac{\delta}{l} = 1,87 \cdot 10^8 \text{ Ом.}$$

3. Определяем действующее напряжение помехи на входе микросхемы 133 ЛАЗ в режиме логического «0»:

$$U_{\text{вх}}^{\langle 0 \rangle} = \frac{E_0}{R_{\text{вх}}^{\langle 0 \rangle} + R_{\text{вых}}^{\langle 0 \rangle}} \left| \frac{R_{\text{вх}}^{\langle 0 \rangle} R_{\text{вых}}^{\langle 0 \rangle}}{R_{\text{вх}}^{\langle 0 \rangle} R_{\text{вых}}^{\langle 0 \rangle} + \frac{R_{\text{и}}}{1 + j2\pi f_C R_{\text{и}}}} - j2\pi f M \frac{R_{\text{вых}}^{\langle 0 \rangle}}{R_{\text{вх}}^{\langle 0 \rangle}} \right| =$$

$$= \frac{1,63}{250 + 25} \left| \frac{250 \cdot 25}{250 + 25 + \frac{1,87 \cdot 10^8}{1 + j2\pi \cdot 10^5 \cdot 1,68 \cdot 10^{-12} \cdot 1,87 \cdot 10^8}} - j2\pi \cdot 10^2 \cdot 0,89 \frac{25}{250} \right| = 0,332 \text{ В.}$$

4. Сравниваем действующее напряжение помехи с помехоустойчивостью микросхемы. Для 133 ЛАЗ $U_n = 0,4$ В. Следовательно, действие помехи не приведет к нарушению работоспособности ячейки.

4.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Расчет печатного монтажа. Расчет печатного монтажа состоит из трех этапов: расчет по постоянному и переменному току и конструктивно-технологический. Ниже приводится рекомендуемый порядок расчета.

1. Исходя из технологических возможностей производства выбирается метод изготовления и класс точности ПП (ОСТ 4.010.022—85).

2. Определяем минимальную ширину, мм, печатного проводника по постоянному току для цепей питания и заземления:

$$b_{\text{мин}} = \frac{I_{\text{max}}}{j_{\text{доп}} t}, \quad (4.24)$$

Таблица 4.5. Допустимая плотность тока в зависимости от метода изготовления

Метод изготовления	Толщина фольги, t , мкм	Допустимая плотность тока, $j_{\text{доп}}$, А/мм ²	Удельное сопротивление, ρ , Ом·мм ² /м
Химический: внутренние слои МПП наружные слои ОПП, ДПП	20, 35, 50 20, 35, 50	15 20	0,050
Комбинированный позитивный	20 35 50	75 48 38	0,0175
Электрохимический	—	25	0,050

где I_{max} — максимальный постоянный ток, протекающий в проводниках (определяется из анализа электрической схемы); $j_{\text{доп}}$ — допустимая плотность тока, выбирается в зависимости от метода изготовления из табл. 4.5; t — толщина проводника, мм.

3. Определяем минимальную ширину проводника, мм, исходя из допустимого падения напряжения на нем:

$$b_{\text{minz}} = \frac{\rho I_{\text{max}} l}{t U_{\text{доп}}},$$

где ρ — удельное объемное сопротивление (табл. 4.5); l — длина проводника, м; $U_{\text{доп}}$ — допустимое падение напряжения, определяется из анализа электрической схемы. Допустимое падение напряжения на проводниках не должно превышать 5% от питающего напряжения для микросхем и не более запаса помехоустойчивости микросхем.

4. Определяем номинальное значение диаметров монтажных отверстий d :

$$d = d_3 + |\Delta d_{\text{н.о}}| + r, \quad (4.25)$$

где d_3 — максимальный диаметр вывода устанавливаемого ЭРЭ; $\Delta d_{\text{н.о}}$ — нижнее предельное отклонение от номинального диаметра монтажного отверстия (табл. 4.6); r — разница между минимальным диаметром отверстия и максимальным диаметром вывода ЭРЭ, ее выбирают в пределах 0,1 ... 0,4 мм. Рассчитанные значения d сводят к предпочтительному ряду отверстий: 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5 мм. При этом следует учитывать, что минимальный диаметр металлизированного отверстия $d_{\text{min}} \geq H_{\text{расч}} \gamma$, где $H_{\text{расч}}$ — расчетная толщины платы; γ — отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине платы (см. табл. 4.6). Расчетная толщина МПП

$$H_{\text{расч}} = \sum_{i=1}^n H_{c_i} + (0,6 \dots 0,9) \sum_{i=1}^{n-1} H_{\text{np}_i} + 2h_n, \quad (4.26)$$

Таблица 4.6. Допуски на расположение отверстий и контактных площадок

Параметры	Класс точности ПП			
	1	2	3	4
Минимальное значение номинальной ширины проводника b , мм	0,60	0,45	0,25	0,15
Номинальное расстояние между проводниками s , мм	0,60	0,45	0,25	0,15
Отношение диаметра отверстия к толщине платы γ	$\geq 0,50$	$\geq 0,50$	$\geq 0,33$	$\geq 0,33$
Допуск на отверстие Δd , мм, с металлизацией, $\varnothing \leq 1$ мм	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
То же, $\varnothing > 1$ мм	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
Допуск на отверстие Δd , мм, с металлизацией, $\varnothing \leq 1$ мм	$+0,10$	$+0,10$	$+0,05$	$+0,05$
То же, $\varnothing > 1$ мм	$-0,15$	$-0,15$	$-0,10$	$-0,10$
Допуск на ширину проводника Δb , мм, без покрытия	$+0,15$	$+0,15$	$+0,10$	$+0,10$
То же, с покрытием	$-0,20$	$-0,20$	$-0,15$	$-0,15$
Допуск на ширину проводника Δb , мм, без покрытия	$\mp 0,15$	$\pm 0,10$	$+0,03$	$\pm 0,03$
То же, с покрытием	$+0,25$	$+0,15$	$+0,10$	$\pm 0,05$
Допуск на расположение отверстий δd , мм, при размере платы менее 180 мм	$-0,20$	$-0,10$	$-0,08$	
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,20	0,15	0,08	0,05
То же, при размере платы более 360 мм	0,25	0,20	0,10	0,08
Допуск на расположение контактных площадок δp , мм, на ОПП и ДПП при размере платы менее 180 мм	0,30	0,25	0,15	0,10
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,35	0,25	0,20	0,15
То же, при размере платы более 360 мм	0,40	0,30	0,25	0,20
Допуск на подтравливание диэлектрика МПП $\Delta d_{тр}$, мм	0,45	0,35	0,30	0,25
Допуск на расположение контактных площадок δp , мм, на МПП при размере платы менее 180 мм	0,03	0,03	0,03	0,03
То же, при размере платы от 180 до 360 мм	0,40	0,35	0,30	0,25
То же, при размере платы более 360 мм	0,50	0,45	0,40	0,35
Допуск на расположение проводников на ОПП и ДПП δl , мм	0,55	0,50	0,45	0,40
То же, на МПП	0,15	0,10	0,05	0,03
Расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки, b_m	0,20	0,12	0,07	0,05
	0,06	0,045	0,035	0,025

где H_{ci} — номинальная толщина i -го слоя; H_{npi} — номинальная толщина материала i -й прокладки из стеклоткани; n — число слоев; h_n — толщина гальванически осажденных металлов.

5. Рассчитываем диаметр контактных площадок. Минимальный диаметр контактных площадок для ОПП и внутренних слоев МПП,

изготовленных химическим методом [19]:

$$D_{\min} = D_{i\min} + 1,5h_{\phi}, \quad (4.27)$$

где h_{ϕ} — толщина фольги; $D_{i\min}$ — минимальный эффективный диаметр площадки:

$$D_{i\min} = 2(b_m + d_{\max}/2 + \delta d + \delta p),$$

где b_m — расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки; δd и δp — допуски на расположение отверстий и контактных площадок (см. табл. 4.6); d_{\max} — максимальный диаметр просверленного отверстия, мм:

$$d_{\max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15), \quad (4.28)$$

где Δd — допуск на отверстие (см. табл. 4.6).

Минимальный диаметр, мм, контактных площадок для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых **комбинированным позитивным методом**:

при фотохимическом способе получения рисунка

$$D_{\min} = D_{i\min} + 1,5h_{\phi} + 0,03;$$

при сеточнографическом способе получения рисунка

$$D_{\min} = D_{i\min} + 1,5h_{\phi} + 0,08.$$

Для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых **электрохимическим методом**:

при фотохимическом способе получения рисунка

$$D_{\min} = D_{i\min} + 0,03;$$

при сеточнографическом способе получения рисунка

$$D_{\min} = D_{i\min} + 0,08.$$

Максимальный диаметр контактной площадки

$$D_{\max} = D_{i\min} + (0,02 \dots 0,06). \quad (4.29)$$

6. Определяем ширину проводников. Минимальная ширина проводников для ОПП и внутренних слоев МПП, изготавливаемых **химическим методом**,

$$b_{\min} = b_{i\min} + 1,5h_{\phi}, \quad (4.30)$$

где $b_{i\min}$ — минимальная эффективная ширина проводника, $b_{i\min} = 0,18$ мм для плат 1-, 2- и 3-го класса точности, $b_{i\min} = 0,15$ мм для плат 4-го класса точности.

Минимальная ширина проводников, мм, для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых **комбинированным позитивным методом**:

при фотохимическом способе получения рисунка

$$b_{\min} = b_{i\min} + 1,5h_{\phi} + 0,03;$$

при сеточнографическом способе получения рисунка

$$b_{\min} = b_{1\min} + 1,5h_{\phi} + 0,08.$$

Для ДПП и наружных слоев МПП, изготавливаемых **электрохимическим методом**:

при фотохимическом способе получения рисунка

$$b_{\min} = b_{1\min} + 0,03;$$

при сеточнографическом способе получения рисунка

$$b_{\min} = b_{1\min} + 0,08.$$

Максимальная ширина проводников

$$b_{\max} = b_{\min} + (0,02 \dots 0,06). \quad (4.31)$$

7. Определяем минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка.

Минимальное расстояние между проводником и контактной площадкой

$$s_{1\min} = L_0 - [(D_{\max}/2 + \delta p) + (b_{\max}/2 + \delta l)],$$

где L_0 — расстояние между центрами рассматриваемых элементов; δl — допуск на расположение проводников (см. табл. 4.6).

Минимальное расстояние между двумя контактными площадками

$$s_{2\min} = L_0 - (D_{\max} + 2\delta p).$$

Минимальное расстояние между двумя проводниками

$$s_{3\min} = L_0 - (D_{\max} + 2\delta l).$$

Расчет линий передачи СВЧ. Основными электрическими параметрами линий передачи СВЧ являются: волновое сопротивление Z_0 , длина волны в линии Λ , коэффициент затухания α . В РЭА широко применяются волноводы прямоугольного сечения, коаксиальные линии, МПЛ, щелевые линии. В миллиметровом диапазоне длин волн применяются волноводно-щелевые линии. Поперечные сечения указанных линий передачи приведены на рис. 4.7.

Ниже приведены формулы для расчета электрических параметров линий передачи СВЧ. Если необходимо решать задачу синтеза, т. е. расчета параметров конструкции по заданным электрическим параметрам, то приведенные формулы могут быть использованы, например, при графическом решении.

Для **волновода прямоугольного сечения**, возбужденного на волне типа H_{10} , электрические параметры определяются по следующим формулам:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}};$$

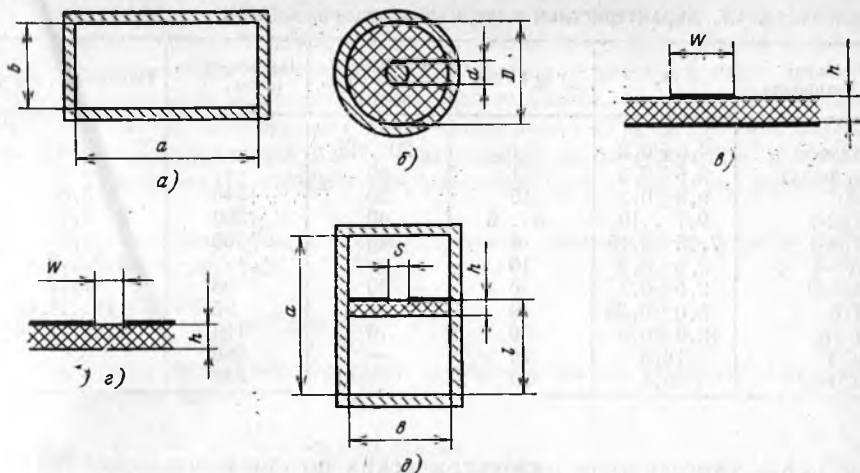


Рис. 4.7. Поперечные сечения линий передачи СВЧ:
 а — волновод прямоугольного сечения; б — коаксиальная линия; в — микрополосковая линия;
 г — щелевая линия; д — волноводно-щелевая линия

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}; \quad (4.32)$$

$$\alpha = \frac{0,793(1 + b\lambda^2/a)}{b\sqrt{\sigma\lambda}(1 - \lambda^2/4a^2)},$$

где λ — длина волны в свободном пространстве; σ — удельная проводимость стенок волновода; α — в дБ/м.

Для коаксиальной линии:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} \right);$$

$$\Lambda = \lambda/\sqrt{\epsilon_r}; \quad (4.33)$$

$$\alpha = 0,1724 \frac{1 + D/d}{(D/2)\sqrt{\sigma\lambda} \lg(D/d)},$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего волновод; α — в дБ/м.

Для микрополосковой линии:

$$Z_0 = \frac{120\pi h}{\sqrt{\epsilon_r} W [1 + 1,735\epsilon_r^{-0,0724} (W/h)^{-0,836}]}; \quad (4.34)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\epsilon_r + 1) + (\epsilon_r - 1)/\sqrt{1 + 10h/W}]}};$$

$$\alpha = 27,3\sqrt{\epsilon_r} \operatorname{tg} \delta/\Lambda + \frac{0,0545}{Z_0 W} \sqrt{\frac{f}{10\sigma}} + \frac{320}{Z_0} \left(\frac{\pi h}{\lambda^2} \right)^2,$$

Таблица 4.7. Характеристики материалов подложек МПЛ

Марка материала	ϵ_r	$\operatorname{tg} \delta \times 10^4$	Пробивное напряжение, мВт/м	Нагревостойкость, °С	Плотность, г/см ³
Поликор	9,6±0,2	1	20...25	—	3,96
Сапфирит	9,5±0,3	1	40	—	3,88
22ХС	9,3±0,3	15	50	1240	3,65
СТ32-1	9,7...10	4...6	40	1200	3,17
СТ38-1	7,25±0,15	4	40	1300	2,9
ФАФ-4	2,6±0,2	10	—	—	2,7...2,9
САМ-Э	2,5±0,1	6	30	96	1,12
СТ-5	5,0±0,25	9	21	95	1,45...1,65
СТ-16	16,0±0,8	30	10	110	2,4...2,76
10С4	14,8	70	—	280	5,02
40С4-4	15,5	30	—	280	5,6

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь в подложке МПЛ; f — частота; α — в дБ/м. Характеристики некоторых материалов подложек МПЛ приведены в табл. 4.7 [23].

Для щелевой линии:

$$Z_0 \approx 533 \frac{\sqrt{1 + \epsilon_r}}{\epsilon_r} \frac{K(\kappa)}{K(\kappa')}, \quad (4.35)$$

где $K(\kappa) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \kappa^2 \sin^2 \varphi}}$; $\kappa = \operatorname{th} \left(\frac{\pi W}{4h} \right)$; $\kappa' = \sqrt{1 - \kappa^2}$;

$$\Lambda = \lambda \sqrt{2/(1 + \epsilon_r)}.$$

Для волноводно-щелевой линии:

$$Z_0 = \frac{120\pi^2 (b/\Lambda)}{B_0 + \operatorname{tg} \left(\frac{\pi a}{2\Lambda} \right)} \left[\left(\frac{\lambda_{cf}}{\Lambda} \right)^2 \left(1 + 0,43 \frac{h}{a} \right) \left(\frac{S}{b} \right)^{p_1} - \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.36)$$

где $B_0 = \frac{2b}{\Lambda} \left\{ \ln \operatorname{cosec} \left(\frac{\pi S}{2b} \right) + \frac{Q \cos^4 \left(\frac{\pi S}{2b} \right)}{1 + Q \sin^4 \left(\frac{\pi S}{2b} \right)} + \frac{1}{16} \left(\frac{b}{\Lambda} \right)^2 \times \right.$
 $\left. \times \left[1 - 3 \sin^2 \left(\frac{\pi S}{2b} \right) \right] \cos^4 \left(\frac{\pi S}{2b} \right) \right\}$; $Q = \left[1 - \left(\frac{b}{\Lambda} \right)^2 \right]^{-1/2} - 1$;

$$\lambda_{cf} = \frac{b}{0,1748(S/b)^{p_2} (h/a)^{-0,083b}}; \quad p_1 = 0,096h/a - 0,007;$$

$$p_2 = 0,16(h/a)^{-0,07} - 0,001 |\ln(h/a) - 1/32|; \quad \Lambda = \frac{b}{0,245(a/b)^{0,173}}.$$

Пример расчета параметров печатного монтажа. Проведем расчет параметров печатного монтажа платы цифрового частотомера. Двусторонняя печатная плата изготавливается электрохимическим методом и имеет 3-й класс точности. Исходными данными являются: толщина фольги 35 мкм, максимальный ток через проводник 30 мА, максимальная длина проводника 0,21 м, допустимое падение напряжения на проводнике 0,2 В, максимальный диаметр выводов микросхем 0,5 мм, размеры платы 170×200 мм², расстояние между выводами микросхемы 2,5 мм.

Определяем минимальную ширину печатного проводника по формуле (4.24) с учетом данных табл. 4.5:

$$b_{\min 1} = \frac{0,030}{25 \cdot 0,035} = 0,034 \text{ мм.}$$

Вычисляем минимальную ширину проводника исходя из допустимого падения напряжения на нем:

$$b_{\min 2} = \frac{0,0175 \cdot 0,03 \cdot 0,21}{0,035 \cdot 0,2} = 0,016 \text{ мм.}$$

По формулам (4.25)–(4.29) с учетом данных табл. 4.6 рассчитываем: номинальный эффективный диаметр монтажных отверстий

$$d = 0,5 + 0,1 + 0,1 = 0,7 \text{ мм;}$$

минимальный эффективный диаметр контактных площадок

$$D_{\min} = 2 \left(0,035 + \frac{0,7 + 0,05 + 0,1}{2} + 0,25 + 0,1 \right) = 1,62 \text{ мм;}$$

минимальный диаметр контактных площадок

$$D_{\min} = 1,62 + 0,03 = 1,65 \text{ мм;}$$

максимальный диаметр контактных площадок

$$D_{\max} = 1,65 + 0,05 = 1,7 \text{ мм.}$$

Находим также размеры проводников:

минимальную ширину проводников

$$b_{\min} = 0,18 + 0,03 = 0,21 \text{ мм;}$$

максимальную ширину проводников

$$b_{\max} = 0,21 + 0,05 = 0,26 \text{ мм.}$$

Определяем минимальное расстояние между двумя контактными площадками

$$s_{\min} = 2,5 - (1,7 + 2 \cdot 0,25) = 0,3 \text{ мм.}$$

Таким образом, параметры печатного монтажа отвечают требованиям, предъявляемым к платам 3-го класса точности.

4.4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Модуль РЭА второго уровня и выше, например блок, представляет собой сложную систему тел с множеством внутренних источников теплоты. Точное аналитическое описание температурных

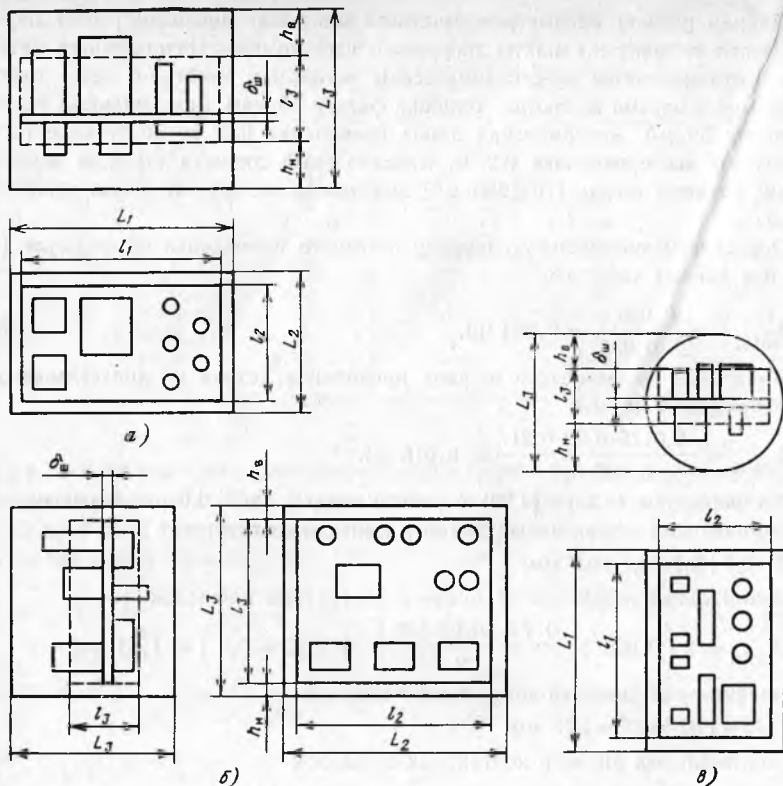


Рис. 4.8. Тепловые модели блоков РЭА в виде параллелепипедов с горизонтально (а) и вертикально (б) ориентированными шасси и в виде цилиндра (в)

полей внутри блока невозможно из-за громоздкости задачи и неточности исходных данных: мощности источников теплоты, теплофизических свойств материалов, размеров границ. Поэтому при расчете теплового режима блоков РЭА используют приближенные методы анализа и расчета. Целью расчета является определение температур нагретой зоны и среды вблизи поверхности ЭРЭ, необходимых для оценки надежности. Рекомендуется проводить расчет для наиболее критичного элемента, т. е. элемента, допустимая положительная температура которого имеет наименьшее значение среди всех элементов, входящих в состав устройства и образующих нагретую зону.

Расчет стационарного теплового режима блока при естественном конвективном теплообмене. Конструкция РЭА заменяется ее физической тепловой моделью, в которой нагретая зона представляется в виде параллелепипеда, имеющего среднеповерхностную температуру $t_{н.з}$ и рассеиваемую тепловую мощность $P_{н.з}$. На

рис. 4.8 представлены тепловые модели блоков РЭА. За размеры нагретой зоны принимаются размеры шасси l_1 и l_2 и высота l_3 , которая определяется по формуле

$$l_3 = \delta_{\text{ш}} + h_{31} + h_{32}, \quad (4.37)$$

где $\delta_{\text{ш}}$ — толщина шасси; h_{31} и h_{32} — части высоты нагретой зоны, расположенные со стороны шасси в 1-м и 2-м отсеках, на которые шасси делит блок РЭА. Размеры h_{31} и h_{32} определяются по формуле

$$h_{3j} = \sum_{i=1}^{n_j} V_i / (l_1 / l_2), \quad (4.38)$$

где $j=1, 2$ — номер отсека блока; V_i — объем i -й детали в j -м отсеке; n_j — число деталей в j -м отсеке.

Большая часть РЭА имеет блоки разъемной, кассетной или книжной конструкции с плотной компоновкой. В зависимости от ориентации модулей 1-го уровня и величины воздушных зазоров между ними различают три группы конструкций по характеру теплообмена в них [4]. Отличительные особенности этих групп приведены в табл. 4.8. Выбор той или иной группы осуществляется эмпирически исходя из опыта разработок и здравого смысла. Наиболее общим случаем является вторая группа конструкций.

Тепловая модель блока РЭА плотной компоновки приведена на рис. 4.9.

Расчет теплового режима блока можно условно разделить на три этапа: 1) определение температуры корпуса t_K ; 2) определение среднеповерхностной температуры нагретой зоны $t_{н.з}$; 3) определение температуры поверхности радиоэлемента (микросхемы, ЭРЭ).

Для выполнения первых двух этапов расчета теплового режима необходимы следующие исходные данные: размеры корпуса — ширина L_1 , глубина L_2 , высота L_3 ; размеры нагретой зоны $l_1 \times$

Таблица 4.8. Классификация конструкций в зависимости от характера теплообмена

Группа конструкции	Виды теплообмена между модулями 1-го уровня	Виды теплообмена между нагретой зоной и корпусом
I	Излучение, теплопроводность	Конвекция, излучение, теплопроводность
II	Конвекция, излучение, теплопроводность	Излучение, конвекция, теплопроводность
III	Излучение, теплопроводность	Излучение, теплопроводность

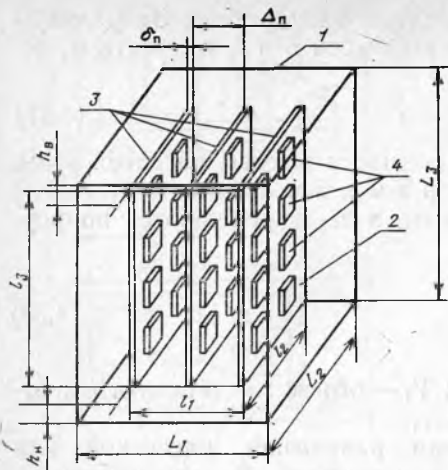


Рис. 4.9. Тепловая модель блока РЭА плотной компоновки:

1 — корпус; 2 — нагретая зона; 3 — модуль 1-го уровня; 4 — радиоэлемент (микросборка, микросхема, ЭРЭ)

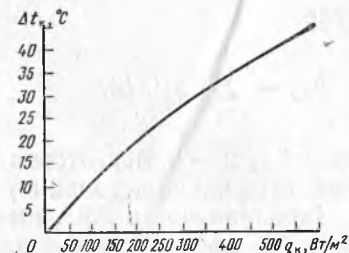


Рис. 4.10. Зависимость перегрева корпуса блока от удельной поверхности мощности

$\times l_2 \times l_3$; величины воздушных зазоров между нагретой зоной и нижней поверхностями корпуса h_n , нагретой зоной и верхней поверхностью корпуса h_b ; площадь перфорационных отверстий S_p ; мощность, рассеиваемая блоком в виде теплоты P_0 ; мощность радиоэлементов, расположенных непосредственно на корпусе P_k ; базовая температура t_0 , т. е. температура окружающей среды; теплофизические параметры воздуха и материалов конструкции блока.

Этап 1. Определение температуры корпуса.

1. Рассчитываем удельную поверхностную мощность корпуса блока q_k :

$$q_k = P_0 / S_k, \quad (4.39)$$

где S_k — площадь внешней поверхности корпуса блока,

$$S_k = 2(L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_1 L_3).$$

2. По графику на рис. 4.10 задаемся перегревом корпуса блока в первом приближении Δt_k .

3. Определяем коэффициент лучеиспускания для верхней $\alpha_{л.в}$, боковой $\alpha_{л.б}$ и нижней $\alpha_{л.н}$ поверхностей корпуса:

$$\alpha_{л.i} = \epsilon_i \cdot 5,67 \left[\left(\frac{t_0 + \Delta t_k + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right] / \Delta t_k, \quad (4.40)$$

где ϵ_i — степень черноты i -й наружной поверхности корпуса; определяется в зависимости от материала из табл. 4.9.

Таблица 4.9. Степень черноты различных поверхностей

Материал	ϵ	Материал	ϵ
Алюминий полированный	0,05	Муар	0,9
Алюминий окисленный	0,25	Масляные краски	0,92
Алюминий грубополированный	0,18	Никель полированный	0,08
Алюминиевая фольга	0,09	Олово (луженое кровельное железо)	0,08
Асбестовый картон	0,96	Платина	0,1
Бронза полированная	0,16	Резина твердая	0,95
Бумага	0,92	Резина мягкая	0,86
Вольфрам	0,05	Серебро полированное	0,05
Графит	0,75	Сталь никелированная	0,11
Дюралюминий (Д16)	0,39	Сталь окисленная	0,8
Железо полированное	0,26	Стальное литье	0,54
Золото	0,10	Саиса	0,96
Ковар	0,82	Стекло	0,92
Краски эмалевые	0,92	Силумин	0,25
Лак	0,88	Титан	0,63
Латунь полированная	0,03	Фарфор	0,92
Латунь прокатная	0,20	Хром полированный	0,10
Медь полированная	0,02	Цинк	0,25
Медь окисленная	0,65	Щеллак черный матовый	0,91

4. Для определяющей температуры $t_m = t_0 + 0,5\Delta t_k$ рассчитывается число Грасгофа Gr для каждой поверхности корпуса:

$$Gr_{mi} = \beta_m g \frac{L_{опр i}^3}{\nu_m^2} \Delta t_k \quad (4.41)$$

где $L_{опр i}$ — определяющий размер i -й поверхности корпуса; β_m — коэффициент объемного расширения, для газов $\beta_m = (t_m + 273)^{-1}$; g — ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; ν_m — кинетическая вязкость газа, для воздуха определяется из табл. 4.10. Индекс m означает, что все параметры соответствуют определяющей температуре t_m .

Таблица 4.10. Теплофизические параметры сухого воздуха при давлении $101,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$

$t_m, ^\circ\text{C}$	$\lambda_m \cdot 10^2, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\nu_m \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$\lambda_m \cdot 10^2, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\nu_m \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr	$\rho, \text{ кг/м}^3$
-50	2,04	9,23	0,728	1,584	50	2,83	17,95	0,698	1,093
-20	2,28	12,79	0,716	1,39	60	2,90	18,97	0,696	1,09
0	2,44	13,28	0,707	1,295	70	2,97	20,02	0,694	1,029
10	2,51	14,16	0,705	1,247	80	3,05	21,09	0,692	1,00
20	2,60	15,06	0,703	1,205	90	3,13	22,10	0,690	0,972
30	2,68	16,00	0,701	1,165	100	3,21	23,13	0,688	0,946
40	2,76	16,96	0,699	1,128	120	3,34	25,45	0,686	0,898

5. Определяем число Прандтля Pr из табл. 4.10 для определяющей температуры t_m .

6. Находим режим движения газа или жидкости, обтекающих каждую поверхность корпуса:

$(GrPr)_m \leq 5 \cdot 10^2$ — режим переходный к ламинарному;

$5 \cdot 10^2 < (GrPr)_m \leq 2 \cdot 10^7$ — ламинарный режим;

$(GrPr)_m > 2 \cdot 10^7$ — турбулентный режим.

7. Рассчитываем коэффициенты теплообмена конвекцией для каждой поверхности корпуса блока α_{ki} :

для переходного режима

$$\alpha_{ki} = 1,18 \frac{\lambda_m}{L_{опр i}} (GrPr)_m^{1/8} N_i; \quad (4.42)$$

для ламинарного режима

$$\alpha_{ki} = 0,54 \frac{\lambda_m}{L_{опр i}} (GrPr)_m^{1/4} N_i; \quad (4.43)$$

для турбулентного режима

$$\alpha_{ki} = 0,135 \frac{\lambda_m}{L_{опр i}} (GrPr)_m^{1/3} N_i, \quad (4.44)$$

где λ_m — теплопроводность газа, для воздуха значения λ_m приведены в табл. 4.10; N_i — коэффициент, учитывающий ориентацию поверхности корпуса:

$$N_i = \begin{cases} 0,7 & \text{— для нижней поверхности,} \\ 1 & \text{— для боковой поверхности,} \\ 1,3 & \text{— для верхней поверхности.} \end{cases}$$

8. Определяем тепловую проводимость между поверхностью корпуса и окружающей средой σ_k :

$$\sigma_k = (\alpha_{к.н} + \alpha_{л.н}) S_n + (\alpha_{к.б} + \alpha_{л.б}) S_b + (\alpha_{к.в} + \alpha_{л.в}) S_v, \quad (4.45)$$

где S_n , S_b , S_v — площади нижней, боковой и верхней поверхностей корпуса соответственно;

$$S_n = S_v = L_1 L_2; \quad S_b = 2L_3 (L_1 + L_2).$$

Встречаются блоки РЭА с оребренными поверхностями. В этом случае необходимо определить эффективный коэффициент теплообмена оребренной i -й поверхности $\alpha_{эфи}$, который зависит от конструкции ребер и перегрева корпуса относительно окружающей среды. Определение $\alpha_{эфи}$ производится точно так же, как при расчете радиатора, методика которого приведена на с. 154.

Определив эффективный коэффициент теплообмена $\alpha_{эфи}$, переходят к расчету тепловой проводимости всего корпуса σ_k , которая

состоит из суммы проводимостей неоробренной $\sigma_{к.о}$ и оробренной $\sigma_{к.р}$ поверхностей:

$$\sigma_k = \sigma_{к.о} + \sigma_{к.р},$$

где $\sigma_{к.о}$ рассчитывается по формуле (4.45), но без учета оробренной поверхности; $\sigma_{к.р.} = 0,77 \alpha_{эф i} S_{pi} N_i$; S_{pi} — площадь основания оробренной поверхности; N_i — коэффициент, учитывающий ориентацию этой поверхности.

9. Рассчитываем перегрев корпуса блока РЭА во втором приближении $\Delta t_{к.о}$:

$$\Delta t_{к.о} = (P_0 / \sigma_k) K_{к.п} K_{H1}, \quad (4.46)$$

где $K_{к.п}$ — коэффициент, зависящий от коэффициента перфорации корпуса блока K_p ; K_{H1} — коэффициент, учитывающий атмосферное давление окружающей среды. Графики для определения коэффициентов $K_{к.п}$ и K_{H1} представлены на рис. 4.11 и 4.12. Коэффициент перфорации определяется как отношение площади перфорационных отверстий S_p к сумме площадей верхней и нижней поверхности корпуса:

$$K_p = S_p / (S_H + S_B).$$

10. Определяем ошибку расчета

$$\delta = |\Delta t_{к.о} - \Delta t_k| / \Delta t_{к.о}. \quad (4.47)$$

Если $\delta \leq 0,1$, то расчет можно считать законченным. В противном случае следует повторить расчет температуры корпуса для другого значения Δt_k , скорректированного в сторону $\Delta t_{к.о}$.

11. Рассчитываем температуру корпуса блока

$$t_k = t_0 + \Delta t_{к.о}. \quad (4.48)$$

На этом 1-й этап расчета теплового режима блока РЭА окончен.

Этап 2. Определение среднеповерхностной температуры нагретой зоны.

1. Вычисляем условную удельную поверхностную мощность нагретой зоны блока q_3 :

$$q_3 = \frac{P_3}{1,82(l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)}, \quad (4.49)$$

где P_3 — мощность, рассеиваемая в нагретой зоне. В общем случае $P_3 = P_0 - P_k$, где P_k — мощность, рассеиваемая в элементах, установленных непосредственно на корпус блока; в этом случае последний играет роль радиатора.

2. Из графика на рис. 4.13 находим в первом приближении перегрев нагретой зоны относительно температуры, окружающей блок среды Δt_3 .

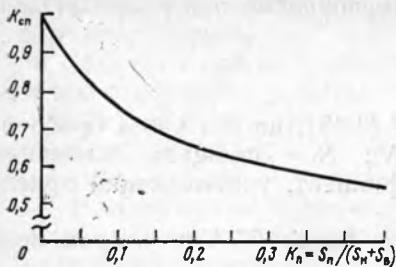


Рис. 4.11. Зависимость коэффициента $K_{к.п}$ от коэффициента перфорации корпуса блока

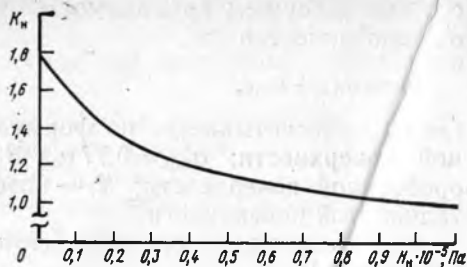


Рис. 4.12. Зависимость коэффициента $K_{н1}$ от атмосферного давления окружающей среды

3. Определяем коэффициент теплообмена излучением между нижними $\alpha_{з.л.н}$, верхними $\alpha_{з.л.в}$ и боковыми $\alpha_{з.л.б}$ поверхностями нагретой зоны и корпуса:

$$\alpha_{з.л.i} = \varepsilon_{ni} \cdot 5,67 \left[\left(\frac{t_0 + \Delta t_3 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_k + 273}{100} \right)^4 \right] / (\Delta t_3 - \Delta t_{к.о}), \quad (4.50)$$

где ε_{ni} — приведенная степень черноты i -й поверхности нагретой зоны и корпуса:

$$\varepsilon_{ni} = \left[\frac{1}{\varepsilon_{zi}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{ki}} - 1 \right) \frac{S_{zi}}{S_{ki}} \right]^{-1};$$

ε_{zi} и S_{zi} — степень черноты и площадь i -й поверхности нагретой зоны.

4. Для определяющей температуры $t_m = (t_k + t_0 + \Delta t_3) / 2$ и определяющего размера h_i находим числа Грасгофа Gr_{hi} и Прандтля Pr (формула (4.41) и табл. 4.10).

5. Рассчитываем коэффициенты конвективного теплообмена между нагретой зоной и корпусом для каждой поверхности: для нижней поверхности

$$\alpha_{з.к.н} = \lambda_m / h_n;$$

для верхней поверхности

$$\alpha_{з.к.в} = \begin{cases} \lambda_m / h_v & \text{при } (Gr_{h_v} Pr) \leq 10^3; \\ 0,234 [6,25 - 5,25 (1 + h_v / \sqrt{l_1 l_2})^{-5/3}] \lambda_m \times \\ \times (Gr_{h_v} Pr)^{1/4} / h_v & \text{при } (Gr_{h_v} Pr) > 10^3; \end{cases} \quad (4.51)$$

для боковой поверхности

$$\lambda_m / h_6 \text{ при } (Gr_{h_6} Pr) \leq 10^3;$$

$$0,18 [6,25 - 5,25 (1 + h_6 / \sqrt{2(l_1 + l_2)l_3})^{-5/3}] \lambda_m (Gr_{h_6} Pr)^{1/4} / h_6$$

$$\text{при } (Gr_{h_6} Pr) > 10^3.$$

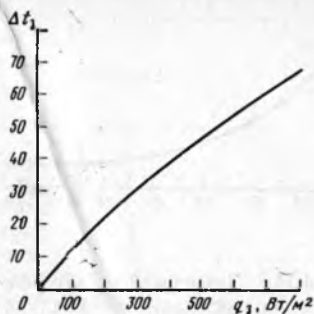


Рис. 4.13. Зависимость перегрева нагретой зоны от удельной поверхности мощности

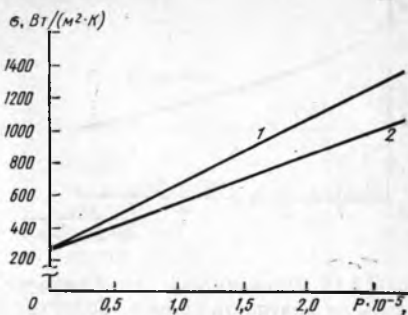


Рис. 4.14. Зависимость удельной тепловой проводимости от усилия прижима модулей к корпусу:

1 — контакт медной ячейки с алюминиевым корпусом, 2 — контакт алюминий — алюминий

6. Определяем тепловую проводимость между нагретой зоной и корпусом:

$$\sigma_{з.к} = K_{\sigma} \sum_{i=н,в,б} (\alpha_{з.лi} + \alpha_{з.кi}) S_{зi}, \quad (4.52)$$

где K_{σ} — коэффициент, учитывающий кондуктивный теплообмен;

$$K_{\sigma} = \begin{cases} 1,63 - \frac{0,157}{\sigma S_{\lambda}} & \text{при } \frac{1}{\sigma S_{\lambda}} \leq 4; \\ 1 & \text{при } \frac{1}{\sigma S_{\lambda}} > 4; \end{cases} \quad (4.53)$$

σ — удельная тепловая проводимость от модулей к корпусу блока, зависит от усилия прижима ячеек к корпусу (рис. 4.14), при отсутствии прижима $\sigma = 240$ Вт/(м²·К); S_{λ} — площадь контакта рамки модуля с корпусом блока.

7. Рассчитываем нагрев нагретой зоны $\Delta t_{з.о}$ во втором приближении:

$$\Delta t_{з.о} = \Delta t_{к.о} + \frac{P_3 K_{к.п} K_W K_{H2}}{\sigma_{з.к}}, \quad (4.54)$$

где K_W — коэффициент, учитывающий внутреннее перемешивание воздуха, зависит от производительности вентилятора C_v (рис. 4.15); K_{H2} — коэффициент, учитывающий давление воздуха внутри блока (рис. 4.16).

8. Определяем ошибку расчета $\delta = |\Delta t_{з.о} - \Delta t_3| / \Delta t_{з.о}$. Если $\delta < 0,1$, то расчет окончен. При $\delta \geq 0,1$ следует повторить расчет для скорректированного значения Δt_3 .

9. Рассчитываем температуру нагретой зоны

$$t_3 = t_0 + \Delta t_{з.о}. \quad (4.55)$$

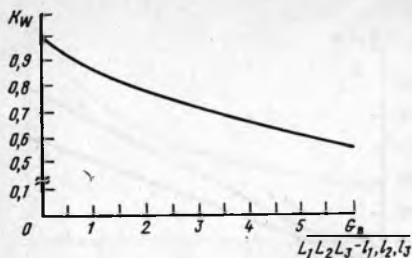


Рис. 4.15. Зависимость коэффициента K_W от кратности обмена воздуха в блоке

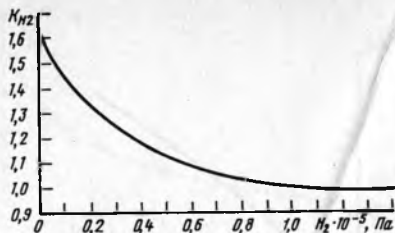


Рис. 4.16. Зависимость коэффициента K_{H2} от давления воздуха внутри блока

На этом 2-й этап расчета теплового режима блока РЭА заканчивается.

Этап 3. Расчет температуры поверхности элемента.

Для определения температуры корпуса микросхемы, установленной в модуле 1-го уровня, операции выполняют в следующей последовательности.

1. Определяем эквивалентный коэффициент теплопроводности модуля, в котором расположена микросхема для вариантов:

при отсутствии теплопроводных шин $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{\text{п}}$, где $\lambda_{\text{п}}$ — теплопроводность материала основания платы;

при наличии теплопроводных шин

$$\lambda_{\text{экв}} = (1 - A) \lambda_{\text{п}} \left[1 - \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{п}}} + \frac{1}{(V_{\text{ш}}/V_{\text{п}})(\lambda_{\text{ш}}/\lambda_{\text{п}}) + 1 - V_{\text{ш}}/V_{\text{п}}} \right]^{-1} + A \frac{\lambda_{\text{п}}}{2} \left[1 + \frac{\lambda_{\text{ш}} V_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{п}} V_{\text{п}}} + \frac{1}{1 - V_{\text{ш}}/V_{\text{п}}} \right], \quad (4.56)$$

где $\lambda_{\text{ш}}$ — теплопроводность материала теплопроводной шины; $V_{\text{п}}$ — объем ПП с учетом объема теплопроводных шин; $V_{\text{ш}}$ — объем теплопроводных шин на ПП; A — поверхностный коэффициент заполнения платы модуля теплопроводными шинами: $A = S_{\text{ш}}/S_{\text{п}}$; $S_{\text{ш}}$ — суммарная площадь, занимаемая теплопроводными шинами на ПП.

В табл. 4.11 приведены теплофизические параметры некоторых материалов.

2. Определяем эквивалентный радиус корпуса микросхем:

$$R = \sqrt{S_{\text{оис}}/\pi}, \quad (4.57)$$

где $S_{\text{оис}}$ — площадь основания микросхемы.

3. Рассчитываем коэффициент распространения теплового потока

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\delta_{\text{п}} \cdot \lambda_{\text{экв}}}}, \quad (4.58)$$

Таблица 4.11. Теплофизические свойства материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Алюминий	208	Эбонит	0,163
Бронза	64	Стеклотекстолит	0,24...0,34
Латунь	85,8	Стекло	0,74
Медь	390	Фарфор	0,834
Сталь	45,5	Картон	0,231
Асбестовая ткань	0,169	АЛ-9	151
Асбест листовой	0,116	АЛ-2	175
Слюда	0,583	АМЦ	188
Пластмасса полихлорвиниловая	0,443	Пенопласт ПХВ-2	0,04
Фторопласт-4	0,25	Пенополиуретан	0,06
Полистирол	0,09...0,14	ЭПЭ	

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплообмена с 1-й и 2-й сторон ПП; для естественного теплообмена $\alpha_1 + \alpha_2 = 17$ Вт/(м²·К); δ_n — толщина ПП модуля.

4. Определяем искомый перегрев поверхности корпуса микросхемы:

$$\Delta t_{ис} = \Delta t_B + k \left[\frac{Q_{ис}}{k_{\alpha}(S_{ис} - S_{оис}) + \frac{1}{\frac{\delta_3}{\lambda_3 \pi R^2} + \frac{1}{B + M\pi R \lambda_{экв} \delta_n m \frac{K_1(mR)}{K_0(mR)}}}} \right] + \sum_{i=1}^N \frac{Q_{ис i} \frac{K_0(mr_i)}{K_0(mR_i)}}{k_{\alpha i} (S_{ис i} - S_{оис i}) \left\{ 1 + \left[\frac{\delta_{3i}}{\lambda_{3i} \pi R_i^2} + \frac{1}{k_{\alpha i} (S_{ис i} - S_{оис i})} \right] \times \left(B_i + M\pi R_i \lambda_{экв} \delta_n m \frac{K_1(mR_i)}{K_0(mR_i)} \right) \right\}}, \quad (4.59)$$

где B и M — условные величины, введенные для упрощения формы записи: при одностороннем расположении корпусов микросхем на ПП $B = 8,5\pi R^2$ Вт/К, $M = 2$; при двустороннем расположении корпусов $B = 0$, $M = 1$; k — эмпирический коэффициент: для корпусов микросхем, центр которых отстоит от тор-

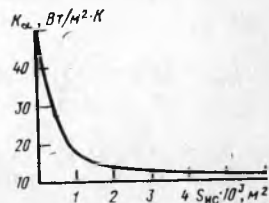


Рис. 4.17. Зависимость коэффициента теплоотдачи K_{α} от площади поверхности корпуса микросхемы

цов ПП на расстоянии менее $3R$, $k=1,14$; для корпусов микросхем, центр которых отстоит от торцов ПП на расстоянии более $3R$, $k=1$; k_α — коэффициент теплоотдачи от корпусов микросхем определяется по графику рис. 4.17; K_1 и K_0 — модифицированные функции Бесселя; N — число i -х корпусов микросхем, расположенных вокруг корпуса рассчитываемой микросхемы на расстоянии не более $10/m$, т. е. $r_i \leq 10/m$; Δt_b — среднеобъемный перегрев воздуха в блоке;

$$\Delta t_b = (\Delta t_{к.о} + \Delta t_{н.з.о})/2;$$

$Q_{ис i}$ — мощность, рассеиваемая i -й микросхемой; $S_{к.с i}$ — суммарная площадь поверхности i -й микросхемы; $\delta_{з i}$ — зазор между микросхемой и ПП; $\lambda_{з i}$ — коэффициент теплопроводности материала, заполняющего этот зазор.

5. Определяем температуру поверхности корпуса микросхемы

$$t_{ис} = t_0 + \Delta t_{ис}. \quad (4.60)$$

Дискретный ЭРЭ можно считать аналогично микросхеме локальным источником теплоты на пластине, и методика определения температуры поверхности его корпуса будет аналогична. Необходимо лишь ввести соответствующие значения геометрических параметров в (4.57) — (4.60).

Расчет стационарного режима блока РЭА при принудительном воздушном охлаждении. Тепловая модель блока РЭА с принудительным воздушном охлаждении аналогична модели, изображенной на рис. 4.9. Дополнительными исходными данными являются: мощность Q_b и КПД η_b вентилятора, расход охлаждающего воздуха C кг/с. Расчет теплового режима можно разделить на два этапа: этап 1 — определение коэффициентов теплоотдачи от модулей 1-го уровня; этап 2 — расчет температуры ЭРЭ.

Этап 1. Расчет коэффициентов теплоотдачи.

1. Определяем площадь свободного сечения канала между двумя соседними модулями 1-го уровня на расстоянии x от входа охлаждающего потока воздуха. Обозначим через l_x размер стороны ПП модуля, параллельной направлению движения потока, а через l_y — размер стороны платы, перпендикулярной направлению потока. Расстояние x определяется ЭРЭ, для которого производится тепловой расчет (рис. 4.18):

$$\dot{f}_{к x} = l_y \Delta n - \sum_{i=1}^{n_x} S_{э y i}, \quad (4.61)$$

где n_x — число ЭРЭ, расположенных в канале между платами в сечении x ; $S_{э y i}$ — площадь поперечного сечения i -го ЭРЭ в сечении x .

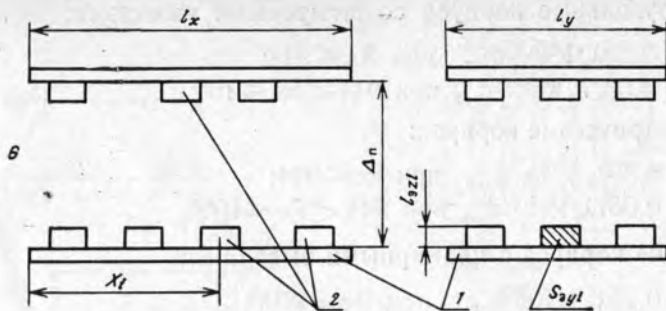


Рис. 4.18. Модель воздушного канала между двумя модулями (1) с элементами (2)

2. Рассчитываем эквивалентный диаметр канала

$$d_{\text{эКВ}} = \frac{2f_{\text{КX}}}{l_y + \Delta n + 2 \sum_{i=1}^{n_x} l_{\partial zi}}, \quad (4.62)$$

где $l_{\partial zi}$ — высота i -го ЭРЭ.

3. Определяем перегрев воздуха в сечении x канала: при приточной вентиляции

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{\sum_{j=1}^{n_y} Q_{\partial j} + \eta_{\text{в}} Q_{\text{в}}}{1000C}; \quad (4.63)$$

при вытяжной вентиляции

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{\sum_{j=1}^{n_y} Q_{\partial j}}{1000C};$$

где $Q_{\partial j}$ — мощность j -го элемента, расположенного перед корпусом рассчитываемого элемента по направлению воздушного потока в воздушном канале; n_y — число таких элементов.

4. Определяем температуру воздуха в сечении x канала:

$$t_{\text{в}} = t_0 + \Delta t_{\text{в}}. \quad (4.64)$$

5. Рассчитываем критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{Cd_{\text{эКВ}}}{\nu_{\text{в}} \rho_{\text{в}} f_{\text{КX}} (V-1)}, \quad (4.65)$$

где $\nu_{\text{в}}$ — коэффициент кинематической вязкости воздуха; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха; $N_{\text{П}}$ — число ПП в блоке. Величины $\nu_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{в}}$ определяются при температуре воздуха $t_{\text{в}}$ (см. табл. 4.10).

6. Определяем коэффициент теплоотдачи для канала в зависимости от типов корпусов ЭРЭ в сечении x :

прямоугольные корпуса со штыревыми выводами:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0,29\lambda_B \sqrt{Re}/d_{эКВ} & \text{при } Re \leq 944; \\ 0,037\lambda_B Re^{0,8}/d_{эКВ} & \text{при } 944 < Re \leq 10^4; \end{cases} \quad (4.66)$$

цилиндрические корпуса:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0,39\lambda_B \sqrt{Re}/d_{эКВ} & \text{при } Re \leq 944; \\ 0,051\lambda_B Re^{0,8}/d_{эКВ} & \text{при } 944 < Re \leq 10^4; \end{cases} \quad (4.67)$$

плоские корпуса с планарными выводами:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0,25\lambda_B \sqrt{Re}/d_{эКВ} & \text{при } Re \leq 2000; \\ 0,026\lambda_B Re^{0,8}/d_{эКВ} & \text{при } 2000 < Re \leq 10^4, \end{cases} \quad (4.68)$$

где λ_B — коэффициент теплопроводности воздуха при температуре t_B (см. табл. 4.10).

7. Аналогично пунктам 1—6 определяем коэффициент теплоотдачи α_2 в соседнем канале, т. е. по другую сторону ПП, на которой расположен рассчитываемый элемент.

Этап 2. Расчет температуры поверхности корпуса микросхемы.

Расчет температуры радиоэлемента производится по пунктам 1—5 этапа 3 анализа теплового режима блока РЭА при свободной конвекции (см. (4.57) — (4.60)).

На этом расчет теплового режима заканчивается.

Расчет радиаторов. Перегрев полупроводниковых приборов можно уменьшить путем увеличения теплоотдающей поверхности, т. е. установки прибора на радиатор. Для систем воздушного охлаждения широко используют следующие типы радиаторов [6]: пластинчатые, ребристые, игольчато-штыревые, типа «краб», жалюзийные, петельно-проволочные. Их конструкции представлены на рис. 4.19. Наибольшей эффективностью обладают игольчато-штыревые радиаторы.

Исходными данными при проектировании или выборе радиатора являются: предельная температура рабочей области прибора t_p ; рассеиваемая прибором мощность P ; температура окружающей среды t_0 ; внутреннее тепловое сопротивление прибора между рабочей областью и корпусом $R_{вн}$; тепловое сопротивление контакта между прибором и радиатором $R_{к}$. Тепловая модель прибора с радиатором приведена на рис. 4.20. Методика расчета следующая [6].

1. Определяем перегрев места крепления прибора с радиатором

$$t_k - t_0 = (t_p - t_0) - P(R_{вн} + R_{к}), \quad (4.69)$$

где $R_{к} \approx 2,2 \cdot 10^{-4} S_{к}$; $S_{к}$ — площадь контактной поверхности, м².

2. Определяем в первом приближении средний перегрев основания радиатора

$$\Delta t_s = t_s - t_0 \approx 0,83(t_k - t_0). \quad (4.70)$$

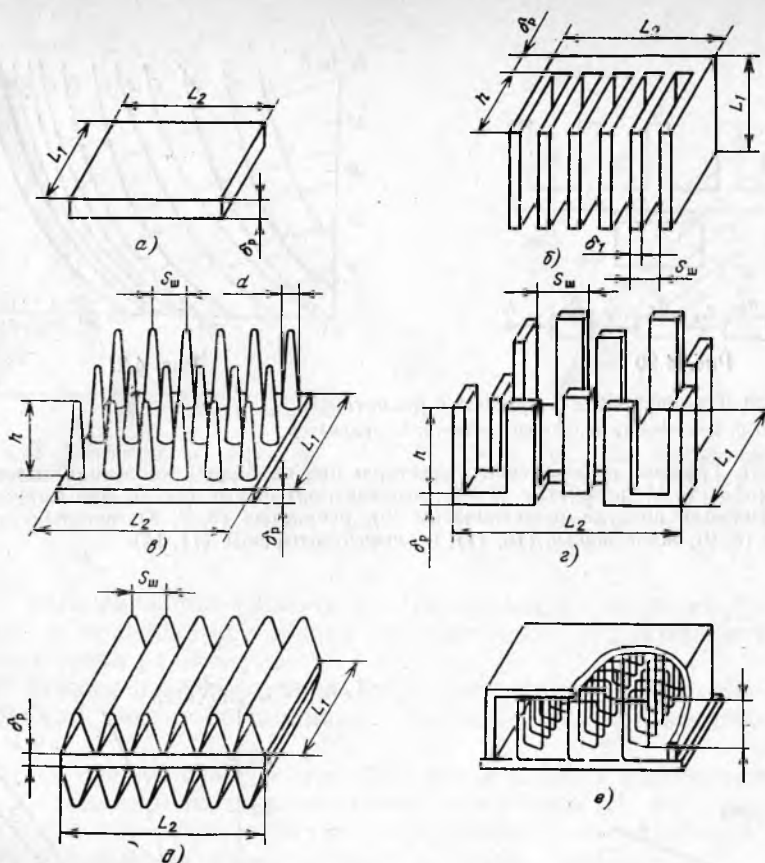


Рис. 4.19. Радиаторы воздушного охлаждения:

a — пластинчатый; *b* — ребристый; *в* — игольчато-штыревой; *г* — типа «краб»; *д* — жалюзийный; *e* — петельно-проволочный

Таблица 4.12. Конструктивные параметры игольчато-штыревых радиаторов

Номера позиций радиаторов на рис. 4.22, 4.24	Размеры, мм		
	h	$S_{ш}$	d
1	32	7	2,5
2	20	7	2
3	15	7	2
4	12,5	7	2,5
5	32	9	2,5
6	20	9	2
7	15	9	2
8	12,5	9	2

Таблица 4.13. Конструктивные параметры ребристых радиаторов

Номера позиций радиаторов на рис. 4.24, 4.25	Размеры, мм			
	h	$S_{ш}$	δ_1	$L_1=L_2$
1	32	10	1	40
2	32	10	1	80
3	20	10	1	40
4	20	10	1	80
5	12,5	10	1	40
6	12,5	10	1	80

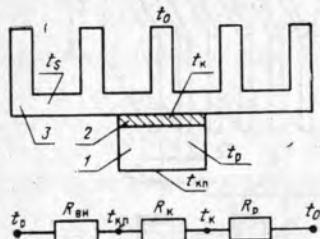


Рис. 4.20

Рис. 4.20. Тепловая модель прибора с радиатором:
1 — прибор; 2 — область теплового контакта; 3 — радиатор

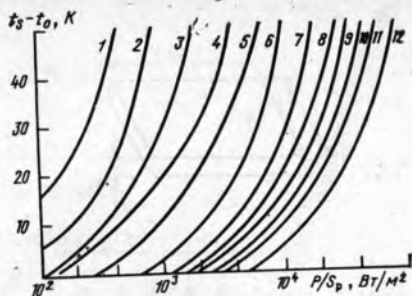


Рис. 4.21

Рис. 4.21. Графики выбора типа радиатора: при свободной конвекции—пластинчатые (область 1), ребристые (1—4), игольчато-штыревые (1—5); при вынужденном движении воздуха—пластинчатые (3), ребристые (6, 7, 8), петельно-проволочные (8, 9), жалюзийные (10, 11), игольчато-штыревые (11, 12)

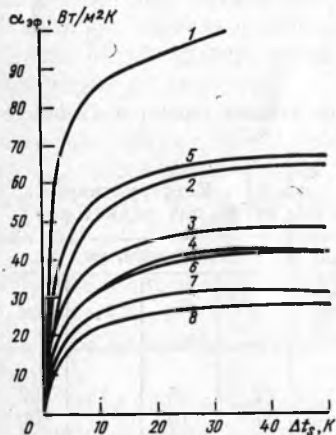


Рис. 4.22. Коэффициент эффективной теплоотдачи игольчато-штыревых радиаторов в условиях свободной конвекции

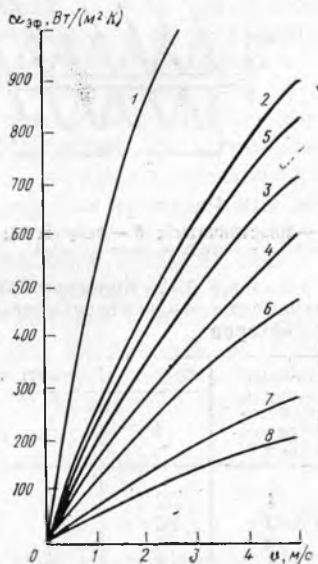


Рис. 4.23. Коэффициент эффективной теплоотдачи игольчато-штыревых радиаторов в условиях вынужденного охлаждения

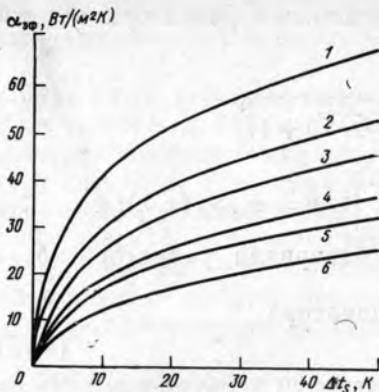


Рис. 4.24. Коэффициент эффективной теплоотдачи ребристых радиаторов в условиях свободной конвекции

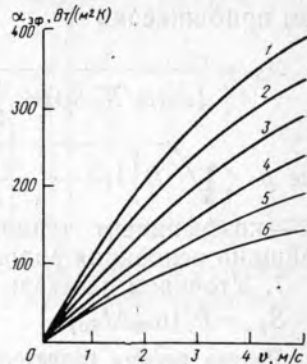


Рис. 4.25. Коэффициент эффективной теплоотдачи ребристых радиаторов в условиях вынужденного охлаждения

3. Выбираем тип радиатора. Эта процедура является эмпирической и предполагает знание сравнительной эффективности различных типов радиаторов.

В первом приближении выбрать тип радиатора и условия теплообмена можно с помощью графиков, представленных на рис. 4.21.

Здесь предполагается, что удельная мощность рассеивания $q = P/S_p$ задана и точка пересечения параметров Δt_s и q указывает область, которой соответствует определенный тип радиатора и условия охлаждения (S_p — площадь основания радиатора).

4. Определяем коэффициент эффективной теплоотдачи радиатора.

Игольчато-штыревые радиаторы. Графики зависимости коэффициента эффективной теплоотдачи игольчато-штыревых радиаторов приведены на рис. 4.22, а их конструктивные параметры — в табл. 4.12.

В условиях вынужденного воздушного охлаждения коэффициент эффективной теплоотдачи этих радиаторов выбирается в зависимости от скорости потока воздуха v из графика на рис. 4.23.

Ребристые радиаторы. Графики зависимости коэффициента эффективной теплоотдачи ребристых радиаторов в условиях свободного и вынужденного охлаждения представлены на рис. 4.24 и 4.25. Конструктивные параметры ребристых радиаторов приведены в табл. 4.13.

5. Находим площадь основания радиатора

$$S_p = L_1 L_2 = \frac{P}{\alpha_{эф} \Delta t_s}. \quad (4.71)$$

6. Определяем средний перегрев основания радиатора во втором приближении

$$\Delta t_{s0} = \frac{\Delta t_{\kappa} S_{\kappa} / S_p}{\left[\operatorname{sh} (p \sqrt{S_{\kappa} / S_p}) \operatorname{ch}^2 \frac{p}{2} / p - \operatorname{ch} (p \sqrt{S_{\kappa} / S_p}) + 1 \right]^2}, \quad (4.72)$$

где $p = \sqrt{B \left[1,5 - \left(\frac{\operatorname{sh} (2\sqrt{B})}{2\sqrt{B}} + 1 \right)^{-1} \right]}$; $B = \alpha_{\text{эф}} S_p / (\alpha_p \delta_p)$;

λ_p — коэффициент теплопроводности материала радиатора; δ_p — толщина основания радиатора.

7. Уточняем площадь основания радиатора

$$S_{p,0} = P / (\alpha_{\text{эф}} \Delta t_{s0}). \quad (4.73)$$

Пример расчета радиатора. Рассчитать параметры игольчато-штыревого радиатора для транзистора КТ913-А, работающего при температуре окружающей среды 60°C в условиях естественного воздушного охлаждения. Рассеиваемая мощность транзистора 3,2 Вт, внутреннее тепловое сопротивление $R_{\text{вн}} = 10$ К/Вт, максимально допустимая температура $p-n$ -перехода $t_{p-n} = 150^\circ\text{C}$. Площадь контакта транзистора с радиатором $S_{\kappa} = 65,5 \cdot 10^{-6}$ м².

1. Примем рабочую температуру $p-n$ -перехода $t_p = 140^\circ\text{C}$ и определим допустимый перегрев контакта транзистора с радиатором:

$$t_{\kappa} - t_p = (140 - 60) - 3,2(10 + 2,2 \cdot 10^{-4} / 65,5 \cdot 10^{-6}) = 37,25 \text{ К.}$$

2. Определим средний перегрев основания радиатора

$$\Delta t_s = 0,83 \cdot 37,25 = 30,92 \text{ К.}$$

3. Выберем игольчато-штыревой радиатор с параметрами

$$h = 15 \text{ мм}; S_{\text{ш}} = 7 \text{ мм}; d = 2 \text{ мм.}$$

4. Находим из рис. 4.23 коэффициент эффективной теплоотдачи выбранного радиатора при $\Delta t_s = 31$ К:

$$\alpha_{\text{эф}} \approx 47 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

5. Определим средний перегрев основания радиатора во втором приближении. При этом выберем в качестве материала радиатора алюминий, у которого $\lambda_p = 208$ Вт/м·К, а толщину основания $\delta_p = 2$ мм. Тогда, представляя данные в (4.72), получаем $\Delta t_{s0} = 34,1$ К.

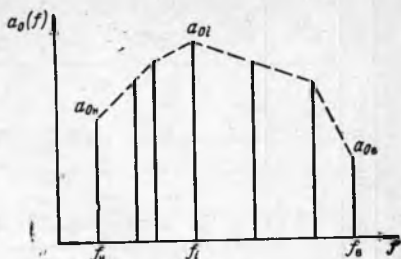
6. Уточняем площадь основания радиатора

$$S_{p,0} = \frac{3,2}{47 \cdot 34,1} = 20 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

4.5. РАСЧЕТ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Целью расчета является определение действующих на элементы изделия перегрузок при действии вибрации и ударов, а также максимальных перемещений. При необходимости производится выбор и расчет системы амортизации.

Рис. 4.26. Спектр вибрации: f_n и f_v —нижняя и верхняя частоты вибрации



Расчет на действие вибрации.

Исходные данные. Периодическая вибрация характеризуется спектром, т. е. суммой гармонических составляющих (рис. 4.26, здесь f_i и a_{0i} —частота и виброускорение i -й гармоники).

Коэффициент виброперегрузки $n_{ви}$, амплитуды виброускорения a_{0i} и виброперемещения ξ_{0i} связаны между собой соотношениями

$$n_{ви} = a_{0i}/g = 4\pi^2 f_i^2 \xi_{0i}/g. \quad (4.74)$$

1. Определяем частоту собственных колебаний отдельных конструктивных элементов РЭА.

Частоту собственных колебаний равномерно нагруженной пластины вычисляем по формуле [22]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{K_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{M} ab}, \quad \checkmark 1,57 \left(T + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{M}} \quad (4.75)$$

где a и b —длина и ширина пластины; D —цилиндрическая жесткость; $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$; E —модуль упругости; h —толщина пластины; ν —коэффициент Пуассона; M —масса пластины с элементами; K_α —коэффициент, зависящий от способа закрепления сторон пластины, определяется по общей формуле

$$K_\alpha = k \left(\alpha + \beta \frac{a^2}{b^2} + \gamma \frac{a^4}{b^4} \right)^{1/2}.$$

Коэффициенты k , α , β , γ приведены в табл. 4.14. Если прогиб и угол поворота на краю пластины равны нулю, то этот край считают жестко заштыленным. Если прогиб и изгибающий моменты равны нулю, то этот край опертый, и если изгибающий момент и перерезывающая сила равны нулю, то этот край свободный.

Для пластины, закрепленной в 4-х точках,

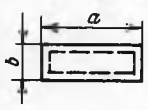
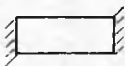
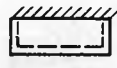
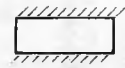
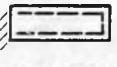
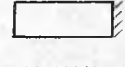
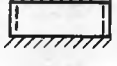
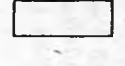
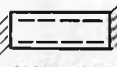
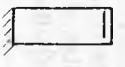
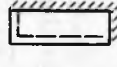
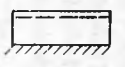
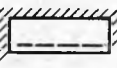
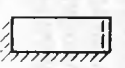
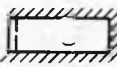
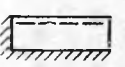
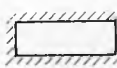

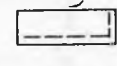
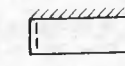
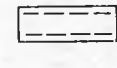
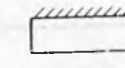

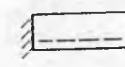
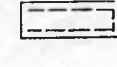
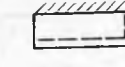
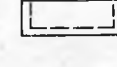



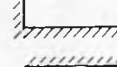

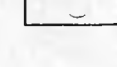
$$f_0 = \frac{\pi}{2a^2} \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{M} ab}. \quad (4.76)$$

Частоту собственных колебаний балочных конструкций определяем по следующей общей формуле:

$$f_0 = \frac{\varphi}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}}, \quad (4.77)$$

где l —длина пролета балки; φ —коэффициент, зависящий от способа закрепления (табл. 4.15); J —момент инерции; m' —

Таблица 4.14. Закрепление плат

№	Эскиз закрепления	Коэффициенты				№	Эскиз закрепления	Коэффициенты			
		k	α	β	γ			k	α	β	γ
1		9,87	1	2	1	18		22,37	1	0	0
2		9,87	1	2,33	2,44	19		22,37	0	0	1
3		15,42	1	0,95	0,41	20		3,52	1	0	0
4		9,87	1	2,57	5,14	21		3,52	0	0	1
5		22,37	1	0,48	0,19	22		15,42	1	0	0
6		15,42	1	1,11	1	23		15,42	0	0	1
7		22,37	1	0,57	0,47	24		3,52	1	5,56	19,2
8		15,42	1	1,19	2,1	25		15,42	1	0,29	0,05
9		22,37	1	0,61	1	26		3,52	1	1,58	0
10		3,52	0	1	0	27		3,52	0	1,58	1
11		9,87	0	0	1	28		22,37	0	0,1	1
12		9,87	1	0	0	29		22,37	1	0,1	0
13		9,87	0	0,43	1	30		15,42	0	0,34	1
14		9,87	1	0,43	0	31		15,42	1	0,34	0
15		3,52	1	5,97	40,5	32		9,87	1,26	0,6	1
16		22,37	1	0,14	0,02	33		9,87	1	0,6	1,26
17		3,52	1	2,48	1						

 a — длинная сторона; b — короткая сторона

Таблица 4.15. Зависимость коэффициента φ от способа закрепления

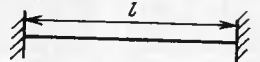



№	Эскиз закрепления	φ	№	Эскиз закрепления	φ
1		3,56	3		1,57
2		2,45	4		0,56

Таблица 4.16. Характеристики материалов, применяемых в РЭА

Материал	$E \cdot 10^{-10}$ Н/м ²	ν	$\rho \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	$\Delta \cdot 10^3$
СТЭФ толщиной 1,33 мм	3,2	0,279	2,47	2...10
МТЭ толщиной 1,22 мм	3,5	0,214	1,98	"
НФД толщиной 0,92 мм	3,45	0,238	2,32	"
СФ с печатной схемой	3,02	0,22	2,05	"
Сталь	22	0,3	7,8	—
Алюминий	7,3	0,3	2,7	—

приведенная погонная масса, которая определяется по формуле

$$m' = m'_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n \kappa_i m_i,$$

где m'_0 — равномерно распределенная погонная масса; m_i — i -я сосредоточенная масса; n — число сосредоточенных масс на балке; κ_i — коэффициент приведения сосредоточенной массы m_i к равномерно распределенной. Значения коэффициента κ_i в зависимости от относительной абсциссы сосредоточенной массы $a_i = x_i/l$ (рис. 4.27) и вида закрепления приведены на рис. 4.28.

В табл. 4.16 приведены характеристики некоторых материалов, применяемых в РЭА.

Частоты собственных колебаний РЭА на амортизаторах определяются по следующим формулам:

в условиях полной симметрии системы амортизации (рис. 4.29,а)

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi} \left(\sum_{i=1}^N \kappa_{xi} / m \right)^{1/2}; \quad f_{04} = \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^N (\kappa_{zi} y_i^2 + \kappa_{yi} z_i^2) / J_x \right]^{1/2};$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi} \left(\sum_{i=1}^N \kappa_{yi} / m \right)^{1/2}; \quad f_{05} = \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^N (\kappa_{xi} z_i^2 + \kappa_{zi} x_i^2) / J_y \right]^{1/2};$$

(4.78)

$$f_{03} = \frac{1}{2\pi} \left(\sum_{i=1}^N \kappa_{zi}/m \right)^{1/2}; \quad f_{06} = \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^N (\kappa_{xi} y_i^2 + \kappa_{yi} x_i^2) / J_z \right]^{1/2};$$

для системы амортизации, симметричной относительно двух вертикальных плоскостей xOz и yOz (рис. 4.29,б)

$$f_{03} = \frac{1}{2\pi} \left(\sum_{i=1}^N \kappa_{zi}/m \right)^{1/2}; \quad f_{06} = \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^N (\kappa_{xi} y_i^2 + \kappa_{yi} x_i^2) / J_z \right]^{1/2};$$

$$f_{07,08} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \kappa_{xi}}{m} + \frac{\sum_{i=1}^N \kappa_{xi} x_i^2 + \kappa_{zi} x_i^2}{J_y} \right) \pm \right.$$

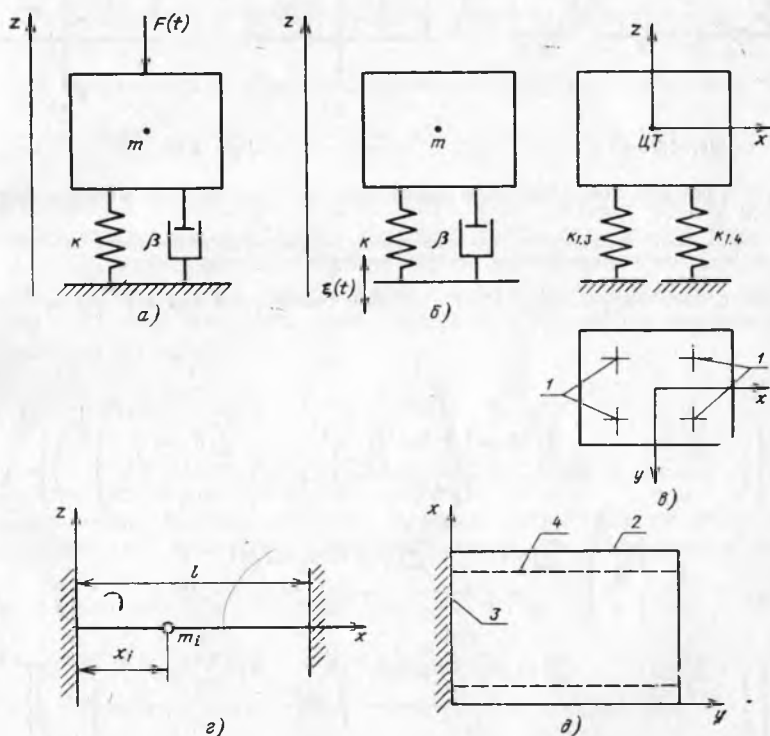


Рис. 4.27. Модели РЭА для анализа механических воздействий; модель механической системы с одной степенью свободы при силовом (а) и кинематическом (б) возбуждении; модель с шестью степенями свободы (в); модель балки (г); пластины (д):

1 — амортизатор; 2 — свободный край; 3 — защемленный край; 4 — опертый край

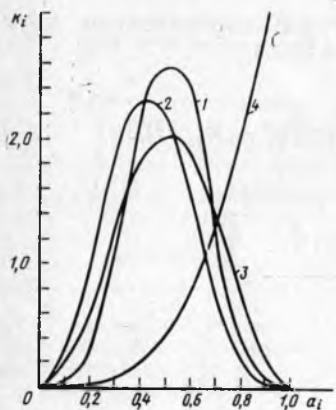


Рис. 4.28

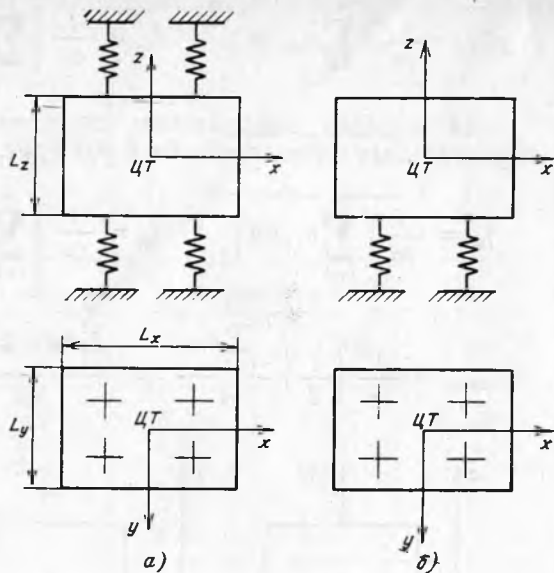


Рис. 4.29

Рис. 4.28. Графики коэффициентов приведения сосредоточенной массы к распределенной:

1 — оба конца балки защемлены; 2 — один конец защемлен, другой — оперт; 3 — оба конца опоры; 4 — один конец защемлен, другой — свободен

Рис. 4.29. Схемы амортизации РЭА с полной симметрией (а) и с двумя плоскостями симметрии (б)

$$\pm \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^N \kappa_{xi}}{m} - \frac{\sum_{i=1}^N (\kappa_{xi} z_i^2 + \kappa_{zi} x_i^2)}{J_z} \right)^2 + \frac{\left(\sum_{i=1}^N \kappa_{xi} z_i \right)^2}{m^2 J_y} \right]^{1/2} \Bigg\}^{1/2} ;$$

$$f_{05, c10} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \kappa_{yi}}{m} + \frac{\sum_{i=1}^N (\kappa_{yi} z_i^2 + \kappa_{zi} y_i^2)}{J_x} \right) \pm \right.$$

$$\left. \pm \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^N \kappa_{yi}}{m} - \frac{\sum_{i=1}^N (\kappa_{yi} z_i^2 + \kappa_{zi} y_i^2)}{J_x} \right)^2 + \frac{4 \left(\sum_{i=1}^N \kappa_{yi} z_i^2 \right)}{m J_x} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} ,$$

(4.79)

где f_{01}, f_{02}, f_{03} — частоты собственных линейных колебаний вдоль осей Ox, Oy, Oz ; f_{04}, f_{05}, f_{06} — частоты собственных крутильных колебаний относительно осей Ox, Oy, Oz ; $f_{07,08}$ — частоты собствен-

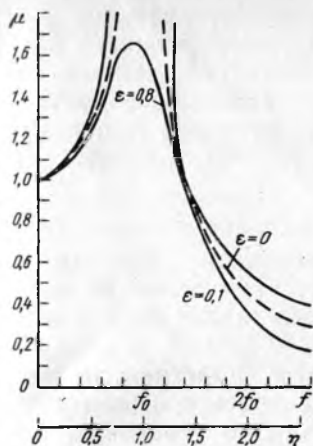


Рис. 4.30. Зависимость коэффициента динамичности по кинематическому возбуждению от частоты возбуждения

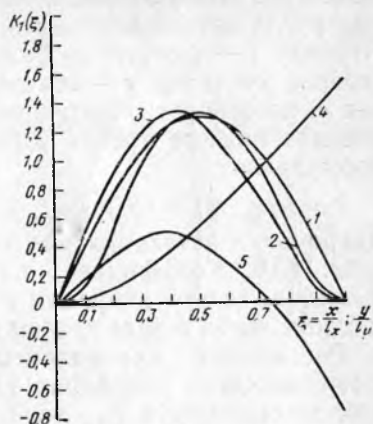


Рис. 4.31. Зависимость коэффициента формы колебаний от относительной координаты:

1 — оба края оперт; 2 — оба края защемлены; 3 — левый край оперт, правый защемлен; 4 — левый край защемлен, правый — свободный; 5 — левый край оперт, правый — свободный

ных сложных колебаний в плоскости xOz ; $f_{09,010}$ — частоты собственных сложных колебаний в плоскости yOz ; m — масса блока; k_{xi} , k_{yi} , k_{zi} — коэффициенты жесткости i -го амортизатора вдоль осей Ox , Oy , Oz ; x_i , y_i , z_i — координаты i -го амортизатора; J_x , J_y , J_z — осевые моменты инерции; для блоков с равномерно распределенной массой по объему

$$J_x = \frac{1}{2} m (L_z^2 + L_y^2), \quad J_y = \frac{1}{2} m (L_z^2 + L_x^2), \quad J_z = \frac{1}{2} m (L_x^2 + L_y^2);$$

L_x , L_y , L_z — размеры блока прямоугольной формы.

2. Определяем коэффициент динамичности.

Для механической системы с одной степенью свободы коэффициенты динамичности рассчитываются по следующим формулам:

для силового возбуждения (см. рис. 4.27,а)

$$K_{\text{дин}} = \kappa = \frac{S_B}{z_{\text{ст}}} = [(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \eta^2]^{-1/2}, \quad (4.80)$$

для кинематического возбуждения (см. рис. 4.27,б)

$$K_{\text{дин}} = \mu = \frac{S_B}{\xi_0} = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \eta^2}}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \eta^2}}, \quad (4.81)$$

где S_B — амплитуда вынужденных колебаний; $z_{\text{ст}}$ — статическое смещение системы под воздействием силы F_0 ; $z_{\text{ст}} = F_0/k$; F_0 —

амплитуда возбуждающей силы $F(f)$; k — жесткость системы; ξ_0 — амплитуда вибро смещения основания; $\eta = f/f_0$ — коэффициент расстройки; f — частота возбуждения; f_0 — частота собственных колебаний системы; ϵ — показатель затухания. Показатель затухания ϵ , коэффициент затухания δ , декремент затухания Λ и коэффициент вязкого трения β связаны между собой следующими формулами:

$$\epsilon = \Lambda/\pi, \quad \Lambda = \tau\beta/\sqrt{km}, \quad \delta = \beta/2m.$$

Декремент затухания для некоторых материалов приведен в табл. 4.16. Коэффициент динамичности рассчитывается во всем диапазоне частот вибрации и может быть представлен либо в виде таблицы, либо в виде графика (рис. 4.30).

Рассмотрим кинематическое возбуждение пластины за счет гармонического колебания ее закрепленных краев с амплитудой виброперемещения S_0 . Коэффициент передачи по ускорению будет являться функцией координат и может быть определен по формуле [25]:

$$\gamma(x, y) = \frac{a_b(x, y)}{a_0} = 1 + \sum_{i,j=1}^{\infty} \frac{k_{i,j}(x, y) \eta_{ij}^2}{1 - \eta_{ij}^2 + j\epsilon_{ij} \eta_{ij}}, \quad (4.82)$$

где $a_b(x, y)$ — амплитуда виброускорения точки пластины с координатами x, y ; $a_0 = \omega^2 S_0$ — амплитуда виброускорения краев пластины; η_{ij} — коэффициент расстройки относительно частоты собственных колебаний ij -й пространственной формы; ϵ_{ij} — показатель затухания ij -й формы колебаний; $K_{ij}(x, y)$ — коэффициент формы колебаний. Так как коэффициент расстройки высших типов колебаний для реальных конструкций плат в РЭА значительно меньше единицы, то можно ограничиться лишь основным типом колебаний. В этом случае (4.82) упрощается:

$$\gamma(x, y) = |\gamma(x, y)| = \frac{\sqrt{(1 + [K_1(x)K_1(y) - 1] \eta_{11}^2 + \epsilon_{11}^2 \eta_{11}^2)}}{\sqrt{(1 - \eta_{11}^2)^2 + \epsilon_{11}^2 \eta_{11}^2}}. \quad (4.83)$$

Значения коэффициента $K_1(\xi)$ для различных условий закрепления краев пластины приведены на рис. 4.31.

3. Определяем виброускорение и виброперемещение элементов РЭА.

Для механической системы с одной степенью свободы расчет амплитуд виброускорения a_b и виброперемещения S_b производится по следующим формулам:

для силового возбуждения

$$a_b(f) = n_b(f) \kappa(f) g; \quad (4.84)$$

$$S_b(f) = n_b(f) \kappa(f) g / (4\pi^2 f^2_0);$$

для кинематического возбуждения

$$a_B(f) = 4\pi^2 f^2 \xi_0(f) \mu(f) = a_0(f) \mu(f); \quad (4.85)$$

$$S_B(f) = \xi_0(f) \mu(f),$$

где $\xi_0(f) = a_0(f) / (4\pi^2 f^2)$ — амплитуда виброперемещения основания.

Для пластины:

в случае силового возбуждения

$$a_B(x, y, f) = \frac{n_B(f) K_1(x) K_1(y) g}{V(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \gamma^2}; \quad (4.86)$$

$$S_B(x, y, f) = \frac{n_B(f) K_1(x) K_1(y) g}{4\pi^2 f_0 V(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \gamma^2};$$

в случае кинематического возбуждения

$$a_B(x, y, f) = 4\pi^2 f^2 \xi_0(f) \gamma(x, y, f) = a_0(f) \gamma(x, y, f); \quad (4.87)$$

$$S_B(x, y, f) = \xi_0(f) \gamma(x, y, f).$$

Результаты расчета удобно представлять либо в виде таблицы, либо в виде графика. Для пластины необходимо рассчитать виброускорение, максимальное по поверхности.

4. Определяем максимальный прогиб пластины относительно ее краев. Для силового возбуждения $\delta_B = S_B(x, y, f)_{\max}$. Для кинематического возбуждения $\delta_B = |S_B(x, y, f) - \xi_0(f)|_{\max}$.

5. Проверяем выполнение условия вибропрочности. Оценка вибропрочности производится по следующим критериям:

для ИС, транзисторов, резисторов и других ЭРЭ амплитуда виброускорения должна быть меньше допустимых ускорений $a_{\text{доп}}$, т. е. $a_B \max < a_{\text{доп}}$; значения $a_{\text{доп}}$ определяются в процессе анализа элементной базы (см. гл. 3);

для элементов РЭА типа пластин стрела прогиба на расстоянии l не должна превышать величины δ_1 , вычисляемой по форму-

Таблица 4.17. Допустимые стрелы прогиба фольгированных материалов

Номинальная толщина листа	Допустимая стрела прогиба, мм			
	Одностороннее фольгирование		Двустороннее фольгирование	
	Гетинакс	Стеклотекстолит	Гетинакс	Стеклотекстолит
0,8	109	109	55	22
1,0	109	109	55	22
1,5	55	30	27	11
2,0	40	25	20	11
2,5	30	15	15	11
3,0	30	15	15	11

ле $\delta_1 = \delta_{\text{доп}} l^2$, где $\delta_{\text{доп}}$ — допустимый размер стрелы прогиба на длине 1 м (для фольгированных стеклотекстолита и гетинакса определяется из табл. 4.17), т. е. $\delta_b < \delta_{\text{доп}} l^2$;

для ПП с радиоэлементами должно выполняться условие $\delta_b < 0,003b$, где b — размер стороны ПП, параллельно которой установлены элементы.

В том случае, когда условия вибропрочности не выполняются, необходимо изменить конструкцию РЭА, увеличив жесткость несущих элементов. Радикальным решением вопроса обеспечения вибропрочности является применение амортизации.

Расчет на действие удара. Ударные воздействия характеризуются формой и параметрами ударного импульса (рис. 4.32). Следует иметь в виду, что максимальное воздействие на механическую систему оказывает импульс прямоугольной формы.

1. Определяем условную частоту ударного импульса $\omega = \pi/\tau$, где τ — длительность ударного импульса.

2. Определяем коэффициент передачи при ударе [25]:
для прямоугольного импульса

$$K_y = 2 \sin \frac{\pi}{2\nu}; \quad (4.88)$$

для полусинусоидального импульса

$$K_y = \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu},$$

где ν — коэффициент расстройки, $\nu = \omega/2\pi f_0$; f_0 — частота собственных колебаний механической системы.

3. Рассчитываем ударное ускорение $a_y = H_y K_y$, где H_y — амплитуда ускорения ударного импульса.

4. Определяем максимальное относительное перемещение:
для полусинусоидального импульса

$$Z_{\text{max}} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \frac{\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu}; \quad (4.89)$$

для прямоугольного импульса

$$Z_{\text{max}} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \sin \frac{\pi}{2\nu}.$$

5. Проверяется выполнение условий ударопрочности по следующим критериям:

для ЭРЭ ударное ускорение должно быть меньше допустимого, т. е. $a_y < a_{y,\text{доп}}$, где $a_{y,\text{доп}}$ определяется из анализа элементной базы;

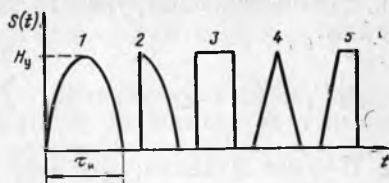
для элементов РЭА типа пластин должно выполняться условие

$$Z_{\text{max}} < \delta_{\text{доп}} l^2,$$

где $\delta_{\text{доп}}$ определяется по табл. 4.17;

Рис. 4.32. Формы ударных импульсов:

1 — полусинусоидальная; 2 — четвертьсинусоидальная; 3 — прямоугольная; 4 — треугольная; 5 — трапециевидная



для ПП с ЭРЭ

$$Z_{\max} < 0,003b,$$

где b — размер стороны ПП, параллельно которой установлены ЭРЭ;

для амортизированных систем

$$Z_{\max} < Z_{\text{св}},$$

где $Z_{\text{св}}$ — свободный ход амортизатора.

6. Частным случаем ударного воздействия является удар при падении прибора. Действующая при этом перегрузка находится следующим образом:

определяем относительную скорость соударения

$$V_0 = V_y + V_{\text{от}},$$

где $V_y = \sqrt{2gH}$ — скорость прибора в момент соударения; H — высота падения прибора; $V_{\text{от}} = V_y K_v$ — скорость отскока; K_v — коэффициент восстановления скорости, выбирается из табл. 4.18;

вычисляем действующее на прибор ускорение

$$a_{\text{п}} = V_0 2\pi / t_0.$$

Условие прочности проверяется аналогично п. 5 по ударному ускорению.

Расчет системы амортизации.

1. Задается схема расположения амортизаторов. При этом стремятся произвести рациональное размещение, при котором будут отсутствовать сложные связанные колебания. Большое значение имеет конструкция изделия.

2. Определяется статическая нагрузка на каждый амортизатор. В системе с однонаправленным нагружением, например вдоль

Таблица 4.18. Значения коэффициента восстановления скорости от материала соударяющихся тел

Материалы соударяющихся тел	K_v	Материалы соударяющихся тел	K_v
Сталь — сталь	0,94	Сталь — сухая земля	0,68
Сталь — бетон	0,90	Сталь — пенопласт	0,55

оси, статическая нагрузка P_i рассчитывается по следующим уравнениям:

$$\sum_{i=1}^n P_i = C; \quad \sum_{i=1}^n P_i x_i = 0; \quad \sum_{i=1}^n P_i y_i = 0,$$

где C — вес изделия; n — число амортизаторов; x_i и y_i — координаты точек крепления амортизаторов относительно центра масс изделия. При числе амортизаторов, большем трех, для определения статических нагрузок должны быть наложены $(n-3)$ дополнительные условия, например

$$\sum_{i=1}^n P_i x_i y_i = 0.$$

В пространственных схемах нагружения статические нагрузки определяются из уравнений:

$$\sum_{i=1}^n P_{ix} = C_x; \quad \sum_{i=1}^n P_{iy} = C_y; \quad \sum_{i=1}^n P_{iz} = C_z; \quad (4.90)$$

$$\sum_{i=1}^n (P_{ix} y_i - P_{iy} x_i) = 0; \quad \sum_{i=1}^n (P_{iy} z_i - P_{iz} y_i) = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n (P_{iz} x_i - P_{ix} z_i) = 0.$$

При числе амортизаторов, большем двух, должны быть наложены $(3n-6)$ дополнительные условия.

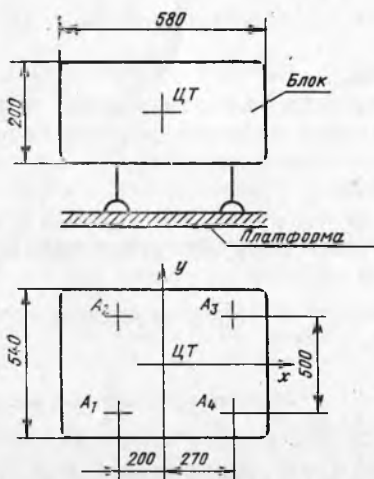


Рис. 4.33. Блок РЭА с системой амортизации

3. Выбирается тип амортизатора по номинальной статической нагрузке с учетом конструкции изделия [22].

4. Определяется статическая осадка каждого амортизатора

$$\delta_{стi} = P_i / \kappa_i,$$

где κ_i — коэффициент жесткости i -го амортизатора. Если осадка амортизаторов получается различной, то производится выравнивание изделия с помощью нивелирующих прокладок толщиной $\Delta_i = \delta_i - \delta_{ст \min}$, где $\delta_{ст \min}$ — наименьшая осадка.

5. Производится динамический расчет амортизаторов по методике, изложенной на с. 162. Если выбранные амортизаторы не удовлетворяют условиям вибро- и ударопрочности изделия, то следует их заменить другими, а расчет повторить.

Пример расчета системы амортизации. Блок формирования сигналов (БФС) имеет массу $M=40$ кг и габаритные размеры $540 \times 200 \times 580$ мм³. Блок предназначен для работы в кузове автомобиля. Схема расположения амортизаторов представлена на рис. 4.33. На платформу автомобиля действуют виброперегрузки в диапазоне частот 7 ... 50 Гц (табл. 4.19).

Определяем статическую нагрузку на каждый амортизатор P_i из системы уравнений (см. п. 2):

$$\begin{cases} P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 392, \\ (P_3 + P_4) 0,27 - (P_1 + P_2) 0,2 = 0, \\ (P_2 + P_3) 0,25 - (P_1 + P_4) 0,25 = 0, \\ (P_1 - P_2) 0,05 - (P_3 - P_4) 0,0675 = 0. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, находим

$$P_1 = P_2 = 112,6 \text{ Н}; P_3 = P_4 = 83,4 \text{ Н}.$$

По номинальной статической нагрузке выбираем тип амортизатора. В данном случае, учитывая условия эксплуатации и конструктивные особенности, подходят пружинные амортизаторы с воздушным демпфированием типа АД-10 и АД-15. Амортизаторы АД-10 имеют номинальную статическую нагрузку 70 ... 100 Н, коэффициент жесткости 117,7 Н/см и могут быть использованы в качестве амортизаторов A_3 и A_4 . Амортизаторы АД-15 (для A_1 и A_2) имеют соответственно $P_{ном} = 1000 \dots 150$ Н, $\kappa_{ам} = 186,4$ Н/см. Показатель затухания амортизаторов $\epsilon = 0,5$.

Т а б л и ц а 4.19. Динамические характеристики блока формирования сигнала

Частота f , Гц	7	10	30	50
Виброперегрузка, доли g	1	2	3	4
Виброперемещение ξ , мм	5,1	5	0,833	0,4
Коэффициент динамичности μ	1,82	0,72	0,12	0,06
Виброускорение блока	1,82	1,44	0,36	0,24
Относительное перемещение, мм	4,18	1,4	0,73	0,398

Определяем статическую осадку каждого амортизатора:

$$\delta_{ст 1, 2} = 112,6/186,4 = 0,6 \text{ см};$$

$$\delta_{ст 3, 4} = 83,4/117,7 = 0,71 \text{ см}.$$

Так как осадка амортизаторов получилась разной, то требуется произвести выравнивание блока с помощью нивелирующих прокладок под амортизаторы A_3 и A_4 . Определяем толщину прокладок:

$$\Delta_{3, 4} = 0,71 - 0,6 = 0,11 \text{ см}.$$

Произведем динамический расчет системы амортизаторов. Для этого определим прежде всего частоту собственных колебаний системы по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa_{\Sigma}}{M}},$$

где κ_{Σ} — суммарная жесткость системы. В данном случае $\kappa_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 \kappa_{ам i} =$
 $= 608,2 \text{ Н/см}$. Получаем

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{60820}{40}} = 6,2 \text{ Гц}.$$

По формуле (4.81) рассчитываем коэффициент динамичности системы для кинематического возбуждения в диапазоне частот 7 ... 50 Гц. Результаты заносим в табл. 4.19.

Определяем действующее на блок виброускорение и относительное перемещение по (4.85) и также заносим результаты в табл. 4.19. Максимальное относительное перемещение происходит на частоте 7 Гц и составляет 4,18 мм. Это значение меньшего допустимого свободного хода амортизаторов АД-10 и АД-15, составляющего 6 ... 8 мм. Следовательно, данная система амортизации может быть использована в конструкции блока.

4.6. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ РЭА

Расчет надежности заключается в определении показателей надежности изделия по известным характеристикам надежности составляющих компонентов и условиям эксплуатации. Для расчета надежности необходимо иметь логическую модель безотказной работы системы. При ее составлении предполагается, что отказы элементов независимы, а элементы и система могут находиться в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном. Элемент, при отказе которого отказывает вся система, считается последовательно соединенным на логической схеме надежности. Элемент, отказ которого не приводит к отказу системы, считается включенным параллельно.

Расчет надежности РЭА по внезапным отказам.

1. Из анализа логической схемы надежности определяется способ резервирования, используемый в изделии. Если схема состоит только из последовательно включенных элементов, то си-

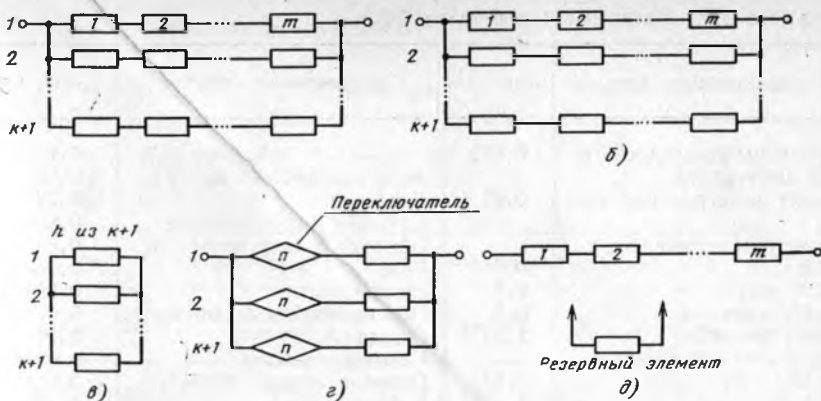


Рис. 4.34. Логические схемы надежности резервированных систем:

a — пассивное общее резервирование; *b* — пассивное раздельное резервирование; *в* — дробное резервирование; *г* — активное общее резервирование; *д* — скользящее резервирование

стема является нерезервированной. Логические схемы резервированных систем приведены на рис. 4.34.

2. Определяются интенсивности отказов элементов с учетом условий эксплуатации изделия:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_4 a_i(T, \kappa_{II}), \quad (4.91)$$

где λ_{0i} — номинальная интенсивность отказов; κ_1 и κ_2 — поправочные коэффициенты в зависимости от воздействия механических факторов; κ_3 — поправочный коэффициент в зависимости от воздействия влажности и температуры; κ_4 — поправочный коэффициент в зависимости от давления воздуха; $a_i(T, \kappa_{II})$ — поправочный коэффициент в зависимости от температуры поверхности элемента (T) и коэффициента нагрузки (κ_{II}).

Значения номинальных интенсивностей отказов некоторых элементов даны в табл. 4.20. В табл. 4.21—4.23 приведены поправочные коэффициенты $\kappa_1 \dots \kappa_4$.

Коэффициенты электрической нагрузки κ_{II} определяются по формулам, приведенным в табл. 4.24 в зависимости от типа радиоэлемента.

Графики для определения поправочных коэффициентов $a_i(T, \kappa_{II})$ для различных радиоэлементов приведены на рис. 4.35—4.39. Результаты удобно представлять в виде табл. 4.25.

3. Рассчитывается вероятность безотказной работы в течение заданной наработки ($0, t_p$).

Для нерезервированных систем

$$P(t_p) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t_p\right), \quad (4.92)$$

Таблица 4.20. Интенсивности отказов ЭРЭ

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^6, 1/ч$	Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^6, 1/ч$
Микросхемы со средней степенью интеграции	0,013	—»— силовые	0,025
Большие интегральные схемы	0,01	Автотрансформаторы	0,06
Транзисторы германиевые:		Дроссели	0,34
до 2 мВт	0,4	Катушки индуктивности	0,02
до 20 мВт	0,7	Обмотки электродвигателя	0,08
до 200 мВт	0,6	Реле	0,25 · n
свыше 200 мВт	1,91	Соединители	0,062 · n
Транзисторы кремниевые:		Переключатели кнопочные	0,07 · n
до 150 мВт	0,84	Гнезда	0,01
до 1 Вт	0,5	Клеммы, зажимы	0,0005
до 4 Вт	0,74	Провода соединительные	0,015
Диоды германиевые	0,157	Кабели	0,475
Диоды кремниевые	0,2	Изоляторы	0,05
Конденсаторы бумажные	0,05	Аккумуляторы	7,2
—»— керамические	0,15	Батареи заряжаемые	1,4
—»— слюдяные	0,075	Электродвигатели асинхронные	8,6
—»— стеклянные	0,06	—»— синхронные	0,359
—»— электролитические	0,035	—»— вентиляторные	2,25
—»— воздушные переменные	0,034	Антенны	0,36
Резисторы композиционные	0,043	Волноводы жесткие	1,1
—»— пленочные	0,03	Волноводы гибкие	2,6
—»— проволочные	0,087	Предохранители	0,5
—»— угольные	0,045	Выводы высокочастотные	2,63
Трансформаторы входные	1,09	Плата печатной схемы	0,7
—»— выходные	0,09	Пайка печатного монтажа	0,01
—»— звуковой частоты	0,02	Пайка навесного монтажа	0,03
—»— высокочастотные	0,045	Пайка объемного монтажа	0,02
		Микрофоны динамические	20
		Громкоговорители динамические	4
		Датчики оптические	4,7

Примечание: л — число контактов

Таблица 4.21. Коэффициенты влияния механических воздействий

Условия эксплуатации аппаратуры	Вибрация k_1	Ударные нагрузки k_2	Суммарные воздействия k_{Σ}
Лабораторные	1,0	1,0	1,0
Стационарные (полевые)	1,04	1,03	1,07
Корабельные	1,3	1,05	1,37
Автофургонные	1,35	1,08	1,46
Железнодорожные	1,4	1,1	1,54
Самолетные	1,46	1,13	1,65

Таблица 4.22. Коэффициент влияния влажности

Влажность, %	Температура, °С	Поправочный коэффициент k_a
60...70	20...40	1,0
90...98	20...25	2,0
90...98	30...40	2,5

Таблица 4.23. Коэффициент влияния атмосферного давления

Давление, кПа	Поправочный коэффициент k_a	Давление, кПа	Поправочный коэффициент k_a
0,1...1,3	1,45	32,0...42,0	1,2
1,3...2,4	1,40	42,0...50,0	1,16
2,4...4,4	1,36	50,0...65,0	1,14
4,4...12,0	1,35	65,0...80,0	1,1
12,0...24,0	1,3	80,0...100,0	1,0
24,0...32,0	1,25		

Таблица 4.24. Коэффициенты нагрузки ЭРЭ

Наименование элемента	Контролируемые параметры	Коэффициент нагрузки k_n	Рекомендуемые значения в режиме	
			импульсный	статистический
Микросхемы	Максимальный выходной ток, $I_{\text{вых max}}$ Входной ток микросхем, включенных на выходе, $I_{\text{вхi}}$ Число нагруженных входов, n	$\frac{\sum_{i=1}^n I_{\text{вх } i}}{I_{\text{вых max}}}$	—	—
Транзисторы	Мощность, рассеиваемая на коллекторе, P_k	$\frac{P_k}{P_{k, \text{доп}}}$	0,5	0,2
Полупроводниковые диоды	Обратное напряжение, U_0	$\frac{U_0}{U_{0\text{доп}}}$	0,5	0,2
Конденсаторы	Напряжение на обкладках, U	$\frac{U}{U_{\text{доп}}}$	0,7	0,5
Резисторы	Рассеиваемая мощность P	$\frac{P}{P_{\text{доп}}}$	0,6	0,5
Трансформаторы	Ток нагрузки, I_n	$\frac{I_n}{I_{n, \text{доп}}}$	0,9	0,7
Электрические соединители	Ток, I_k	$\frac{I_k}{I_{k, \text{доп}}}$	0,8	0,5

Т а б л и ц а 4.25. Интенсивности отказов радиоэлементов проектируемого изделия

Порядковый номер	Наименование элемента	Схемное обозначение	Тип элемента	Интенсивность отказов в нормальном режиме $\lambda_{0i} \cdot 10^6, 1/ч$	Коэффициент нагрузки K_{Hi}	Температура $T_i, ^\circ C$	Поправочный коэффициент $a_i(T_i, K_{Hi})$	Интенсивность отказов i -го элемента с учетом внешних условий $\lambda_i = \lambda_{0i} k_1 k_2 k_3 k_4 \cdot 10^6, 1/ч$	Интенсивность отказов i -го элемента в рабочем режиме $\lambda_i \cdot 10^6, 1/ч$
1									
...									
i									

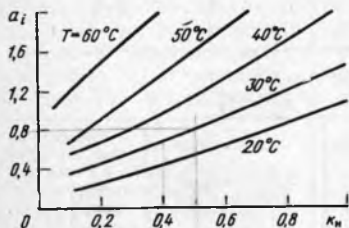


Рис. 4.35. Зависимость $a_i(T, k_n)$ для транзисторов

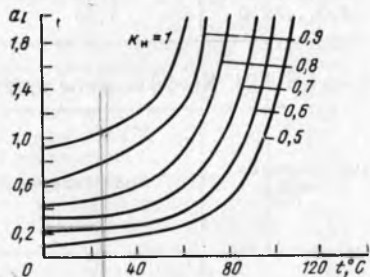


Рис. 4.37. Зависимость $a_i(T, k_n)$ для конденсаторов

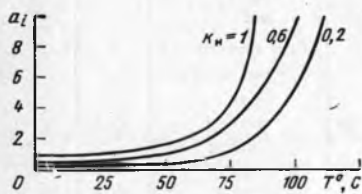


Рис. 4.36. Зависимость $a_i(T, k_n)$ для полупроводниковых диодов

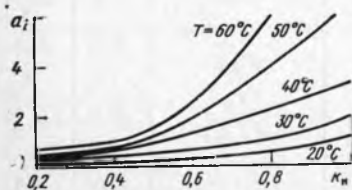


Рис. 4.39. Зависимость $a_i(T, k_n)$ для трансформаторов

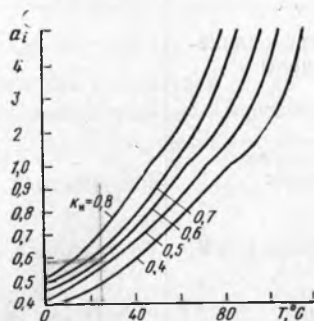


Рис. 4.38. Зависимость $a_i(T, k_n)$ для резисторов

где n — число элементов. При этом интенсивность отказов системы

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

а среднее время наработки до отказа $T=1/\Lambda$.

Для пассивного общего резервирования (рис. 4.34,а)

$$P(t_p) = 1 - \prod_{j=1}^{\kappa+1} \left[1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^m \lambda_i t_p\right) \right], \quad (4.93)$$

где κ — кратность резервирования.

Для пассивного отдельного резервирования (рис. 4.34,б)

$$P(t_p) = \prod_{i=1}^m [1 - (1 - e^{-\lambda_i t_p})^{\kappa+1}]. \quad (4.94)$$

При общем резервировании с дробной кратностью (рис. 4.34,в)

$$P(t_p) = \sum_{\nu=0}^{\kappa+1-h} C_{\kappa+1}^{\nu} \exp(-(\kappa+1-\nu) \lambda_i t_p) \sum_{j=0}^{\nu} (-1)^j C_{\nu}^j e^{-j \lambda_i t_p}, \quad (4.95)$$

где $C_{\kappa+1}^{\nu}$ — число сочетаний из $\kappa+1$ по ν .

Для активного резервирования с учетом надежности переключателей (рис. 4.34,г)

$$P(t_p) = 1 - (1 - e^{-\lambda_{\pi} t_p} e^{-\lambda_i t_p})^{\kappa+1}, \quad (4.96)$$

где λ_{π} — интенсивность отказов переключателей.

Для скользящего резервирования (рис. 4.34,д)

$$P(t_p) = \left[1 + m \frac{\lambda_i}{\lambda_{\pi}} (1 - e^{-\lambda_{\pi} t_p}) \right] e^{-m \lambda_i t_p}. \quad (4.97)$$

4. Для ремонтируемой РЭА определяется коэффициент готовности, равный вероятности нахождения системы в состоянии работоспособности при длительной эксплуатации:

для нерезервированной системы

$$K_r = \frac{\mu}{\mu + \lambda};$$

для резервированной системы, состоящей из равнонадежных одного основного и κ ненагруженных резервных элементов

$$K_r = 1 - \frac{1}{\sum_{j=0}^{\kappa+1} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j};$$

для той же резервированной системы с нагруженным резервом

$$K_r = 1 - \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} \frac{1}{j!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j}, \quad (4.98)$$

где μ — интенсивность восстановления.

На этом расчет надежности по внезапным отказам заканчивается.

Расчет надежности РЭА по постепенным отказам. При расчете надежности РЭА по постепенным отказам определяется вероятность попадания выходного определяющего параметра РЭА Y в пределы допуска $[Y_1, Y_2]$. Для этого прежде всего необходимо знание уравнения связи, определяющего вид зависимости определяющего параметра Y от параметров элементов и конструкции РЭА x_i :

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4.99)$$

1. Исходными данными для расчета надежности по постепенным отказам являются:

характер постоянного изменения математического ожидания каждого параметра конструкции m_{x_i} , например от температуры $m_{x_i}(T)$ или времени эксплуатации $m_{x_i}(t)$;

среднее квадратическое отклонение параметров конструкции, вызванное дестабилизирующими случайными факторами технологического процесса, условий эксплуатации, временем σ_{x_i} ;

допуск на определяющий параметр $[Y_1, Y_2]$.

Предполагается, что функция распределения случайных величин параметров конструкции является гауссовской, т. е.

$$\varphi(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{x_i}} \exp \left[-\frac{(x_i - m_{x_i})^2}{2\sigma_{x_i}^2} \right], \quad (4.100)$$

причем в нормальных условиях эксплуатации математическое ожидание m_{x_i} совпадает с номинальным значением x_{0i} .

2. Из (4.99) получают уравнение абсолютной погрешности определяющего параметра

$$Y - Y_0 = \sum_{i=1}^n A_i (x_i - x_{0i}), \quad A_i = \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]_0, \quad (4.101)$$

где индекс «0» означает, что в выражение для A_i подставляются номинальные значения параметров конструкции.

3. Определяются математическое ожидание M_Y и среднее квадратическое отклонение σ_Y определяющего параметра при за-

данных температуре или сроке эксплуатации:

$$M_Y = Y_0 + \sum_{i=1}^n A_i (m_{x_i} - x_{0i}), \quad (4.102)$$

$$\sigma_Y = \left[\sum_{i=1}^n A_i^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{\substack{i \neq j \\ i, j=1}}^n A_i A_j \sigma_{x_i} \sigma_{x_j} r_{ij} \right]^{1/2},$$

где r_{ij} — коэффициент корреляции случайных величин x_i и x_j .

4. Определяется вероятность работоспособности устройства в предположении, что функция распределения плотности вероятности случайной величины определяющего параметра является гауссовской:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Y} \int_{Y_1}^{Y_2} \exp \left[-\frac{(Y - M_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right] dY. \quad (4.103)$$

Пример расчета надежности ячейки приведен в гл. 6.

4.7. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ТИПОРАЗМЕРНОГО РЯДА БНК МОДУЛЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Последовательность расчета оптимального типоразмерного ряда БНК включает в себя выполнение следующих этапов [1, 24]:

1. Техничко-экономический анализ исходных данных.
2. Определение вида целевой функции и ограничений.
3. Расчет оптимального ряда БНК.
4. Определение технико-экономического эффекта от внедрения оптимального типоразмерного ряда БНК в практику разработки РЭА.

Техничко-экономический анализ исходных данных состоит из:
определения главного и соподчиненных параметров;
сбора и обработки статистических данных о БНК;
определения исходного ряда главного и соподчиненных параметров;
анализа исходных данных.

Определение вида целевой функции и ограничений включает:
выбор и обоснование критерия оптимизации;
определение ограничений для выбранной целевой функции;
определение функций потребности $\varphi(x)$, затрат $C(x)$ и потерь на адаптацию $C_a(x)$.

Расчет оптимального типоразмерного ряда БНК включает:
составление алгоритмов решения задачи оптимизации и определения способов их реализации;

выбор методов решения целевой функции и составление программ расчета на ЭВМ;

решение целевой функции и получение оптимального типоразмерного ряда БНК;

анализ полученных результатов и составление искомого типоразмерного ряда БНК.

Определение технико-экономической эффективности от внедрения оптимального типоразмерного ряда БНК в практику разработки РЭА включает:

определение показателей технико-экономической эффективности;

расчет годовой экономии от внедрения оптимального типоразмерного ряда.

Структура целевой функции и ряд ограничений, накладываемых на характер ряда, на вид функции спроса, стоимости и потерь определяют выбор метода решения задачи оптимизации типоразмерного ряда БНК.

Если для исходного ряда известен спрос по каждому типоразмеру БНК и замена может быть осуществлена только на ближайший больший типоразмер из предлагаемого ряда (при неизменности спроса и полном его удовлетворении), а функции стоимости разработки, изготовления и эксплуатации неубывающие (при произвольном виде функции начальных затрат), то задача определения оптимального типоразмерного ряда БНК при условии минимизации суммарных приведенных затрат решается при помощи модифицированных алгоритмов динамического программирования. При этом решении задача определения оптимального типоразмерного ряда значительно упрощается, если определенное число членов ряда заранее фиксировано.

В случае исключения отдельных типоразмеров из имеющегося фиксированного ряда или добавления новых по истечении некоторого времени производят сравнительную оценку значений критериев до и после включения (исключения) типоразмеров.

В качестве исходных данных для расчета оптимального типоразмерного ряда БНК принимают:

$J = \{1, \dots, j, \dots, n\}$ — множество видов спроса на типоразмеры БНК;

$I = \{1, \dots, k, \dots, M\}$ — исходный типоразмерный ряд;

φ_j — дискретная функция спроса, характеризующая спрос каждого типоразмера БНК, $j=1, n$;

$q_k^0(V_k)$ — начальные затраты на разработку и подготовку производства k -го типоразмера БНК ($k=1, M$) с учетом объема выпуска V_k ;

$C_k(V_k)$ — затраты на производство одного типоразмера k -го типа, выпускаемого в объеме V_k ;

$q_{k,j}^p$ — затраты на эксплуатацию единичного типоразмера БНК j -го типа для удовлетворения спроса k -го вида с учетом количества средств радиоэлектронной техники, находящихся в эксплуатации у одного потребителя;

$P_{\kappa j}$ — число изделий κ -го типоразмера, необходимых для удовлетворения единицы спроса j -го вида.

Если использовать в качестве критерия оптимизации критерий минимума суммарных приведенных затрат на удовлетворение заданного спроса, то целевая функция будет иметь вид

$$S(V) = \sum_{\kappa \in V} \left[C_{\kappa}^0(V_{\kappa}) + \sum_{j=1}^n q_{\kappa j}^0 \cdot P_{\kappa j} \cdot x_{\kappa j} \right] \rightarrow \min_{\kappa \in V} \quad (4.104)$$

При ограничениях

$$\sum_{\kappa \in V} x_{\kappa j} = \varphi_j, \quad j = \overline{1, n}; \quad (4.105)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{\kappa i} x_{\kappa i} = V_{\kappa}, \quad \kappa \in V_{\kappa}; \quad (4.106)$$

$$x_{\kappa j}, V_{\kappa} \geq 0 \quad (\kappa = \overline{1, M}, j = \overline{1, n}); \quad (4.107)$$

$$C_{\kappa}^0(V_{\kappa}) = q_{\kappa}^0(V_{\kappa}) + C_{\kappa}(V_{\kappa}) V_{\kappa}, \quad (4.108)$$

где $x_{\kappa j}$ — число единиц спроса вида j , удовлетворяемое κ -м типоразмером; $V_{\kappa} = \sum_{j \in J} \varphi_j$ — программа выпуска по κ -му типоразмеру, представляющая собой сумму потребностей, принадлежащих области применения κ -го типоразмера БНК ряда; J — область применения κ -го типоразмера БНК, при $J = \bigcup_{\kappa \in V} J_{\kappa}$.

Под оптимальным типоразмерным рядом x^N понимается такой набор типоразмеров БНК $x^N = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, при котором целевая функция (4.104) достигает минимума при условии выполнения ограничений (4.105) — (4.107), а число N определяет число типоразмеров БНК в данном оптимальном ряду.

Решение комбинаторной задачи (4.104) — (4.108) при значительной размерности исходных множеств J и I связано с вычислительными трудностями, которые могут быть частично преодолены, если использовать особенности функций $q_{\kappa}^0(V_{\kappa})$ и $C_{\kappa}(V_{\kappa})$, которые предполагаются как строго возрастающие функции.

Для решения задачи (4.104) — (4.108) используют метод ветвей и границ и реализованную на его основе программу.

Исходной информацией для этой программы являются следующие данные:

матрица $(q_{\kappa j}^0)$, $\kappa = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, n}$;

вектор (q_{κ}^0) , $\kappa = \overline{1, M}$;

вектор (φ_j) , $j = \overline{1, n}$.

В программе расчета оптимального типоразмерного ряда БНК используются следующие основные переменные:

M — число типоразмеров исходного ряда;

MM — число видов спроса;

$G(M, MM)$ — массив производственно-эксплуатационных затрат;

$G\theta(M)$ — массив начальных затрат;

$FI(MM)$ — массив значений спроса;

VB — оптимальное значение целевой функции;

$I\theta(I)$ — номера типоразмеров оптимального ряда.

При оптимизации ряда по этой программе находят общее число типоразмеров N и значение каждого типоразмера БНК:

$$x^N = (x_1, x_2, \dots, x_N).$$

Расчет оптимального типоразмерного ряда радиаторов. Радиаторы предназначены для рассеивания мощности, выделяемой полупроводниковым прибором с целью поддержания температуры коллекторного перехода прибора не выше допустимой по условиям применения в РЭА, эксплуатируемой при различных климатических параметрах окружающей среды.

Зависимость температуры коллекторного перехода полупроводникового прибора от основных параметров радиатора определяется по формуле

$$t_n = t_c + P_{\text{пп.п}}(R_p/\theta + R_{\text{п-р}}), \quad (4.109)$$

где t_c — температура окружающей среды; $P_{\text{пп.п}}$ — мощность, рассеиваемая полупроводниковым прибором; R_p — тепловое сопротивление радиатора; θ — средний коэффициент неравномерности распределения температуры по радиатору; $R_{\text{п-р}}$ — тепловое сопротивление переход — радиатор.

Если мощность рассеивания $P_{\text{пп.п}}$ увеличивается, например при применении полупроводникового прибора другого типонаминала, то согласно (4.109) тепловое сопротивление радиатора должно соответственно уменьшиться. Имея в виду, что тепловое сопротивление определяется по формуле

$$R_p = \frac{1}{\alpha_{\text{пр}} F_p}, \quad (4.110)$$

где $\alpha_{\text{пр}}$ — приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи радиатора; F_p — эффективная площадь теплоотдачи радиатора; уменьшить R_p можно, в основном увеличивая F_p . Увеличение теплоотдачи радиатора при соблюдении эффективности конструкции, т. е. при соблюдении наилучших соотношений по толщинам основания и ребер, шага между ребрами, высоты ребра, формы его поперечного сечения, возможно достигнуть только увеличением объема радиатора.

Таким образом, главным параметром радиатора, по которому следует производить построение типоразмерного ряда, является

его объем, определяющий возможность его применения для конкретного полупроводникового прибора при заданных характеристиках окружающей среды.

Одновременно полагаем, что в составе ряда рассматриваемых конструкций радиаторов, обладающих наибольшей относительной рассеиваемой мощностью на единицу объема радиатора P_V при перегреве на 1°C , что

$$P_V = \frac{P_{\text{н.п.}}}{V_p \Delta t_p} = (V_p R_p)^{-1}, \quad (4.111)$$

где V_p — объем радиатора; $\Delta t_p = t_p - t_c$ — перепад температуры на поверхности радиатора.

Следовательно, каждый типоразмер радиатора в виде значений высоты, ширины и глубины ($H \times B \times L$) однозначно определяет его объем и относительную рассеиваемую мощность.

Анализ конструкций радиаторов показывает, что соотношения размеров сторон основания радиатора находятся во взаимосвязи, тесно коррелированы и могут быть описаны регрессионной функцией линейного вида. Зная площадь основания радиатора и его объем, определяют высоту ребер, учитывая, что увеличение высоты ребра при постоянной его толщине уменьшает эффективность радиатора.

Потребность в радиаторах для различных РЭУ будет определяться:

применяемой элементной базой (в той части, которая относится к полупроводниковым приборам с повышенной мощностью рассеивания);

количеством полупроводниковых приборов, требующих установку их на радиаторы, в определенных условиях окружающей среды. Указанные данные с учетом повторяемости составных частей РЭА будут определять функцию спроса в виде годовой потребности в выпуске соответствующих типоразмеров радиаторов.

Применяемость радиаторов определяют из анализа конструкторской документации последовательным раскрытием состава по спецификации сборочных единиц (блоков, шкафов и т. п.). Образовательный статистический материал по применяемости радиаторов позволяет оценить минимальные и максимальные значения типоразмеров радиаторов, количественную потребность каждого типоразмера в исходном ряду, а также перспективу их развития в связи с применением новых мощных полупроводниковых приборов и область их использования в различной РЭА.

Результаты анализа по применяемости радиаторов и их потребности в объеме годового выпуска, т. е. значения дискретной функции спроса, сведены в табл. 4.26.

Затраты, связанные с изготовлением радиаторов, как показывает технико-экономический анализ, прямо пропорциональны его

Т а б л и ц 4.26. Годовые потребности радиаторов

Значение объема радиатора, см ³	1	20	26	33	37	43	46	54	57
Потребное количество, шт.	2	68	240	360	38	145	45	32	15

Продолжение табл. 4.26

1	62	72	79	85	96	104	113	154
2	110	20	8	220	95	10	45	15

Окончание табл. 4.26

1	216	230	257	287	305	324	366	395	415	428	500
2	15	20	5	14	8	25	65	5	20	25	15

объему и массе. С увеличением серийности выпуска стоимость радиатора пропорционально снижается.

Для определения зависимости стоимости от объема радиатора (при расчете для разных типоразмеров) используют среднестатистическую эмпирическую зависимость

$$C_i = 0,133 V_i + 35,33, \quad (4.112)$$

где C_i — стоимость i -го типоразмера в условных рублях; V_i — объем радиатора, см³.

При серийном изготовлении i -го типоразмера в количестве N_i штук стоимость C_{N_i} определяют по формуле:

$$C_{N_i} = C_i N_i^{1-\mu_i} = (0,133 V_i + 35,33) N_i^{1-\mu_i}, \quad (4.113)$$

где $\mu_i = 0,1 \dots 0,2$ — коэффициент серийности, определяемый на основании опытных данных.

Потери на адаптацию появляются в связи с несовпадением нужного потребителю типоразмера радиатора с типоразмером, определяемым в ряду, и обусловлены применением большего типоразмера радиатора. Используя радиатор с большим объемом, следует предусматривать в аппаратуре дополнительные объемы для размещения этого радиатора, что приводит к определенным потерям из-за нерационального использования объемов отводимых для размещения элементов и составных частей РЭА, что может ухудшить ее тактико-технические характеристики.

Увеличение объема и массы можно оценить в стоимостном виде, используя соответствующие статистические данные по видам аппаратуры, которые позволяют определять стоимость использования единицы объема, занимаемого аппаратурой. Проводя оценки путем парного сравнения по всему исходному ряду, составляют квадратную матрицу адаптационных потерь, где число строк и столбцов соответствует числу членов исходного ряда.

В данном конкретном случае для упрощения расчетов применяют аналитическое выражение, аппроксимирующее указанные потери в виде линейной функции

$$C_{aij} = K_a (V_i - V_j), \quad (4.114)$$

где C_{aij} — стоимостные потери от несоответствия требуемых значений объемов V_j радиаторов от имеющихся в оптимальном типоразмерном ряду V_i . При $V_j = V_i$, $C_{aij} = 0$; K_a — коэффициент приведения стоимости использования единицы объема (массы).

По результатам статистических данных можно рекомендовать для расчета типоразмерного ряда радиаторов значение $K_a = 0,63$.

На основе сформулированных зависимостей по затратам на производство (4.111), по потерям на адаптацию (4.112), а также, учитывая затраты на разработку и подготовку производства радиаторов, находят выражение для критерия оптимизации типоразмерного ряда объемов радиаторов (целевая функция) следующего вида:

$$S(V) = \sum_{i=1}^M \left[C_{Hi} + C_{Ni} + \sum_{j=1}^n (C_{aij} N_{ij}) \right] \rightarrow \min, \quad (4.115)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^n N_{ij} = \varphi_{ij}; \quad i = \overline{1, M}; \quad j = \overline{1, n}; \quad M \neq n,$$

где C_{Hi} — затраты на разработку и подготовку производства i -го типоразмера радиатора; C_{Ni} — затраты на производство i -го типоразмера радиаторов N_i штук; C_{aij} — потери на адаптацию при применении i -го объема радиатора, отличающегося от j -го объема, требуемого потребителю; φ_{ij} — потребность i -го объема радиаторов для удовлетворения j -го спроса потребителя; N_{ij} — число типоразмеров радиаторов i -го объема для удовлетворения j -го спроса потребителя.

Для решения задачи получения оптимального типоразмерного ряда радиаторов используют метод ветвей и границ и реализованную на его основе программу. Структурная схема алгоритма приведена в Приложении 2.

Исходной информацией для этой программы являются следующие данные:

M — число типоразмеров исходного ряда радиаторов;
 $V(M)$ — массив объемов исходного ряда радиаторов;
 $FI(M)$ — массив значений спроса радиаторов;
 $ZATN(M)$ — массив затрат на разработку и подготовку производства радиаторов.

При оптимизации типоразмерного ряда по этой программе находят значение каждого типоразмера оптимального ряда и затраты на его производство.

Получив оптимальный типоразмерный ряд объемов радиаторов в виде 43; 85; 113; 305; 500 см³, находят габаритные размеры радиаторов ($H \times B \times L$), используя данные анализа статистических исследований по взаимозависимости габаритных размеров радиаторов от его объема при помощи регрессионных моделей.

Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ И САПР В КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

5.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ЭВМ И САПР В КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Использование ЭВМ в процессе конструирования. Проектирование РЭА и создание оптимального технического решения в сжатые сроки связано с трудностями, основными из которых являются:

невозможность учета человеком огромного количества разнообразных факторов, влияющих на техническое решение;

большая трудоемкость и стоимость изготовления макета изделия, особенно при интегральной технологии;

сложность имитации условий, в которых должна работать современная РЭА.

Один из путей преодоления этих трудностей без существенного увеличения численности работающих — использование возможностей современных ЭВМ, что позволяет заменить макет радиоэлектронного узла его математической моделью, комплекс измерительно-испытательного оборудования — программами анализа, оптимизации и испытаний, а затем обработать узел на ЭВМ при помощи этого математического комплекса.

Настоящий раздел посвящен вопросам эффективного применения ЭВМ средней производительности для решения задач конструкторского проектирования РЭА. Приведенные результаты получены авторами в процессе разработки, совершенствования и

внедрения в практику проектирования комплекса программ моделирования, анализа и оптимизации РЭУ.

Процесс проектирования и возможности ЭВМ. Один из путей повышения эффективности процесса проектирования сложных радиоэлектронных изделий — автоматизация научных исследований, использование современных ЭВМ для проверки и отработки научно-технических идей. В связи с этим очень важно определить место современных ЭВМ в процессе проектирования и такую методику ее использования, которая обеспечит максимальный выигрыш.

Рассмотрение процесса проектирования как творческого приводит к отрицательному ответу на вопрос о возможности применения в нем современных ЭВМ. Если рассматривать этот процесс как формально-логический, создается впечатление, что машине следует отводить в нем решающую роль. Очевидно, целесообразно разграничить операции, выполнение которых свойственно человеку или эффективно на ЭВМ и на этой основе проанализировать традиционный процесс проектирования.

Известно, что современные цифровые ЭВМ могут выполнять такие основные функции: принимать и хранить цифровую информацию, осуществлять логические и арифметические операции в запрограммированной последовательности, выдавать необходимую информацию. Все, что ЭВМ может делать при проектировании, базируется на этих функциях, которые она выполняет быстро, практически безошибочно.

Естественно, человек также способен выполнить эти операции, однако эффективность их выполнения значительно ниже, чем у ЭВМ, т. е. арифметические и логические операции он производит медленнее, хранить информацию может только в небольших объемах и ограниченное время, больше допускает ошибок. Более эффективно человек решает трудноформализуемые задачи, требующие интуиции, способности оценивать результаты и принимать решения на основе неформальных критериев.

Рассмотрим вопросы, связанные с оптимальным использованием вычислительной машины в процессе конструирования РЭА, и сделаем попытку соотнести задачи, стоящие перед человеком, разрабатывающим конструкцию, с возможностями современной ЭВМ.

Под проектированием в широком смысле понимают использование имеющихся средств для достижения требуемой цели, координацию составных частей или отдельных действий для получения нужного результата. Специалистам, занятым проектированием (разработкой) РЭА, часто приходится решать задачу в следующей постановке: известны требования на проектируемое изделие, требуется найти техническое решение, материалы, компоненты, технологический процесс и информацию о том, как эти компоненты соединить, чтобы получить устройство, выполняющее

заданные функции. Процесс решения этой задачи будем называть процессом проектирования.

Процесс проектирования сложного РЭУ в условиях проектно-конструкторского предприятия включает следующие основные этапы: эскизное проектирование; техническое проектирование; разработка КД на опытные образцы и их изготовление; испытания; освоение в производстве.

Разбиение на этапы способствует упорядочению процесса разработки, создает необходимые условия для контроля и коррекции документации на различных стадиях проекта. По результатам выполнения этапов заказчику предъявляют образцы и документацию (чертежи, расчеты, описания, отчеты и т. д.), вырабатывают замечания и производят соответствующую доработку.

С точки зрения разработчика более естественно разделить процесс проектирования на этапы, отражающие основные существенные моменты разработки проекта сложного РЭУ:

системотехническое проектирование — разработка РЭУ до уровня функциональных схем;

схемотехническое проектирование — разработка РЭУ до уровня принципиальных схем;

конструкторское проектирование — разработка конструкторской документации.

Такое деление на этапы весьма условно.

В дальнейшем будем считать, что технические требования к схеме полностью сформулированы в ходе выполнения системотехнического и схемотехнического этапов.

Рассмотрим последовательность выполнения проектных работ по традиционной методике и выделим наиболее трудоемкие и рутинные работы при конструировании, автоматизация которых наиболее желательна. Затем проанализируем процесс разработки конструкции блока (прибора) для выбора оптимальной методики с использованием ЭВМ. Укрупненная схема процесса разработки радиоэлектронного блока традиционными методами включает следующие этапы (рис. 5.1).

При проектировании РЭА только незначительная часть общего объема работ (10 ... 20 %) выполняется инженерами высокой квалификации. Действительно, опыт и высокая эрудиция инженера играют основную роль при разработке технического задания на проектирование при выборе принципов конструирования и элементной базы. Но основной объем работ по конструкторскому проектированию состоит из таких этапов, как компоновка, размещение модулей, трассировка монтажных соединений и выпуск технической документации. Эти этапы трудоемки, так как связаны с просмотром большого количества вариантов решения, но не требуют высокой квалификации.

В связи с совершенствованием элементной базы РЭА, а также конструктивно-технологических характеристик проектируемых



Рис. 5.1. Схема процесса разработки радиоэлектронного блока традиционными методами

модулей всех типов, в несколько раз увеличивается трудоемкость составления технической документации. Все это приводит к необходимости совершенствования методов конструкторского проектирования РЭА, основой которых является автоматизация процесса конструирования.

Для современной РЭА состав и последовательность задач, решаемых при конструкторском проектировании, определяется делением проектируемой РЭА на конструктивные единицы — модули. Четкое деление всей конструкции РЭА на модули обеспечивает удобство проектирования, изготовления и эксплуатации и является основным условием ориентации на методы автоматизации проектирования РЭА.

Однако успех применения ЭВМ для решения сложных задач конструкторского проектирования в значительной мере зависит от методики применения ЭВМ для этой цели, основу которой составляют анализ, синтез и оптимизация. Эти задачи имеют место как в традиционных методах проектирования, так и в условиях применения ЭВМ. Интерес представляет перераспределение функций между человеком и ЭВМ при автоматизированном проектировании при решении перечисленных задач.

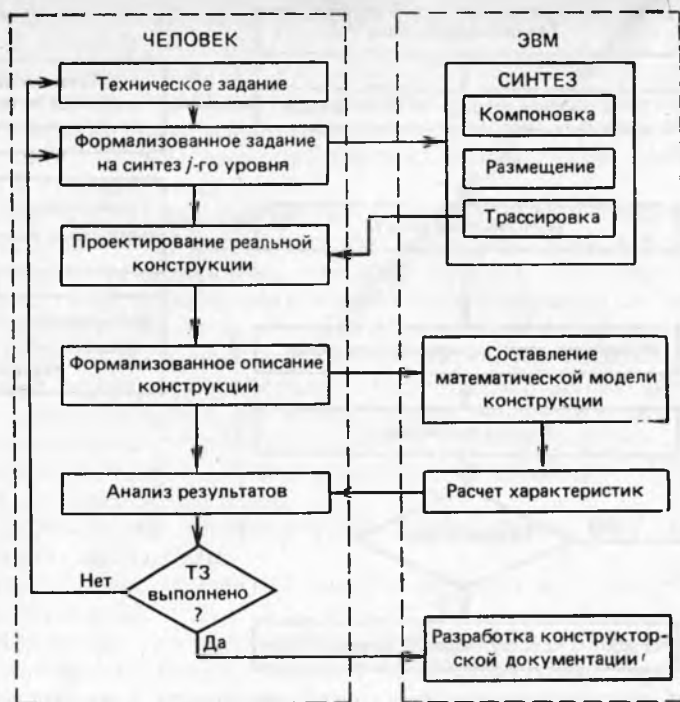


Рис. 5.2. Распределение задач между человеком и ЭВМ в процессе разработки конструкций РЭА

Одной из важнейших задач конструирования РЭА является максимальное внедрение методов автоматизированного проектирования, что в итоге должно привести к минимальному участию человека в процессе создания конструкции (рис. 5.2). В этом случае инженер на всем протяжении разработки конструкции составляет формализованное задание (ФЗ) для ЭВМ, анализирует результаты и делает предположения о возможных причинах несоответствия получаемых характеристик требованиям ТЗ. Основную работу по созданию конструкции проводит ЭВМ, оснащенная соответствующим информационным и программным обеспечением. По ФЗ синтезируется конструкция, в идеальном случае удовлетворяющая требованиям ТЗ.

Процесс синтеза конструкции сводится к решению ряда задач, типичных для большинства уровней иерархии, решение которых производится на ЭВМ с помощью разработанных алгоритмов. Общностью этих задач и обусловлена последовательность разработок модулей (рис. 5.3).

Рис. 5.3. Основные этапы разработки модулей каждого иерархического уровня

Существует множество методов синтеза конструкций. Однако все эти методы не универсальны и, как правило, требуют различного подхода к каждой конкретной проблеме синтеза. Эти методы накладывают жесткие ограничения на структуру синтезируемой конструкции и затрудняют выбор оптимальной. Отсутствие в настоящее время метода, решающего проблему синтеза конструкций каким-то универсальным способом, можно объяснить следующими причинами:

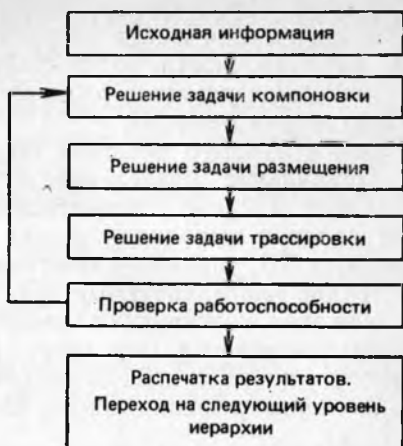
большим объемом и сложностью вычислений при поиске варианта, удовлетворяющего всем условиям;
отсутствием простого и одновременно достаточно общего расчетного алгоритма;

сложностью формулировки достаточно простых условий реализации конструкции.

Устранение перечисленных трудностей возможно по мере развития вычислительной техники и вычислительной математики, а также при создании соответствующих алгоритмов, учитывающих условия физической реализуемости конструкции.

Опыт внедрения автоматизированных методов в процессе конструирования указывает на эффективность такой методики использования ЭВМ, при которой человек не заменяется ЭВМ на всех этапах разработки конструкции, но и ЭВМ используется не как пассивный вычислитель. Задача состоит в создании человеко-машинной системы, в которой человек и машина не противостоят, а взаимно дополняют друг друга. ЭВМ решает задачи, легко поддающиеся математической формализации, трудоемкие задачи, требующие многократного выполнения однотипных операций, значительных затрат времени, запоминания и обработки больших информационных массивов. Среди задач, которые удастся математически формализовать и алгоритмизировать, можно назвать:

хранение и переработку информации, трансляцию описания электрической принципиальной схемы с языка пользователя в машинный язык, организацию библиотек модулей и параметров компонент, библиотек прикладных программ, представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме, организацию массива конструкторских решений и т. д.;



расчет характеристик конструкций, для которых существует алгоритмическая методика расчета (надежности, теплового режима, вибропрочности, экранирования, технологичности и др.);

анализ результатов расчета характеристик конструкции и конструкторских решений;

поиск лучшего решения по формальным критериям.

Правильное разделение функций между человеком и ЭВМ приводит к схеме автоматизированного проектирования, в которой человек выполняет задачи творческого характера, т. е. анализирует ТЗ, управляет поиском требуемого решения, осуществляет трудно формализуемые задачи проектирования реальной РЭА (улучшение конструкции, введение новых элементов, составление формализованного описания схемы), задачи принятия решений (выбор наиболее подходящих алгоритмов решения задачи, оценка качества решения, окончание поиска оптимального варианта и т. д.).

ЭВМ, в свою очередь, решает задачи синтеза отдельных этапов конструирования (компоновки, размещения, трассировки) на каждом иерархическом уровне, в результате чего реализуется ряд вариантов конструкции, для которых ЭВМ приводит расчеты характеристик, анализ конструктивных решений и т. п.

Анализ результатов, полученных ЭВМ, и заключение о доработке делает конструктор. Методика итеративной доработки конструкции с использованием ЭВМ как инструмента для получения необходимых характеристик хорошо обеспечена алгоритмами и программами.

В результате анализа характеристик конструктор выдвигает предположение о причине несовпадения полученных и заданных характеристик, вносит изменения в формализованное описание схем и дает задание ЭВМ сделать повторный расчет. Этот процесс итеративной доработки продолжается до тех пор, пока не будет достигнут желаемый результат. В этом случае ЭВМ, оснащенная соответствующим программным и информационным обеспечением, как бы заменяет модель конструкции и комплекс измерительного оборудования, используемого для получения характеристик при традиционном методе проектирования.

Математическая модель конструкции включает математические зависимости параметров элементов конструкции от условий эксплуатации (температуры, давления, вибраций и т. п.), а также законы изменения параметров в пределах, заданных ТЗ. Наличие этой информации об элементах конструкции позволяет проводить имитацию испытаний конструкции на ее модели. Изменение условий эксплуатации, заданных в ТЗ, пересчитывается в ЭВМ в соответствующее изменение параметров конструкции и производится многократный анализ конструкции при реальных сочетаниях воздействий, изменений и отклонений параметров. Затем проводится математическая обработка результатов этого многократного

анализа и делается вывод о результатах испытаний конструкции.

Количественный и качественный выигрыш от применения ЭВМ в этом случае состоит в следующем:

1) полностью или частично отпадает необходимость:

в затратах на комплектующие изделия, материалы и конструктивные элементы, необходимые для изготовления макета;

в измерительных приборах для определения характеристик конструкции;

в оборудовании для испытаний конструкций;

2) значительно сокращается время определения характеристик, а следовательно, и доводки конструкции;

3) появляется возможность:

разрабатывать конструкции, содержащие элементы, характеристики которых известны, но самих элементов нет у разработчика;

имитировать воздействия, воспроизведение которых при натурных испытаниях затруднено, требует сложного оборудования, сопряжено с опасностью для экспериментатора, а иногда и вообще невозможно;

проводить анализ конструкции на разных частотах или в области высоких или низких температур, где применение измерительных приборов становится затруднительным.

Существуют и недостатки этой методики применения ЭВМ для разработки конструкции, а именно:

макет конструкции по сравнению с моделью имеет преимущество в том, что несет в себе элементы физического подобия; взаимное расположение элементов макета подобно расположению их в будущей реальной конструкции, вследствие чего учтены паразитные связи и наводки между элементами;

возникает необходимость обучения инженера методике применения ЭВМ: составлению формализованного задания на решение отдельных задач синтеза конструкции, работе с результатами расчета, полученными на ЭВМ в непривычной для него форме;

процесс итеративной доводки конструкции предполагает проведение многократного анализа. В связи с этим сравнительно много времени тратится на подготовку данных и ожидание ответа с ЭВМ. Время работы ЭВМ при этом составляет незначительную часть общего времени, затрачиваемого на получение результата;

высокая трудоемкость обработки большого числа вариантов характеристик и отсутствие гарантии получения оптимального решения.

Несмотря на то, что возможны более производительные способы использования ЭВМ для конструирования, в большинстве случаев применяют именно такую методику. Это объясняется следующими причинами: к настоящему времени создано довольно много расчетных анализирующих программ и накоплен неко-

торый опыт работы с ними; внедрение такой методики не связано ни с существенными затратами, ни с перестройкой существующего процесса проектирования, а применяется параллельно с традиционными методами.

Разработка реальной конструкции — это процедура, которую трудно формализовать и алгоритмизировать из-за большого разнообразия решений, которые можно использовать при разработке реальной конструкции. Разработка основных концепций оптимального конструкторского проектирования РЭА в рамках САПР, а также создание обобщенных алгоритмов для решения этой задачи представляют собой основную проблему, возникающую при разработке РЭА.

Как и в любой задаче оптимизации, основной трудностью здесь является выбор модели исследования, которая должна быть достаточно гибкой и способной учитывать все контролируемые факторы. В этом случае, с одной стороны, должен использоваться опыт и интуиция инженера, а с другой — возможности ЭВМ как мощного средства хранения и быстрой переработки большого количества информации. Основное преимущество методов оптимизации — их универсальность. Использование методов оптимизации позволяет наилучшим образом распределить работу между инженером и ЭВМ и обеспечить наиболее высокую производительность процесса разработки.

Исходными данными для работы программы оптимизации являются:

данные о начальном варианте конструкции;

характеристики конструкции, которые требуется получить согласно ТЗ;

некоторая система ограничений, оговаривающих условия реализуемости элементов конструкции, пределы варьирования, связь между параметрами и т. д.

Работа программы представлена упрощенной схемой, показанной на рис. 5.4:

по исходным данным формируется математическая модель, характеристики которой рассчитываются блоком анализа;

определяется численный критерий отличия полученной характеристики от заданной;

блок оптимизации проводит поиск знака и величины изменения каждого параметра, приводящего к уменьшению отличия характеристик;

изменения значения параметров передаются на формирователь математической модели, и этот цикл повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие окончания работы программы, т. е. пока не будет достигнута требуемая характеристика.

При определении эффективности программы в целом необходимо:



Рис. 5.4. Схема алгоритма оптимизации

чтобы критерий качества решения адекватно отражал ту цель, которая ставится перед программой оптимизации;

обеспечить точное и быстрое построение модели и расчет ее характеристик;

так организовать процесс решения задачи, чтобы разумно отделить расчеты, которые будут выполняться под контролем формальных критериев, отработать эти критерии, например критерий окончания процесса поиска, перехода на другой алгоритм от расчетов, выполнением которых будет управлять человек, и разработать программные средства, обеспечивающие возможность управления процессом поиска. В этом случае вычислительная машина, оснащенная соответствующей программой, выполняет рутинную работу по выбору оптимального варианта решения из множества возможных, а инженер осуществляет выбор структуры по управлению процессом оптимизации.

Применение САПР при решении задач конструкторского проектирования. На этапе конструкторского проектирования среди большого числа задач можно выделить однотипные по компоновке, размещению и трассировке.

Исторически сложилось так, что в первую очередь алгоритмы и программы были созданы именно для этих задач, так как по сравнению с другими задачами конструирования их оказалось легче формализовать. Для решения этих задач создано множество различных алгоритмов, отличающихся критериями, точностью, временем выполнения, объемом требуемой памяти и т. п.

В процессе проектирования возникает необходимость большого числа вычислений, обращения к стандартным алгоритмам решения типовых задач, увязки различных, зачастую противоречивых требований этапов функционального и конструкторского проектирования, а также проверки правильности результатов различных этапов проектирования. В связи с этим целесообразно объединить отдельные алгоритмы в единую автоматическую систему конструкторского проектирования (САПР КП), ориентированную на конкретную базу конструкций.

Применение САПР КП при решении задач конструкторского проектирования позволит: снизить трудоемкость решения конструкторских задач; повысить качество полученных решений; провести оптимизацию модуля на всех иерархических уровнях.

Необходимо иметь в виду, что изменение конструкторской базы требует переработки многих программ и алгоритмов существующих САПР. Разрабатываемые языки и системы программ должны быть по возможности универсальными и минимально зависящими от конструктивно-технологических особенностей проектируемых модулей. Учитывая сложность программ, целесообразно разработку САПР ориентировать на РЭА определенного класса, используя иерархический принцип ее конструкций.

Существующие системы автоматизированного проектирования РЭА представляют собой системы типа «человек — машина», для реализации которых необходим целый комплекс технических средств: ЭВМ, координатографы, печатающие и запоминающие устройства, графопостроители и т. д., — и специализированное математическое обеспечение, предназначенное для решения задач конструкторского проектирования модулей различных уровней иерархии. Эти системы предполагают возможность непосредственного вмешательства разработчика в процессе проектирования для корректировки машинных решений.

В общем случае САПР осуществляют проектирование, начиная от функциональной схемы и кончая всей необходимой технической документацией для изготовления, наладки и эксплуатации ЭВМ в целом. Проектирование модулей каждого уровня, начиная от ИС до РЭА в целом, выделяется в самостоятельные этапы. Однако многие САПР ориентированы на модули второго и третьего уровней.

Несмотря на различия в любой САПР можно выделить следующие самостоятельные этапы конструкторского проектирования, характерные для модуля любого уровня иерархии:

1. Введение исходной информации, контроль правильности подготовки и кодировки исходных данных с входного языка во внутреннее представление.

2. Компоновка функциональной структуры по модулям всех уровней на основе выбранных показателей качества, т. е. распределение множества функциональных элементов на подмножества

соответствующих конкретным модулям различных уровней иерархии. Под функциональными элементами понимается группа объединенных радиокомпонентов, реализующих простую функцию (логическую, запоминания, усиления и т. п.).

3. Размещение скомпонованных функциональных элементов по конструкциям модулей всех уровней, составление соответствующего технического документа, например таблицы расположения.

4. Трассировка соединений между модулями в соответствии со схемой связей и ограничениями на их раскладку для данного базового модуля, составление электромонтажных чертежей, контроль правильности составления документации.

При изготовлении фотооригиналов и фотонегативов с помощью САПР рабочие чертежи утрачивают функции основного документа, необходимого для изготовления фотооригинала. В качестве основной конструкторской документации используется табличный способ представления результатов проектирования. Машинные чертежи установки элементов (микросхем) на плате и чертежи слоев плат при этом являются дополнительной документацией. Если соединения осуществляются с помощью станков-автоматов, то выходная информация выдается на соответствующие носители (перфоленты, перфокарты и т. п.) с управляющей информацией для изготовления фотшаблонов.

5. Составление сводных текстовых документов, таких как ведомости спецификаций, ведомости покупных изделий, ведомости ЗИП, ведомости ссылочных документов и другие, устанавливаемые ЕСКД.

Схема организации процесса конструкторского проектирования модулей системы автоматизированного проектирования представлена на рис. 5.5.

Конструкторский этап проектирования САПР является комплексным, т. е. начинается с кодирования электрических принципиальных схем и заканчивается автоматическим изготовлением ПП модулей второго уровня. Этап компоновки является началом реализации электрической принципиальной схемы и во многом определяет качество решения задач размещения и трассировки. Решение задач компоновки и размещения преследует одну и ту же цель — обеспечение благоприятных условий для выполнения трассировки соединений. Вследствие этого имеется общность в показателях качества решения этих задач. В настоящее время созданы алгоритмы совместного решения этих задач, благодаря чему открываются дополнительные возможности улучшения качества результатов. В основе совместного решения задач компоновки — размещения лежит алгоритм последовательного размещения [5], в который введены изменения для осуществления компоновки.

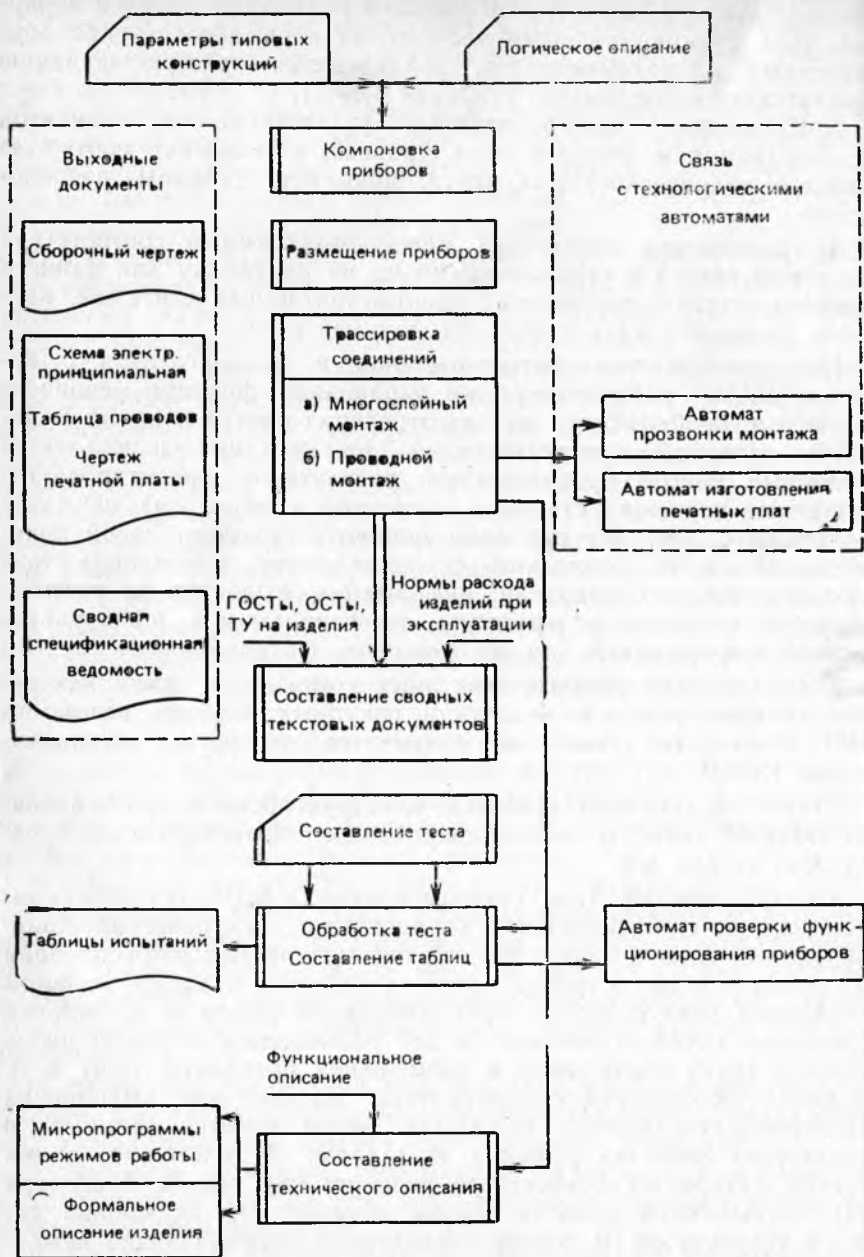


Рис. 5.5. Схема конструкторского этапа проектирования САПР

Определенный интерес представляют такие задачи размещения, в которых показатели оптимальности трассировки учитываются уже на этапе размещения, хотя практически во всех существующих САПР взаимосвязанные задачи размещения и трассировки обычно решаются поэтапно.

Дифференцированное решение конструкторских задач на каждом иерархическом уровне не гарантирует точного решения. Одной из причин этого является эвристичность показателей оптимизации. Отметим, что критерий минимизации суммарной длины соединений, а также и другие критерии, хотя и дают положительные результаты при эксплуатации САПР, но оказываются недостаточными при оптимизации модулей всех уровней. Например, отдельные алгоритмы размещения практически не позволяют получить идентичное размещение подмножеств модулей, имеющих одинаковую принципиально-функциональную структуру. Однако другие показатели, применяемые в конкретных задачах, могут дать лучшие результаты. Примером может служить показатель минимизации числа перегибов проводников. Этот недостаток в равной мере присущ трассировке соединений, где наиболее важным требованием к конструкции ПП является регулярность рисунка проводников. Это не только существенно упрощает разработку программ трассировки, но и облегчает задачу воспроизведения рисунка с помощью координатографа.

Широкое применение в САПР минимизации суммарной длины проводников объясняется тем, что это ведет к минимизации паразитных наводок, числа слоев МПП и числа перегибов, а также облегчает выполнение ограничений, налагаемых на длину проводника, и упрощает анализ вариантов исполнения модулей. Такие же показатели, характеризующие влияние температурного режима, электромагнитных полей, учитывающие требования вибропрочности, и другие на взаимное расположение элементов и связей, иногда трудно формализовать. При этом часто возникают затруднения при решении задачи. В результате ряд требований зачастую превращается в ограничения, определяемые разработчиком. Это приводит к тому, что для некоторых модулей и связей определяются жестко закрепленные позиции, выпадающие из рассмотрения при решении задачи в рамках САПР КП. Вследствие этого появляется необходимость введения в алгоритмы конструкторского проектирования в САПР дополнительных показателей для всесторонней оптимизации модулей и выбора наиболее эффективных решений.

5.2. ПЕРЕЧЕНЬ И СОДЕРЖАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ, РЕКОМЕНДУЕМЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Все многообразие задач по конструированию РЭА, выполняемых с помощью ЭВМ, можно свести к следующим основным типам:

- 1) расчетные задачи;
- 2) моделирование процессов конструирования;
- 3) задачи оптимизации принятия конструкторских решений.

Перечисленные задачи решаются как по разработанным программам, так и в рамках САПР, в зависимости от их трудоемкости и сложности.

Для выполнения на ЭВМ можно рекомендовать следующие конструкторские расчеты: теплового режима блока (прибора); на механические воздействия; надежности и показателей качества конструкции; экранирования и т. д.

Содержание и порядок работ при выполнении конструкторских расчетов на ЭВМ. Подготовка конструкторских расчетных задач к решению на ЭВМ состоит в следующем:

- а) выбор метода решения задачи, определяемого ее постановкой, требованиями к точности получения результатов решения и времени ее реализации на ЭВМ;
- б) подготовка исходных данных;
- в) разработка схемы алгоритма;
- г) выбор языка программирования;
- д) составление программы;
- е) отладка программы;
- ж) решение задач на ЭВМ (получение необходимых результатов решения задачи на АЦПУ, их анализ);
- з) оформление расчетов, выполненных на ЭВМ.

Правила оформления алгоритмов. На начальных стадиях разработки программ решения расчетных задач необходимо представить схему алгоритма, отражающего логическую структуру методики, принятой для расчета. Самым распространенным способом представления алгоритмов является схемный. Преимущества его состоят в компактности и наглядности представления записи отдельных этапов алгоритма и их взаимосвязи. Схема алгоритма служит хорошей основой для последующего доведения его до вычислительной машины в виде программы на алгоритмическом языке. Последовательность этапов разработки алгоритма решения задач на ЭВМ представлена на рис. 5.6.

Схемы алгоритмов находят широкое распространение на начальных этапах разработки программы решения задачи. Алгоритм в этом случае представляется графически в виде последо-



Рис. 5.6. Последовательность этапов разработки алгоритма задачи для решения на ЭВМ

вательности так называемых блочных символов, определяющих основные этапы переработки данных. Блоки соединяются между собой стрелками, упорядочивающими связи между блоками. Внутри блоков указывается информация, определяющая содержание предписанных им функций. Эта информация записывается словесно или в виде формул в зависимости от степени конкретизации составления схемы алгоритма. Перечень блочных символов, их наименование, предписанные им функции, форма и размер блоков определяются ГОСТ 19428-74, а правила выполнения схем алгоритмов — ГОСТ 19427—74.

По назначению и характеру отображаемых функций блочные символы делятся на основные, используемые для предписания процессов ввода—вывода данных, обработки и передачи данных, и вспомогательные, используемые для пояснения отдельных элементов схем и обозначения связей между ними. Наиболее важные и часто используемые символы представлены в табл. 5.1.

Выбор языка программирования. Язык программирования предназначен для описания алгоритмов решения определенного класса задач. С помощью языка программирования специалисты в некоторой области применения ЭВМ могут формировать задание для ЭВМ, указывая конкретные шаги, которые необходимо выполнить для решения задачи.

Для решения инженерных и научно-технических задач наибольшее применение имеет язык Фортран. Название языка Фортран произошло от английских слов FORMula TRANslate — переводчик формул. Этот язык создавался в основном для решения задач вычислительной математики, но успешно применяется для

Таблица 5.1. Условные графические обозначения (символы) этапов обработки данных и программирования

Наименование	Обозначение	Функции
Ввод — вывод		Преобразование данных в форму, пригодную для обработки, ввод и регистрация результатов обработки, вывод
Ручной ввод		Ввод данных оператором в процессе обработки при помощи устройств, непосредственно сопряженных с вычислительной машиной
Дисплей		Ввод — вывод данных в случае, если непосредственно подключенное к процессору устройство воспроизводит данные и позволяет оператору вносить изменения в процессе их обработки
Документ		Ввод — вывод данных, носителем которых служит магнитная лента
Магнитная лента		Ввод — вывод данных, носителем которых служит магнитная лента
Магнитный диск		Ввод — вывод данных, носителем которых служит магнитный диск
Процесс		Выполнение операций или группы операций, в результате которых изменяется значение, форма представления или расположение данных
Решение		Выбор направления выполнения алгоритма или программы в зависимости от некоторых переменных условий
Модификация		Выполнение операций, меняющих команды или группу команд, изменяющих программу
Предопределенный процесс		Использование ранее созданных и отдельно описанных алгоритмов или программ
Пуск — останов		Начало, конец, прерывание процесса обработки данных или выполнения программы

решения экономических, учетно-бухгалтерских задач, так как содержит средства для редактирования результатов, например, для составления различных форм ведомостей, графического оформления язык Фортран использует общепринятую математическую символику. Алгебраическая формула и оператор языка Фортран для вычисления значения арифметического выражения выглядят почти одинаково.

Одной из важнейших особенностей языка Фортран является то обстоятельство, что он относительно свободен от специфики конкретной вычислительной машины, т. е. является машинно-независимым языком. Вариантами языка, широко используемыми на сегодняшний день, являются Фортран IV и Базисный Фортран. Различные диалекты языка Фортран реализованы на больших современных ЭВМ. Языком Фортран целесообразно пользоваться для решения расчетных задач, когда требуется большой объем оперативной памяти ЭВМ и вычислений.

Язык Бэйсик предназначен для решения математических и инженерных задач в режиме диалога человек — ЭВМ. Он позволяет программировать большой круг задач, сочетая в себе простоту и легкость для изучения и понимания. В языке используются обозначения, подобные обычным, математическим.

Исходная программа и данные вводятся с клавиатуры дисплея или с перфоленты, интерпретируются и результаты выдаются на печать. Для работы интерпретатора Бэйсик необходима ЭВМ типа «Электроника-60», «Электроника 100-25» с памятью емкости как минимум 8 Кбайт. Приведенные ЭВМ, так же как и вычислительные комплексы ДВК-1, ДВК-2, ДВК-3, получают все большее распространение. Простота, доступность, стабильность в работе делают их удобными для решения расчетных задач, где нет необходимости в большой оперативной памяти ЭВМ.

Особенностью разработанных программ для проведения конструкторских расчетов является использование языка Бэйсик. Одним из достоинств языка Бэйсик является простота и возможность диалогового режима работы с программой, что позволяет в зависимости от полученных результатов принимать решения о конструктивных изменениях и о просчете программ при новых исходных данных и тем самым сокращать время получения конечного результата.

Требования к оформлению конструкторских расчетов, проводимых на ЭВМ. При работе на ЭВМ студенты могут выступать как пользователи и как разработчики программ. В любом случае решение задач на ЭВМ завершается отчетом о проделанной работе. Существуют определенные правила оформления программ. Основные требования к оформлению сводятся к подготовке следующих материалов:

1. Постановка задачи (ее физическая сущность и математическая постановка).

2. Функциональное назначение программы.
3. Описание исходных данных, необходимых для решения задачи.
4. Описание логической структуры (схема алгоритма решения задачи).
5. Распечатка текста программы на АЦПУ.
6. Контрольные примеры (распечатка результатов решения задачи в диалоговом режиме на АЦПУ).
7. Выводы, полученные в результате анализа результатов решения задачи.

В том случае, если программа разработана ранее и студент выступает как ее пользователь, распечатку текста программы можно не приводить.

Рассмотрим примеры решения конструкторских расчетных задач на ЭВМ, а также их оформление.

Описание программы расчета теплового режима блока РЭА.

Функциональное назначение. Программа предназначена для расчета теплового режима блоков (приборов) в условиях естественного охлаждения РЭА. Программа может быть использована: при проверочном расчете максимальной температуры кожуха, нагретой зоны (НЗ), критичного к перегреву компонента блока (прибора);

при исследовании перегрева кожуха, НЗ, компонента блока (прибора);

при определении мощности, рассеиваемой каждой платой блока (прибора) при заданных размерах блока (прибора);

при исследовании оптимального размещения плат в блоке (приборе) по рассеиваемой мощности;

при исследовании влияния характера поверхности кожуха блока (прибора) на эффективность теплообмена лучеиспусканием;

при исследовании перегрева компонента в зависимости от коэффициента перфорации кожуха блока (прибора).

Для проведения расчета должна быть составлена тепловая модель (см. рис. 4.9) блока (прибора), внутри которой выделяется НЗ.

В зависимости от конструктивных особенностей в блоке (приборе) выделяются одна или несколько НЗ, для которых и проводится расчет теплового режима. Нагретая зона блока, выполненного в виде набора ПП, представляет собой параллелепипед с размерами, несколько меньшими размеров набора ПП. В НЗ не входят поверхности на платах, служащие для установки лицевых панелей, соединителей, а также поверхности у краев плат, предназначенные для установки по направляющим.

Различают три типа конструкции блоков в зависимости от конструктивного исполнения (табл. 4.8).

Программа включает следующие этапы: расчет перегрева и температуры t_k кожуха; расчет перегрева и температуры $t_{\text{нз}}$ на-

гретой зоны; расчет перегрева и температуры корпуса критичного к перегреву компонента ($t_{кМС}$, $t_{кЭРЭ}$).

После выполнения каждого этапа результаты расчета выводятся на печать.

Программа позволяет проводить расчет в режиме естественного охлаждения. Если в результате расчета окажется, что температура поверхности корпуса компонента больше допустимой ($t_{МС(ЭРЭ)} \geq t_{доп}$), то естественное охлаждение не обеспечивает нормальный тепловой режим блока (прибора) и в этом случае необходимо применить принудительное охлаждение блока (прибора).

Входные данные

Исходные данные для расчета температуры кожуха блока (I этап)

t — максимальная температура окружающей среды (из ТЗ);

H_1 — давление окружающей среды (из ТЗ, при отсутствии данных в ТЗ берется нормальное атмосферное давление $1,013 \cdot 10^5$ Па), Па;

L_1, L_2, L_3 — длина, ширина, высота блока из сборочного чертежа, м;

K_n — коэффициент перфорации кожуха блока $0 \leq K_n \leq 1$; для блока без кожуха рассчитывается как отношение площади, свободной для прохождения охлаждающего воздуха, к площади стороны условного параллелепипеда, перпендикулярно к которой осуществляется обдув; для блока с кожухом (прибора) рассчитывается на основании рабочего чертежа поддона или крышки как отношение суммарной площади вентиляционных отверстий к площади крышки или поддона;

ϵ_i — степень черноты кожуха блока, $0 < \epsilon_i < 1$ (табл. 4.9), i — в, н, б — верхняя, нижняя, боковая поверхности кожуха; при отсутствии кожуха охлаждение лучеиспусканием происходит с поверхностей ПП, направляющих, монтажной панели; в этом случае усредненно можно принять $\epsilon_i = 0,5$;

P_0 — мощность, выделяющаяся в блоке (сначала рассчитывают рассеиваемую мощность для наиболее теплонагруженного модуля первого уровня; мощность, рассеиваемую в модуле, ориентировочно можно получить суммированием мощностей комплектующих модуль компонентов; мощность, рассеиваемую в блоке (приборе), определяют перемножением числа модулей на мощность, рассеиваемую одним модулем), Вт.

Программа обеспечивает расчет теплового режима при естественной конвекции, если удельная мощность удовлетворяет следующим условиям:

$$\frac{P_0}{[L_1 L_2 + L_3(L_1 + L_2)]} \leq 600 \text{ Вт/м}^2.$$

Исходные данные для расчета температуры нагретой зоны (II этап)

l_1, l_2, l_3 — длина, ширина, высота нагретой зоны (рис. 4.9), м;

$h_{пн}$ — воздушный зазор между нагретой зоной и нижней поверхностью кожуха (из сборочного чертежа), при отсутствии кожуха $h_{пн} = 0$ м;

H_2 — давление внутри блока (из ТЗ, при отсутствии данных в ТЗ берется нормальное атмосферное давление $1,013 \cdot 10^5$ Па), Па;

$\epsilon_{пр i}$ — приведенная степень черноты, $0 < \epsilon_{пр} < 1$ для большинства конструкций $\epsilon_{пр} \approx 0,5$; i — в, н, б — верхняя, нижняя, боковая поверхности нагретой зоны;

S_{λ} — площадь контакта рамки модуля платы (при отсутствии рамки теплоотком может служить каркас), $S_{\lambda} \geq 0$ (из сборочного чертежа), м²;

P — усилие прижима модуля к кожуху, Па, $P \geq 0$; если $P \neq 0$, то вводится признак материала рамки модуля (1 — сплав алюминия, 2 — сплав меди);

$P_{ок}$ — мощность, рассеиваемая элементами, установленными на несущую конструкцию; при отсутствии таких элементов $P_{ок} = 0$, Вт;

C_v — производительность вентилятора при внутреннем перемешивании воздуха, кг/с; если вентилятора нет, то $C_v = 0$;

$N2$ — номер конструктивного исполнения блока (1, 2 или 3, см. табл. 4.8).

Исходные данные для расчета температуры МС или РЭА

(III этап)

$Q_э$ — мощность компонента [7], Вт;

$S_э$ — суммарная площадь поверхности компонента и радиатора из рабочего чертежа, при отсутствии радиатора учитывается площадь компонента, м²;

$S_{эо}$ — площадь основания компонента [7], м²;

$\delta_э$ — зазор между основанием компонента и ПП (из сборочного чертежа), м;

$\lambda_э$ — коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между основанием компонента и ПП (см. табл. 4.11), Вт/(м·К);

$r_{кп}$ — расстояние от центра компонента до края ПП (рис. 4.9, анализируемый компонент берется в центре платы), м;

$\delta_{п}$ — толщина ПП (рис. 4.9 и рабочий чертеж платы), м;

λ — коэффициент теплопроводности платы (табл. 4.11), Вт/(м·К);

t_x, t_y — шаг установки компонентов (рис. 4.9 и сборочный чертеж), м;

N — число компонентов, влияющих на тепловой режим анализируемого компонента (при расчете учитывать только соседние компоненты, т. е. расположенные не далее $r_{пр}$ от рассчитываемого;

берется на основании сборочного чертежа); для каждого i -го компонента ($i=1, N$), влияющего на тепловой режим анализируемого компонента ($i=0$), вводятся следующие данные:

r_i — расстояние между геометрическими центрами анализируемого и i -го компонента ($r_i < r_{пр}$), м;

$Q_{эi}$ — мощность, рассеиваемая i -м компонентом, Вт;

$r_{кпi}$ — расстояние от центра i -го компонента до края ПП (из рабочего чертежа), м.

Если способ установки или размеры i -го компонента отличаются от способа установки или размеров ($i-1$) компонента, то вводятся дополнительно $S_{эi}$, $S_{эoi}$, $\delta_{эi}$, $\lambda_{эi}$, где:

$S_{эi}$ — площадь всей поверхности i -го компонента [7] и радиатора (из рабочего чертежа), м²;

$S_{эoi}$ — площадь основания i -го компонента [7], м²;

$\delta_{эi}$ — зазор между основанием i -го компонента и ПП (из сборочного чертежа), м;

$\lambda_{эi}$ — коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между основанием i -го компонента и ПП (табл. 4.11), Вт/(м·К).

Описание логической структуры

Логическая структура программы может быть представлена в виде схемы алгоритма, представленного на рис. 5.7.

Контрольный пример. Однорядовый электронный блок имеет негерметичное исполнение с кожухом (3-й тип). Кожух блока перфорирован в крышке и поддоне. Конструкционный материал кожуха листовой Д16 толщиной 1 мм, окраска эмалью. Расположение компонентов — одностороннее. Определить температуру кожуха блока (прибора), НЗ, поверхности ИС.

Исходные значения параметров для расчета теплового режима вводятся с клавиатуры дисплея в диалоговом режиме и для данного конструктивного исполнения блока указаны в распечатке результатов работы программы на ЭВМ.

***** РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА *****

ВВЕДИТЕ ТЕМПЕРАТУРУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ [ГРАД. С] 24

ДАВЛЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ [ПА]

< ОТ 0.1 ПА ДО 1.013E5 ПА > 1000000

ДЛИНУ, ШИРИНУ, ВЫСОТУ БЛОКА [М]. 194..094.319

ВВЕДИТЕ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРФОРАЦИИ КОЖУХА БЛОКА .25

ЕСЛИ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ КОЖУХА БЛОКА ОДИНАКОВА У ВСЕХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОЖУХА, ТО ВВЕДИТЕ ЕЕ, А ЕСЛИ ОНА РАЗЛИЧНА, ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ.92

ЗАДАЙТЕ МОЩНОСТЬ, ВЫДЕЛЯЮЩУЮСЯ В БЛОКЕ [ВТ] 45

***** РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВА КОЖУХА *****

РЕЖИМ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БЛОКА — ЛАМИНАРНЫЙ <1/4 СТЕПЕНИ>

РЕЖИМ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ БЛОКА — ТУРБУЛЕНТНЫЙ <1/3 СТЕПЕНИ>

ПЕРЕГРЕВ КОЖУХА БЛОКА = 16.20731 ГРАД. С

ТЕМПЕРАТУРА КОЖУХА БЛОКА = 40.20731 ГРАД. С

ВВЕДИТЕ ДЛИНУ, ШИРИНУ И ВЫСОТУ НАГРЕТОЙ ЗОНЫ БЛОКА [М]
.17,068,205

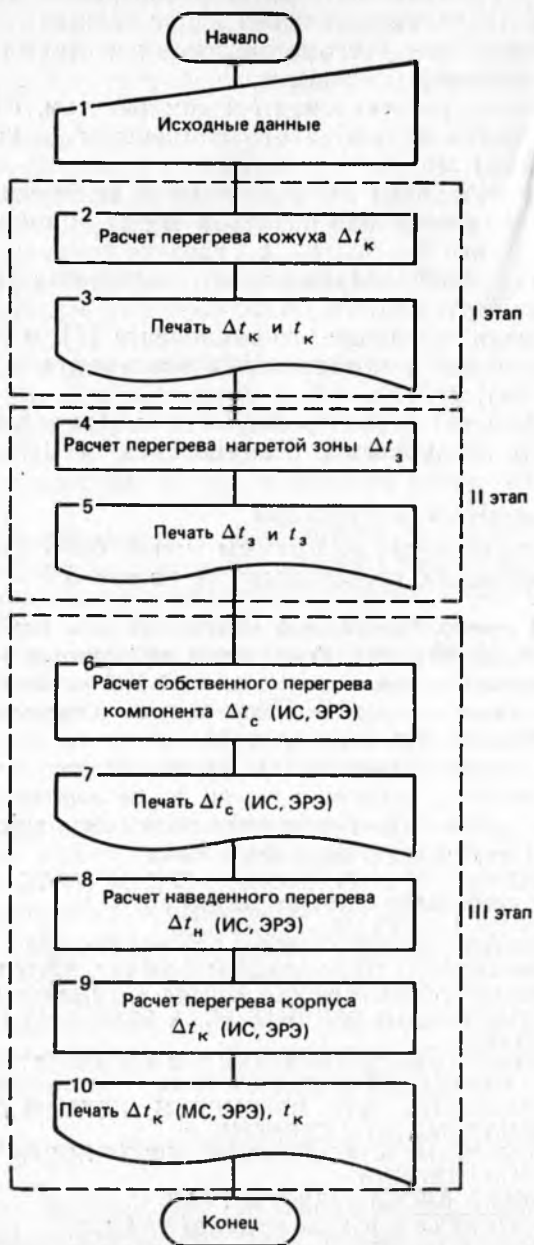


Рис. 5.7. Схема алгоритма расчета теплового режима блока РЭА

ВВЕДИТЕ ВЕЛИЧИНУ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ НАГРЕТОЙ ЗОНОЙ И НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КОЖУХА [М] .057

ВВЕДИТЕ ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ БЛОКА [ПА]

<ОТ 0.1 ПА ДО 1.013E5 ПА> 100000

ЕСЛИ ПРИВЕДЕННАЯ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ ОДИНАКОВА У ВСЕХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ТО ВВЕДИТЕ ЕЕ, А ЕСЛИ ОНА РАЗЛИЧНА, ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ .5

ВВЕДИТЕ ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА РАМКИ МОДУЛЯ С КОЖУХОМ [М*М] 0

ВВЕДИТЕ УСИЛИЕ ПРИЖИМА МОДУЛЯ К КОЖУХУ [ПА] 0

ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ, РАССЕИВАЕМУЮ КОМПОНЕНТАМИ, УСТАНОВЛЕННЫМИ НЕПОСРЕДСТВЕННО НА КОЖУХ [ВТ], ЕСЛИ ТАКИХ НЕТ, ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ 0

ВВЕДИТЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ВОЗДУХА [КГ/С], ЕСЛИ ВЕНТИЛЯТОРА НЕТ, ТО ВВЕДИТЕ НОЛЬ 0

ВВЕДИТЕ НОМЕР КОНСТРУКЦИИ БЛОКА <1, 2 или 3> 1

ВВЕДИТЕ 0 — ЕСЛИ ВСЕ ДАННЫЕ 2-ГО ЭТАПА ВВЕДЕНА БЕЗ ОШИБОК ИЛИ

1 — ЕСЛИ ТРЕБУЕТСЯ ПОВТОРИТЬ ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ 0

***** РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВА НАГРЕТОЙ ЗОНЫ БЛОКА *****

ПЕРЕГРЕВ НАГРЕТОЙ ЗОНЫ БЛОКА = 42.22387 ГРАД.

ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕТОЙ ЗОНЫ = 66.22387 ГРАД. С

СРЕДНЕОБЪЕМНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ВОЗДУХА = 29.21559 ГРАД.

ВВЕДИТЕ 1 — ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ КОМПОНЕНТА

0 — ДЛЯ ОКОНЧАНИЯ РАСЧЕТА 1

ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ КОМПОНЕНТА [ВТ] 1.25

ВВЕДИТЕ СУММАРНУЮ ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ КОМПОНЕНТА И ЕГО РАДИАТОРА [М*М] .0022

ВВЕДИТЕ ПЛОЩАДЬ ОСНОВАНИЯ КОМПОНЕНТА [М*М] .000864

ТОЛЩИНУ ЗАЗОРА МЕЖДУ ОСНОВАНИЕМ КОМПОНЕНТА И ПЕЧАТНОЙ ПЛАТОЙ [М] .0001

ВВЕДИТЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МАТЕРИАЛА, ЗАПОЛНЯЮЩЕГО ЭТОТ ЗАЗОР [ВТ/(<М*К>)] 0.1

ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЦЕНТРА КОМПОНЕНТА ДО КРАЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ [М] .02

ВВЕДИТЕ ТОЛЩИНУ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ [М] .0015

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЛАТЫ [ВТ/(<М*К>)] 3

ВВЕДИТЕ 1 — ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ РАСПОЛОЖЕНИИ КОМПОНЕНТОВ В МОДУЛЕ

2 — ПРИ ДВУСТОРОННЕМ РАСПОЛОЖЕНИИ КОМПОНЕНТОВ 1

ВВЕДИТЕ ШАГ УСТАНОВКИ КОМПОНЕНТОВ ПО ОСИ X И Y [М] 0.39, 0.47

ВВЕДИТЕ 0 — ЕСЛИ ВСЕ ДАННЫЕ 3-ГО ЭТАПА ВВЕДЕНА БЕЗ ОШИБОК ИЛИ

1 — ЕСЛИ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ТРЕБУЕТСЯ ВВЕСТИ ЗАНОВО 0

ПРЕДЕЛЬНЫЙ РАДИУС ВЗАИМНОГО ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ = 3.084357E-1 М

ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ТЕПЛОТЫДЕЛЯЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НЕ ДАЛЕЕ ЧЕМ 3.084357E-1 М ОТ РАССЧИТЫВАЕМОГО КОМПОНЕНТА, Т. Е. ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ЕГО ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ 1

ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЦЕНТРАМИ РАССЧИТЫВАЕМОГО КОМПОНЕНТА И 1 ТЕПЛОТЫДЕЛЯЮЩИМ КОМПОНЕНТОМ [М] .03

СЛЕДУЮЩИЕ ЗАПРОСЫ ОТНОСЯТСЯ К ТЕПЛОТЫДЕЛЯЮЩЕМУ КОМПОНЕНТУ, ВЛИЯЮЩЕМУ НА ТЕПЛ. РЕЖИМ РАССЧИТЫВАЕМОГО КОМПОНЕНТА

ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЦЕНТРА КОМПОНЕНТА ДО КРАЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ [М]

$\varnothing 2$

ОТЛИЧАЮТСЯ ЛИ РАЗМЕРЫ ИЛИ СПОСОБ УСТАНОВКИ КОМПОНЕНТА № 1 ОТ РАЗМЕРОВ ИЛИ СПОСОБА УСТАНОВКИ РАССЧИТЫВАЕМОГО КОМПОНЕНТА № $\varnothing < 1 - \text{ДА} / 0 \text{ НЕТ} > \varnothing$

ТРЕБУЕТСЯ ЛИ ПОВТОРИТЬ ВВОД ПОСЛЕДНЕЙ ГРУППЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ $< \varnothing - \text{НЕТ} / 1 - \text{ДА} > \varnothing$

***** РАСЧЕТ ПЕРЕГРЕВА КОРПУСА КОМПОНЕНТА *****

ПЕРЕГРЕВ КОРПУСА РАССЧИТЫВАЕМОГО КОМПОНЕНТА = 73.21 $\varnothing 56$

ГРАД.

ТЕМПЕРАТУРА КОРПУСА КОМПОНЕНТА = 97.21 $\varnothing 68$

ГРАД. С

ВВЕДИТЕ 1 — ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА КОМПОНЕНТА

\varnothing — ДЛЯ ОКОНЧАНИЯ РАСЧЕТА \varnothing

Анализ результатов расчета. Температура корпуса микросхемы 97,2°C. Аппаратура разрабатывается с использованием 155-й серии. По ТУ допустимая температура корпуса ИС этой серии равна 70°C.

Выводы. Необходимо использовать принудительную систему охлаждения. Если допустимая температура корпуса микросхемы окажется выше 70°C на 20 % (погрешность методики расчета), то можно рекомендовать естественную систему охлаждения.

Программа расчета на механические воздействия конструкций РЭА

Функциональное назначение

Программа предназначена для расчета блоков РЭА на механические воздействия. Программа позволяет сделать следующие расчеты:

- собственной частоты колебаний балки;
- собственной частоты колебаний платы;
- виброперемещения основания;
- максимального виброускорения платы и максимального прогиба платы;

на ударные воздействия (определение ударного ускорения и максимального относительного перемещения).

Программа позволяет проводить все виды расчетов при различных способах закрепления сторон платы. Введены следующие коды, определяющие закрепления сторон платы:

- 0 — если сторона платы свободна;
- 1 — если сторона платы оперта;
- 2 — если сторона платы закреплена;
- 4 — если плата закреплена в четырех точках.

После проведения каждого из расчетов результаты выводятся на печать. Анализ результатов расчета вибропрочности сводится к следующему:

для микросхем, транзисторов, резисторов амплитуда виброускорения должна быть меньше допустимых ускорений $a_{\text{доп}}$ (опреде-

ляются в процессе анализа элементной базы):

$$a_{в\max} < a_{доп};$$

для элементов РЭА типа пластин стрела прогиба $\delta_{в}$ на расстоянии l не должна превышать $\delta_{доп}$, где $\delta_{доп}$ — допустимая величина стрелы прогиба на длине 1 м (см. табл. 4.17):

$$\delta_{в} < \delta_{доп} l^2 = \delta_1;$$

для ПП с ЭРЭ должно выполняться условие

$$\delta_{в} < 0,003b,$$

где b — размер стороны ПП, параллельно которой устанавливаются элементы.

Если условия вибропрочности не выполняются, необходимо изменить конструкцию РЭА, увеличивая жесткость несущих элементов, либо применить амортизаторы.

Анализ результатов расчета ударопрочности сводится к следующему:

для ЭРЭ ударное ускорение $a_{у}$ должно быть меньше допустимых ускорений $a_{у,доп}$, определяемых из табл. 3.3:

$$a_{у} < a_{у,доп};$$

для элементов РЭА типа пластин максимальное относительное перемещение $z_{\max} < \delta_{доп} l^2$, где $\delta_{доп}$ — определяется из табл. 4.17;

для ПП с элементами $z_{\max} < 0,003b$, где b — размер стороны ПП, параллельно которой устанавливаются ЭРЭ;

для амортизированных систем $z_{\max} < z_{св}$, где $z_{св}$ — свободный ход амортизатора.

Входные данные

Исходные данные для расчета собственной частоты колебаний балки:

l — длина пролета балки (из сборочного чертежа), м;

E — модуль упругости балки [25], Па;

J — момент инерции балки (из расчета), м⁴;

m' — приведенная погонная масса (из расчета), кг/м;

Z5 — код закрепления балки (из сборочного чертежа).

Исходные данные для расчета собственной частоты колебаний платы:

a , b , h — длина большей, меньшей стороны платы, толщина платы (из сборочного чертежа), м;

E — модуль упругости платы (табл. 4.16), Па;

γ — коэффициент Пуассона [25];

KZ_1 , KZ_2 , KZ_3 , KZ_4 — коды закрепления сторон платы (из сборочного чертежа);

m — сосредоточенная в центре масса (из ТЗ и сборочного чертежа), кг;

m_1 — масса платы с элементами (на основании ТЗ и сборочно-го чертежа), кг.

Исходные данные для расчета виброперемещения основания платы:

f_n — минимальная частота внешнего воздействия (из ТЗ), Гц;
 f_v — максимальная частота внешнего воздействия (из ТЗ), Гц;
 Δf — требуемый при расчете шаг изменения частоты (из ТЗ), Гц;
 $P4$ — вид возбуждения: силовое или кинематическое (из ТЗ);
 n_0 — амплитуда возмущающего виброускорения (из ТЗ), g.

Исходные данные для расчета максимального виброускорения и максимального прогиба платы:

ε — показатель затухания, $0 < \varepsilon < 1$;
 x, y — координаты точки, в которой требуется произвести расчет виброускорения и виброперемещения (из ТЗ и сборочного чертежа), м;
 $P4$ — вид возбуждения; силовое или кинематическое (из ТЗ).

Исходные данные для расчета на ударные воздействия:

$P5$ — форма ударного импульса: прямоугольная или полусинусоидальная (из ТЗ);
 τ_y — длительность ударного импульса (из ТЗ), с;
 H_y — амплитуда ускорения ударного импульса (из ТЗ), g.

Описание логической структуры

Схема алгоритма расчета блоков РЭА на механические воздействия (рис. 5.8) позволяет проследить структуру, взаимосвязь и последовательность основных расчетов программы. На основании алгоритма составлена программа.

Расчет производится для пластины или балки. При расчете пластины с учетом вида нагрузки (равномерная или сосредоточенная), вида возбуждения колебаний (кинематическое или силовое) возможен расчет четырех основных вариантов. Варианты соответствующим образом кодируются. Перечень кодированных вариантов представлен в табл. 5.2.

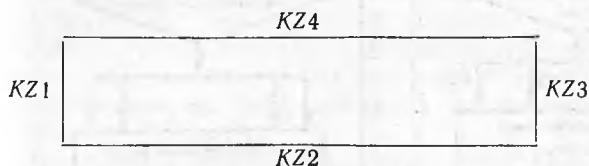
Контрольный пример

***** РАСЧЕТ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ *****
ВВЕДИТЕ \emptyset — ДЛЯ РАСЧЕТА СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПЛАСТИНЫ
1 — ДЛЯ РАСЧЕТА СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ БАЛКИ ζ
ВВЕДИТЕ ДЛИНУ БОЛЬШЕЙ СТОРОНЫ ПЛАТЫ = A [M].2
ДЛИНУ МЕНЬШЕЙ СТОРОНЫ ПЛАТЫ = B [M].15
ТОЛЩИНУ ПЛАТЫ [M]. $\emptyset\emptyset$
МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ПЛАТЫ [ПА] $3\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$
КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА .22
ВВЕДИТЕ 1 — ЕСЛИ ИМЕЕТСЯ СОСРЕДОТОЧЕННАЯ В ЦЕНТРЕ МАССА

Таблица 5.2. Перечень кодируемых вариантов

Пластина — П			Балка — Б	
Вид возбуждения	№	Равномерная нагрузка — Р	№	Сосредоточенная в центре масса — С
Кинематическое — К	1	ПРК	3	ПСК
Силовое — С	2	ПРС	4	ПСС

Ø — ЕСЛИ НАГРУЗКА РАСПРЕДЕЛЕНА РАВНОМЕРНО Ø
ВВЕДИТЕ МАССУ ПЛАТЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ [КГ] 4



ВВЕДИТЕ КОДЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ СТОРОН ПЛАТЫ ПО СХЕМЕ КОД ЗАКРЕПЛЕНИЯ РАВЕН

- Ø — ЕСЛИ СТОРОНА ПЛАТЫ СВОБОДНА
- 1 — ЕСЛИ СТОРОНА ПЛАТЫ ОПЕРТА ИЛИ
- 2 — ЕСЛИ ОНА ЗАЩЕМЛЕНА

ЕСЛИ ПЛАСТИНА ЗАКРЕПЛЕНА В ЧЕТЫРЕХ ТОЧКАХ, ТО ВВЕДИТЕ ЗНАЧЕНИЕ KZ1 РАВНОЕ ЧЕТЫРЕМ (KZ1=4)

KZ1=Ø

KZ2=2

KZ3=Ø

KZ4=2

СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ ПЛАТЫ=198.6654 Гц

***** РАСЧЕТ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ *****

ВВЕДИТЕ 1 — ПРИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЕ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА

2 — ПРИ ПОЛУСИНОСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЕ ИМПУЛЬСА

Ø — ДЛЯ ОКОНЧАНИЯ РАСЧЕТОВ НА УДАР 1

ВВЕДИТЕ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА [С] 1

ВВЕДИТЕ АМПЛИТУДУ УСКОРЕНИЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА [G] 2Ø

УДАРНОЕ УСКОРЕНИЕ=39.51985 G

МАКСИМАЛЬНОЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ=.96Ø3642E-1 ММ

Программа расчета экранирования в РЭА

Функциональное назначение

Программа предназначена для расчета защищенности от воздействий магнитостатического, электромагнитного, электростатического полей при решении задач анализа и синтеза.

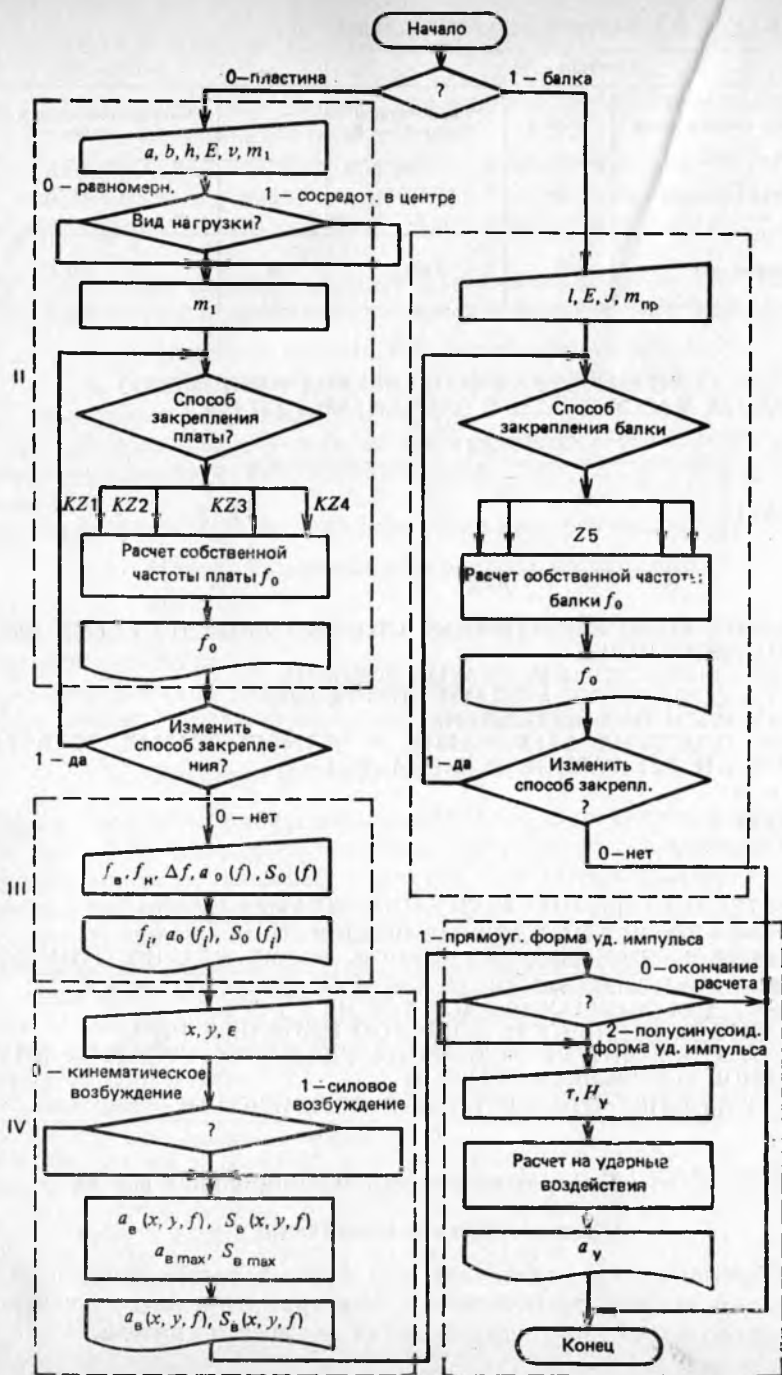


Рис. 5.8. Схема алгоритма расчета на механические воздействия конструкций РЭА

При решении задачи **анализа** на практике обычно пользуются величиной эффективности экранирования \mathcal{E} . Задача **синтеза** непосредственно связана с расчетом толщины стенок экрана и определением экранирующего эффекта.

Существуют расчетные формулы для определения эффективности магнитостатического, электромагнитного экранирования экранов цилиндрической (рис. 4.5,б), сферической (рис. 4.5,в) и прямоугольной формы (рис. 4.5,а) из различных материалов (табл. 4.4), а также электростатического экранирования.

Расчет электромагнитного экранирования проводится в дальней ($l > \lambda/2\pi$) и ближней ($l < \lambda/2\pi$) зонах, где l — расстояние между источником и приемником помехи; λ — минимальная длина волны помехи. Исходными данными при расчете экранов от воздействий электромагнитных помех являются:

- конструкция экранируемого изделия;
- спектр частот помехи f_i и соответствующие величины напряженности электрического $E(f_i)$ или магнитного $H(f_i)$ полей;
- эффективность экранирования (ослабление электрического и магнитного \mathcal{E}_n полей).

Программа позволяет оценить ослабление внешнего поля (подпрограмма АНАЛИЗ) либо определить толщину и материал экрана (подпрограмма СИНТЕЗ).

Входные данные

Исходные данные для расчета магнитостатического экранирования

- I — анализ экрана
- μ_r — относительная магнитная проницаемость материала экрана, $1 < \mu_r < 1000$ (табл. 4.4);
- d — толщина стенки экрана (рабочий чертеж экрана), м;
- 1 — цилиндрическая форма экрана (рис. 4.5,б);
- r_2 — внешний радиус цилиндрического экрана, м;
- 2 — сферическая форма экрана (рис. 4.5,в);
- r — внешний радиус сферического экрана, м;
- 3 — прямоугольная форма экрана (рис. 4.5,а);
- a_2 — внешний размер экрана, $a_2 > 2d$, м.

II — синтез экрана

\mathcal{E}_T — требуемая эффективность экранирования, $1000 > \mathcal{E}_T > 0$, дБ;

- μ_r — относительная магнитная проницаемость материала экрана, $1 < \mu_r < 1000$ (табл. 4.4);
- 1 — цилиндрическая форма экрана (рис. 4.5,б);
- r_2 — внешний радиус цилиндрического экрана, м;
- 2 — сферическая форма экрана (рис. 4.5,в);
- r — внешний радиус сферического экрана, м;
- 3 — прямоугольная форма экрана (рис. 4.5,а);

a_2 — внешний размер экрана, $a_2 > 2d$, м.

Исходные данные для расчета электростатического экранирования

I — анализ экрана

μ_r, d, σ ;

σ — удельная проводимость материала экрана, $0 < \sigma < 10^{-7}$ (табл. 4.4), См/м.

II — синтез экрана

$\mathcal{E}_T, \mu_r, \sigma$.

Исходные данные для расчета электромагнитного экранирования

I — анализ экрана

μ_r — относительная магнитная проницаемость материала экрана, $1 < \mu_r < 10000$ (табл. 4.4);

d — толщина стенки экрана (рабочий чертеж), м;

l — расстояние между источником и приемником помехи (ТЗ), м;

λ — длина волны помехи ($\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$, где f — максимальная частота экранируемой помехи), м;

f_Φ — фиксированная частота электромагнитного поля помехи, $0 < f_\Phi < 10^9$, Гц;

f_1, f_2 — нижняя и верхняя граница диапазона частот помехи, Гц.

1 — Расчет в дальней зоне:

1 — при сплошном экране; 2 — при перфорированном экране;

σ — удельная проводимость материала экрана, $0 < \sigma < 10^{-7}$ (табл. 4.4), См/м (1 — при сплошном экране; 2 — при перфорированном экране);

D — диаметр вентиляционного перфорированного отверстия либо максимальный размер перфорированного отверстия прямоугольной формы, либо типа «жалюзи», $0 < D_m < \lambda/2$ (D_m — максимальный размер отверстия в экране под элементы индикации, управления, контроля), м;

a — расстояние между центрами отверстий, $a > d$, м;

2 — Расчет в ближней зоне:

1 — при сплошном экране; 2 — при перфорированном экране;

$\sigma, D, D_m, a, f_\Phi$ (f_1 или f_2);

1 — при экранировании электрической составляющей; 2 — при экранировании магнитной составляющей;

1 — цилиндрическая форма экрана — r_2 ;

2 — сферическая форма экрана — r ;

3 — плоская форма экрана — a_1 .

II — синтез экрана

$\mathcal{E}_T, \mu_r, l, \lambda$.

1 — Расчет в дальней зоне:

$\sigma, D, D_m, a, f_\Phi$, (f_1 или f_2).

2 — Расчет в ближней зоне:

1 — при сплошном экране; 2 — при перфорированном экране;

I. Магнитостатическое экранирование — (М)

Форма экрана	№	Анализ—А	№	Синтез—С
Цилиндрическая—ц	1.	(М), А ^ц	4.	(М), С ^ц
Сферическая—сф	2.	(М), А ^{сф}	5.	(М), С ^{сф}
Прямоугольная—пр	3.	(М), А ^{пр}	6.	(М), С ^{пр}

II. Электростатическое экранирование 2 (ЭС)

Анализ—А	7.	ЭС, А
Синтез—С	8.	ЭС, С

III. Электромагнитное экранирование — (ЭМ)

В дальней зоне—Д;		Анализ—А			
№	при сплошном—с экране	№	при перфорированном—пф экране		
9.	(ЭМ), А, Д, с	10.	(ЭМ), А, Д, пф		
Вид составляющей	В ближней зоне—Б;		Анализ—А		
	№	при перфорированном экране—пф	Форма экрана	№	при сплошном экране—с
Магнитная	14.	(ЭМ), А, Б, пф _М ^ц	цилиндрическая—ц	11.	(ЭМ), А, Б, с _М ^ц
	15.	(ЭМ), А, Б, пф _М ^{сф}	сферическая—сф	12.	(ЭМ), А, Б, с _М ^{сф}
	16.	(ЭМ), А, Б, пф _М ^{пл}	плоская—пл	13.	(ЭМ), А, Б, с _М ^{пл}
Электростатическая	20.	(ЭМ), А, Б, пр _{Эл} ^ц	цилиндрическая—ц	17.	(ЭМ), А, Б, с _{Эл} ^ц
	21.	(ЭМ), А, Б, пф _{Эл} ^{сф}	сферическая—сф	18.	(ЭМ), А, Б, с _{Эл} ^{сф}
	22.	(ЭМ), А, Б, пф _{Эл} ^{пл}	плоская—пл	19.	(ЭМ), А, Б, с _{Эл} ^{пл}

III. Электромагнитное экранирование — (ЭМ)

В дальней зоне—Д;		Синтез—С	
№	При сплошном экране—с	№	При перфорированном экране—пф
23.	(ЭМ), С, Д, с	24.	(ЭМ), С, Д, пф

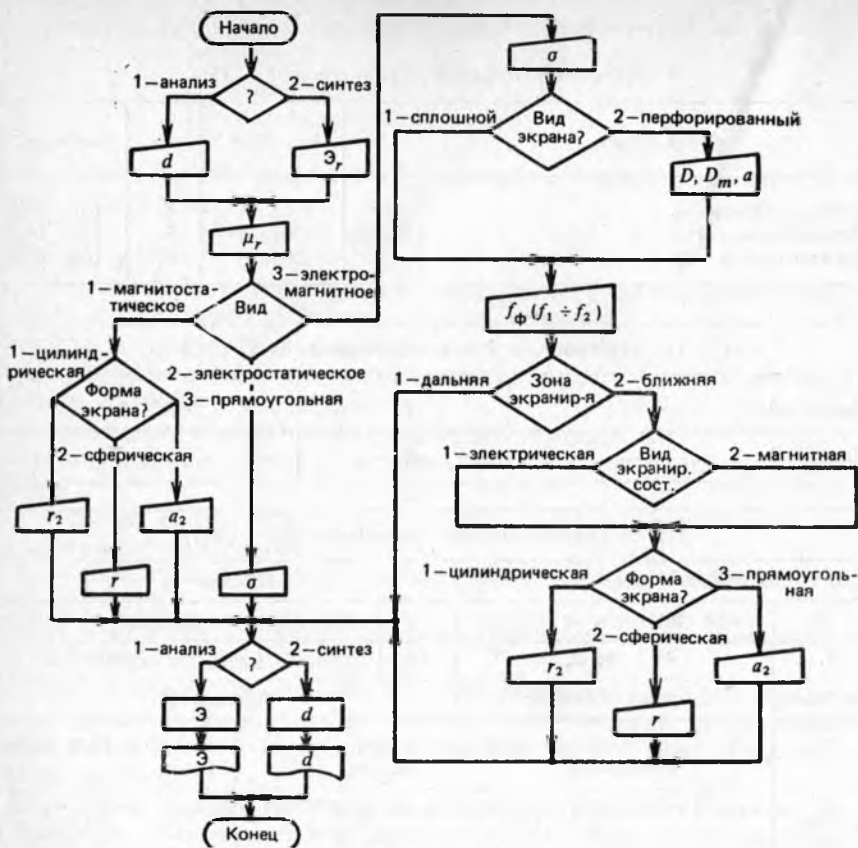


Рис. 5.9. Схема алгоритма расчета экранирования в РЭА

Окончание табл. 5.3

В ближней зоне—Б;			Синтез—С		
Вид составляющей	Форма экрана	№	При сплошном экране—с	№	При перфорированном экране—пф
Магнитная	цилиндрическая—ц	25.	(ЭМ), С, Б, $c_M^ц$	28.	(ЭМ), С, Б, пф $_M^ц$
	сферическая—сф	26.	(ЭМ), С, Б, $c_M^{сф}$	29.	(ЭМ), С, Б, пф $_M^{сф}$
	плоская—пл	27.	(ЭМ), С, Б, $c_M^{пл}$	30.	(ЭМ), С, Б, пф $_M^{пл}$
Электрическая	цилиндрическая—ц	31.	(ЭМ), С, Б, $c_{ЭЛ}^ц$	34.	(ЭМ), С, Б, пф $_{ЭЛ}^ц$
	сферическая—сф	32.	(ЭМ), С, Б, $c_{ЭЛ}^{сф}$	35.	(ЭМ), С, Б, пф $_{ЭЛ}^{сф}$
	плоская—пл	33.	(ЭМ), С, Б, $c_{ЭЛ}^{пл}$	36.	(ЭМ), С, Б, пф $_{ЭЛ}^{пл}$

$\sigma, D, D_m, a, f_{\Phi}, (f_1 \text{ или } f_2);$

1 — при экранировании электрической составляющей; 2 — при экранировании магнитной составляющей;

1 — цилиндрическая форма экрана — r_2 ;

2 — сферическая форма экрана — r ;

3 — плоская форма экрана — a_1 .

Описание логической структуры

Алгоритм расчета экранирования в РЭА представлен на рис. 5.9. На основании алгоритма разработана программа [28]. В зависимости от задачи (анализ или синтез), вида экранирования, конструкции экрана (с учетом формы, сплошной, перфорированный), расстояния до экрана (дальняя, ближняя зона) возможен расчет 36 различных вариантов. Варианты соответствующим образом кодируются. Перечень кодированных вариантов представлен в табл. 5.3.

Контрольные примеры

1. Пример расчета магнитоэлектрического экранирования

Определить эффективность экранирования прибора с размерами кожуха $100 \times 200 \times 300$ мм³, толщиной стенки кожуха $d=0,8$ мм. Материал кожуха — пермаллой с $\mu_r=5000$ (при проведении расчета берется размер кожуха экрана в направлении поля помехи).

Исходными данными для расчета являются:

вид экранирования — магнитоэлектрический — код 1 (имеет место три вида экранирования: магнитоэлектрический — код 1, электростатический — код 2, электромагнитный — код 3);

тип решаемой задачи — анализ — код 1 (при решении задачи синтеза — код 2);

относительная магнитная проницаемость $\mu_r=5000$;

толщина стенки экрана $d=0,0008$ м;

форма экрана прямоугольная — код 3 (имеется три формы экрана: цилиндрическая — код 1, сферическая — код 2, прямоугольная — код 3);

внешний размер кожуха экрана — 0,1 м, направление магнитного поля вдоль стороны 100 мм.

Результаты расчета выводятся на печать в виде эффективности экранирования Θ в децибелах.

***** РАСЧЕТ ЭКРАНИРОВАНИЯ *****

ВВЕДИТЕ 1 — ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

2 — ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

3 — ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

1

ВВЕДИТЕ КОД ТРЕБУЕМОЙ ФУНКЦИИ: 1 — АНАЛИЗ ЭКРАНА

2 — СИНТЕЗ ЭКРАНА

1

ВВЕДИТЕ ОТНОСИТЕЛЬНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МАТЕ-
РИАЛА ЭКРАНА МЮ $P=5\emptyset\emptyset\emptyset$

ВВЕДИТЕ ТОЛЩИНУ СТЕНКИ ЭКРАНА [М] $\emptyset\emptyset\emptyset\emptyset$

***** РАСЧЕТ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ *****

ВВЕДИТЕ 1 — ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЕ ЭКРАНА

2 — ПРИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЕ ЭКРАНА

3 — ПРИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЕ ЭКРАНА

3

ЗАДАЙТЕ ВНЕШНИЙ РАЗМЕР ЭКРАНА [М]

.1

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ 38.13189 ДБ

Анализ расчетных данных. Помеха в наибольшей степени влияет на входные цепи схемы. Для линейных схем величина помехи не должна превышать ее чувствительности, для импульсных схем — порога срабатывания. Прежде чем решать вопрос о введении в конструкцию блока (прибора) экрана, необходимо оценить реальную помеху. Если ее величина окажется больше допустимой, принимается решение об ослаблении в 10, ... 100, ..., 1000 и далее раз соответственно 20, ... 40, ... 60 дБ и т. д. Например, если значение помехи 100 мкВ, то ослабление в 38,1 дБ снизит ее значение до 1 мкВ, что вполне достаточно для РЭА 1-го класса.

Выводы. Чтобы судить о правильности выполненного экранирования, необходимы дополнительные данные — значения помехи на входных проводах и чувствительности экранируемого блока (прибора).

2. *Пример расчета электростатического экранирования*

Определить толщину стенки кожуха-экрана с заданной эффективностью экранирования $\mathcal{E}_r=120$ дБ. Материал кожуха — сталь с $\mu_r=150$ и $\sigma=0,66 \times 10^{-7}$ См/с.

Исходными данными для расчета являются:

вид экранирования — электростатический — код 2;

тип решаемой задачи — синтез — код 2;

требуемая эффективность экранирования $\mathcal{E}_r=120$ дБ;

относительная магнитная проницаемость $\mu_r=150$;

удельная проводимость материала экрана $\sigma=0,66 \cdot 10^{-7}$ См/м.

Результаты расчета выводятся на печать в виде толщины стенки экрана в метрах.

***** РАСЧЕТ ЭКРАНИРОВАНИЯ *****

ВВЕДИТЕ 1 — ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

2 — ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

3 — ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

2

ВВЕДИТЕ КОД ТРЕБУЕМОЙ ФУНКЦИИ: 1 — АНАЛИЗ ЭКРАНА

2

2 — СИНТЕЗ ЭКРАНА 2

ЗАДАЙТЕ ТРЕБУЕМУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ [ДБ]

120

ВВЕДИТЕ ОТНОСИТЕЛЬНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

МАТЕРИАЛА ЭКРАНА МЮ $P=15\emptyset$

***** РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ *****

ЗАДАЙТЕ УДЕЛЬНУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ЭКРАНА [\langle СИМ/ М $\rangle \cdot 1E-7$]

.66

ТОЛЩИНА ЭКРАНА НЕ МЕНЕЕ $.8\emptyset3811E-3$ М

Результаты расчета выводятся на печать в виде эффективности экранирования Э в децибелах на разных частотах. Анализ расчетных данных позволяет судить об эффективности экранирования в заданном частотном диапазоне.

Представленные программы по конструкторским расчетам находятся в Фонде учебных программ МВТУ им. Н. Э. Баумана.

5.3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ САПР В КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Общее представление и обоснование необходимости использования САПР при проектировании РЭА. САПР — наилучшая форма организации процесса проектирования, основными частями которой являются технические средства, общее и специальное программное и математическое обеспечения, информационное обеспечение — банк данных, справочные каталоги, значения параметров, сведения о типовых решениях [26]. Неотъемлемой частью САПР являются лингвистическое и методическое обеспечение. САПР — автоматизированная, а не автоматическая система, и инженер-пользователь должен рассматриваться как ее часть.

Технической базой САПР являются в основном ЭВМ третьего поколения типов ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ с развитой периферийной техникой, включая графические дисплеи, графопостроители, позволяющие автоматизировать графические процедуры, а также создающие возможность интерактивного режима работы на базе АРМ.

Программные средства САПР представляют в основном пакеты прикладных программ, имеющие управляющую программу и набор проектирующих программных модулей. При этом управляющая программа в зависимости от вида запросов формирует необходимые для решения задач состав и последовательность выполнения проектирующих программных модулей.

Для хранения условно-постоянных данных и типовых моделей, характерных для проектирования классов технических объектов, используются базы данных, составляющих основу *информационного обеспечения*. Для ввода исходных данных и информации в процессе проектирования используются языки графического взаимодействия пользователя с ЭВМ.

Оптимальным вариантом решения задач конструирования является создание систем автоматизированного проектирования с участием разработчика, в которых разработка конструкции РЭА ведется в форме «диалога» человека с ЭВМ.

Применение САПР дает следующие преимущества:
повышает эффективность труда разработчика;
сводит к минимуму возможность появления ошибок;
позволяет полно использовать творческий потенциал разработчика, освобождая его от рутинного труда;

в САПР предусмотрен ввод и вывод информации в форме, удобной для разработчика, не являющегося специалистом в области программирования;

позволяет хранить исходную, промежуточную и окончательную информацию и выдавать ее разработчику на любом этапе работы; контролирует действия разработчика и оперативно информирует его о допущенных ошибках.

Опыт автоматизации отдельных этапов проектирования РЭА, развитие математических методов и средств вычислительной техники позволили определить принципиальную возможность повышения темпов и качества проектирования основного вида инженерной деятельности путем его комплексной автоматизации.

Анализ деятельности инженера в реальных системах проектирования позволяет сформулировать три основные направления, по которым идет решение проблемы повышения производительности инженерного труда в процессе проектирования:

1) рационализация системы проектирования, включая систематизацию самого процесса проектирования и улучшения организации труда;

2) комплексная автоматизация умственно-формальных, нетворческих функций инженера-проектировщика в процессе проектирования путем организации сквозных циклов проектирования;

3) разработка имитационных моделей для машинного воспроизведения деятельности человека в условиях полной или частичной неопределенности проектных ситуаций.

Практическая реализация этих направлений при создании САПР представляет серьезную научно-техническую проблему, которая еще не решена в рамках общей теории систем. Однако указанные принципы позволили сформулировать основные требования к функциональной структуре САПР, разработать и внедрить их в практику.

Как показал отечественный (и зарубежный) опыт, действительная автоматизация проектной деятельности предполагает:

приближение ЭВМ к рабочему месту проектировщика;

оснащение рабочего места привычными, удобными и надежными средствами машинной графики;

реализацию программ, позволяющих работать в итерационных циклах, просматривать варианты решений, вырабатывать концепции;

устранение рутинных операций в процессе выпуска конструкторской документации и проведения громоздких вычислений;

обеспечение высокой реактивности системы на запросы или задания оператора;

легкий доступ к ЭВМ в любое время, возможность прерывания работы с сохранением ранее созданной информации, промежуточных вариантов решения.

Удовлетворению этих требований наилучшим образом отвечают САПР, в состав которых входят графические комплексы на базе мини-ЭВМ, снабженные развитыми графическими операционными системами и пакетами прикладных программ. Такие комплексы ориентированы на непосредственное взаимодействие человека с ЭВМ.

Типовые задачи, решаемые в рамках САПР на АРМ-Р при конструировании РЭА. Типовые задачи, решаемые на одном из таких комплексов — АРМ разработчика радиоэлектронной аппаратуры (АРМ-Р), решаются в автономном режиме, связаны с вводом — выводом графической информации и выполнением расчетных задач незначительного объема, например:

размещение элементов произвольной конфигурации на схеме, передней панели или поле ПП;

разводка и редактирование топологии ПП;

выполнение электрических принципиальных схем и формирование на их основе заданий на схемотехническое моделирование аналоговых, цифровых и смешанных схем;

механизированное изготовление управляющих носителей (магнитных и перфолент) для изготовления фотошаблонов ПП, БИС, микросборок, а также управляющих носителей для автоматизированного производства (сверильных станков, автоматов распылки ИС, автоматов контроля печатного монтажа и т. п.);

составление и выпуск перечней элементов, спецификаций, отдельных видов эксплуатационной документации на изделия и системы;

выполнение автоматизированного вычерчивания детализированных единиц с полным оформлением чертежа;

проведение аналитических и графических инженерных расчетов;

выпуск документации (графической и текстовой) для передачи в архивы производства;

корректировка и редактирование графических, текстовых и смешанных документов;

выполнение сборочных чертежей ПП, сборок и шкафов;

составление программ с помощью легких для изучения и использования языков программирования, ориентированных на инженера (Фокал, Фокал графический, Бэйсик);

подготовка информации (формализованных заданий) для последующей передачи на центральный вычислитель САПР с целью выполнения задач функционального и технического проектирования;

отображение на экранах дисплеев или вывод на бумагу результатов, полученных на центральном вычислителе САПР;

модернизация и ввод стандартных конструктивных элементов в библиотеку АРМ.

В режиме взаимодействия с большими ЭВМ АРМ-Р позволяет:
решать задачи моделирования электрических схем цифровой и аналоговой аппаратуры;

решать задачи синтеза схем цифровой аппаратуры;

выполнять сквозной процесс проектирования ячеек аппаратуры с выходом на конструкторский этап проектирования ячеек субблоков (объединительных плат);

обращаться в архив спроектированных изделий (банк данных), размещаемых на средствах вычислительных машин единой серии (ЕС ЭВМ);

передавать на хранение в банк данных информацию по спроектированному изделию.

Основные направления использования САПР при проектировании РЭА. В качестве наиболее характерных направлений использования САПР при производстве РЭА можно привести следующие:

пакеты прикладных программ (ППП) в подсистемах САПР; промышленные САПР.

При выполнении курсового проекта возможности использования САПР при решении задач проектирования РЭА зависят от технических и программных средств, которыми располагает пользователь. При наличии АРМ с помощью базовых систем программного обеспечения или ППП могут эффективно решаться задачи размещения элементов на плате, трассировки печатных соединений, корректировки ранее спроектированной ПП и др. Часть этих задач можно решать и на универсальных ЕС ЭВМ при наличии в их математическом обеспечении специализированных ППП.

ППП в подсистемах САПР. В объективно-зависимых подсистемах САПР основу программного обеспечения составляют специализированные ППП. Наиболее развитым ППП машинной графики, используемым в САПР, является ГРАФОР [27].

Под *машинной* графикой понимают автоматизацию процессов подготовки, преобразования, хранения и воспроизведения графической информации с помощью ЭВМ. Это пассивная операция, так как проектировщик не может непосредственно воздействовать на изображение.

В противовес этому получила развитие *интерактивная* машинная графика — использование ЭВМ для подготовки и воспроизведения графической информации, при котором проектировщик оперативно вносит изменение в изображение непосредственно при его воспроизведении, т. е. это работа с графиком или чертежом в режиме диалога в реальном масштабе времени. Интерактивная машинная графика позволяет объединить возможности человека и ЭВМ при решении задач геометрического моделирования, так как многие геометрические задачи человек решает быстрее ЭВМ.

Основные области применения машинной графики:

машинное изготовление конструкторской документации;

решение задач геометрического моделирования при конструировании изделий РЭА, при проектировании ИС и т. п.;

отображение результатов анализа физических и технических систем в виде графиков: анализ переходных процессов динамических систем, получение диаграмм устойчивости систем управления и т. п.

Все графические средства ЭВМ работают с информацией, представленной в цифровой форме. При регистрации результатов проектирования необходимо осуществлять прямое и обратное преобразования графической информации в цифровую форму. Эти функции осуществляют устройства ввода — вывода графической информации. К устройствам машинной графики относят: кодировщик графической информации, используемый для ввода графической информации с бумажного носителя, и различные графопостроители, предназначенные для вывода чертежей на бумагу.

К устройствам интерактивной машинной графики относят: графические дисплеи, предназначенные для отображения графической информации — алфавитно-цифровая и функциональная клавиатуры, световое перо, электронные планшеты и т. п.

Все перечисленные устройства могут работать в автономном режиме, в режиме связи с высокопроизводительной ЭВМ или в составе АРМ на базе мини-ЭВМ. Это позволяет осуществлять любые схемы взаимодействия и режимы работы графических устройств. Ввод — вывод графической информации можно осуществлять традиционными периферийными устройствами ЭВМ: ввод — вывод с перфокарт, АЦПУ, которые используют при отсутствии вышеперечисленных устройств.

ГРАФОР работает с любым графическим устройством вывода, его используют на различных ЭВМ — ЕС, СМ, ПЭВМ, имеющих в своем программном обеспечении транслятор с языка Фортран.

Пакет представляет собой совокупность подпрограмм, реализующих различные операции геометрического проектирования. Входной язык пакета является расширением языка Фортран. Алгоритм, выраженный на этих языках, есть последовательность операторов языка Фортран, главным образом операторов обращения к графическим процедурам.

Пакет прикладных программ ГРАФОР ориентирован на обеспечение вывода информации из ЭВМ в графической форме. Подпрограммы пакета делятся на шесть групп.

1) подпрограммы инициализации и завершения. С их помощью пользователь указывает единицы расстояний при вычерчивании, задает число страниц выводимой информации, выбирает цвет и толщину линий путем указания номера соответствующего пера из числа имеющихся;

2) подпрограммы вычерчивания графических примитивов (отрезок прямой, многоугольник, равномерная прямоугольная сетка,

дуга окружности, участок спирали, дуга эллипса, в частности, прямоугольник, окружность, эллипс);

3) подпрограммы для вывода текстовой информации. Операторы входного языка позволяют задавать местоположение, размеры и наклон печатаемых букв, цифр и специальных символов;

4) подпрограммы для вычерчивания графиков заданных функций.

В операторах вычерчивания указываются массивы чисел, рассматриваемых как координаты последовательных точек кривых, которые будут соединены ломаной прямой. Построение возможно в обычном и логарифмическом масштабах;

5) подпрограммы преобразований, к которым относятся такие элементарные преобразования целых изображений или их частей, как сдвиг, поворот, растяжение — сжатие, симметричное отображение;

6) подпрограммы вычерчивания изображений трехмерных объектов.

Опыт показывает, что пользователи сравнительно быстро осваивают ППП ГРАФОР и успешно применяют для решения различных задач.

В качестве примера реализации ППП ГРАФОР при выполнении курсового проекта можно привести использование подпрограммы вычерчивания графиков заданных функций, в частности:

построение зависимости коэффициента передачи μ от частоты f при различных способах закрепления платы (рис. 5.10);

построение зависимости k_a от соотношения сторон a/b при различных способах закрепления ПП (рис. 5.11).

Для получения графиков данных зависимостей необходимо:

подготовить исходную информацию;

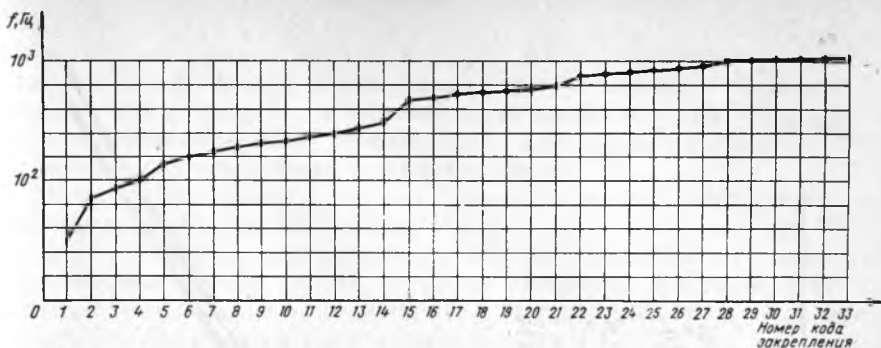
написать программу на языке Фортран.

Примером реализации базового информационно-программного обеспечения является пакет графических программ «Гриф».

Пакет графических программ (ПГП) «Гриф» разработан для выполнения широкого круга задач проектирования печатных плат, электронных и других схем, а также выпуска конструкторской документации и работы с двумерными графическими объектами. Вместе с тем пакет «Гриф» является базовым пакетом для разработки прикладных проблемно-ориентированных программ на комплексах АРМ.

Рекомендуемый порядок освоения и внедрения ПГП «Гриф» предусматривает наряду с заимствованием разработанной базы данных создание пользователем собственной базы данных.

Основная трудность реализации диалоговых пакетов состоит в обеспечении необходимой координатной точности при хорошей реактивности системы в процессе диалога человека с ЭВМ. Трудности обеспечения высокой реактивности системы преодолены путем разделения всего процесса проектирования на предваритель-



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Код закрепления	ЗССС	ОССО	ОСОС	ЗССО	ОСЗС	ОСОО	СССЗ	ОССЗ	ЗССЗ	ЗСЗС	ОСЗО
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Код закрепления	ЗСЗО	ЗССО	ЗСЗЗ	СОСО	ООСО	ОСОЗ	ЗОСО	ОООО	ООЗО	ЗОЗО	СЗСО
№	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Код закрепления	ОСЗЗ	ОЗСО	ОЗОО	ОЗЗО	ЗЗЗО	СЗСЗ	ОЗСЗ	ЗЗСЗ	ОЗОЗ	ОЗЗЗ	ЗЗЗЗ

Рис. 5.10. Зависимость коэффициента передачи μ от частоты f при различных способах закрепления платы

ный (подготовительный) этап, собственно диалог и заключительный этап.

Важным вопросом, возникающим при разработке любой САПР, является введение единых нормативов на разработку ППП и, в частности, нормативов, обеспечивающих единую структуру представления информации в архиве и базе данных системы и АРМ. Такие нормативы определяют, по существу, некоторый язык описания графической и текстовой информации.

Разработанный язык представления графической и текстовой информации (ЯГТИ) обеспечивает описание любых графических документов схем, ПП, детализировочных чертежей, состоящих из векторов, ломаных, дуг, полигональных кривых, текстов различных алфавитов, а также одиночных и групповых библиотечных графических элементов.

Язык графического взаимодействия (ЯГВ), или диалогового конструирования, предназначен для взаимодействия пользователя с системой автоматизированного проектирования с помощью команд. Эти команды похожи на обычные предложения русского языка и содержат глаголы, существительные, идентификаторы и пунктуацию. Язык позволяет формировать описания чертежей, деталей для обработки на станках с ЧПУ, электрических принципиальных схем, ПП и другую графическую и текстовую информацию; ЯГВ используют в пакетном и интерактивном режимах.

Язык разработан для использования в различных диалоговых системах автоматизированного проектирования, в том числе раз-

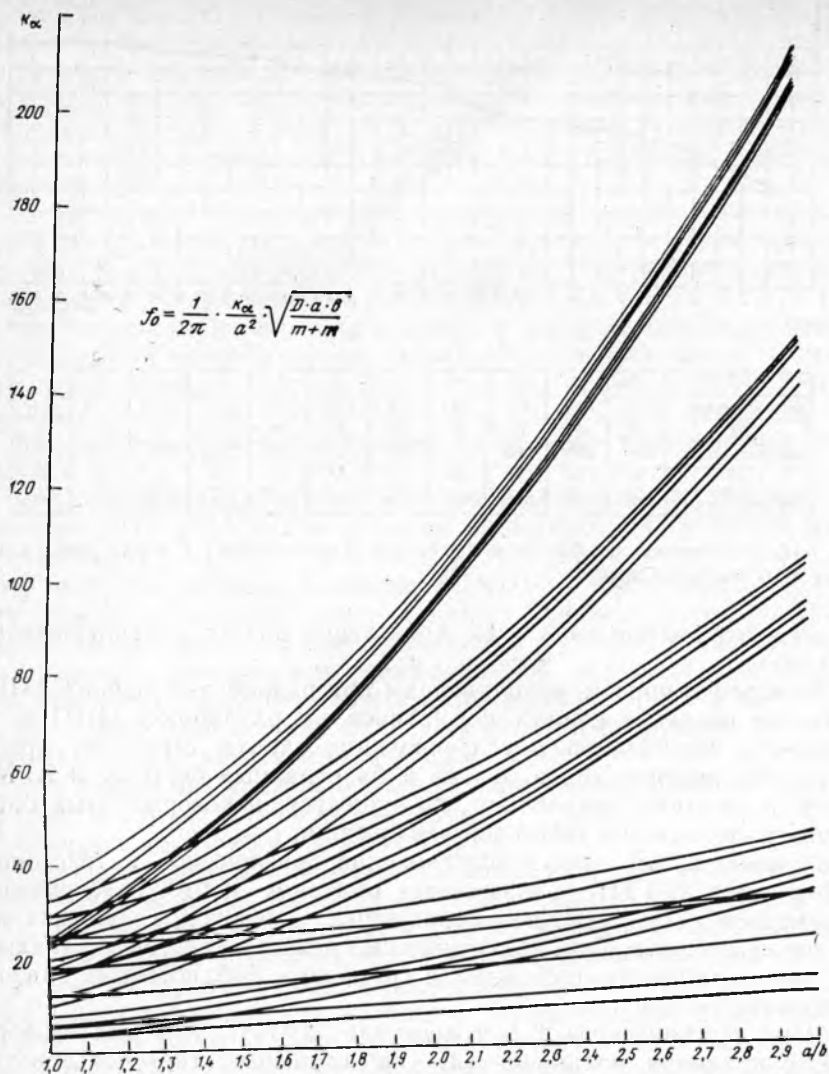


Рис. 5.11. Зависимость a/b от соотношения сторон при различных способах закрепления платы

личных модификаций АРМ, и является аппаратно-независимым языком высокого уровня. Основное назначение ЯГВ — дать возможность пользователям САПР иметь единый по синтаксису и семантике язык для изучения и использования в различных САПР.

Пакет графических программ «Гриф» разработан как набор программных модулей, расширяющих функциональные возмож-

ности дисковой операционной системы АРМ в направлении работы с графикой. Вместе с тем данный пакет должен рассматриваться как базовый. На его основе производится разработка проблемно-ориентированных прикладных процедур, которые будут компоноваться с базовыми модулями пакета.

Пакет графических программ позволяет решать следующие задачи машинного проектирования РЭА:

1) осуществлять ввод графической информации в систему в виде готовых листов ЯГТИ, а также пополнять библиотеки стандартных графических элементов (групповых «глазков», часто применяемых графических конструкций и т. п.);

2) проводить синтаксический контроль «сколочной» информации с выводом сообщений на экран, а также контроль синтаксических листов ЯГТИ;

3) осуществлять калибровку бумаги, на которой выполнено вводимое изображение. Калибровка позволяет производить программную коррекцию усадки или растяжения бумаги, а также выравнивать исходный эскиз при его произвольной, неортогональной установке на поле кодировщика;

4) выполнять редактирование графических листов ЯГТИ, имеющих в своем составе абзацы линии, графический текст, дуги и окружности, маркированные точки — контактные площадки. Редакторские функции предусматривают:

редактирование текста (ввод, замена, дополнение и т. п.);

редактирование линий (устранение линий, проведение новых, замена типов линий, их ширины и т. п.);

ввод новых контактных площадок и групп, замена их кодов;

проведение линий в различных направлениях, под любым углом;

манипуляции с групповыми графическими элементами;

формирование фрагментов изображения и занесение их в библиотеку пользователя для последующего использования;

просмотр отдельных слоев изображения в различных наборах;

5) расставлять графические элементы на экране дисплея в заданном дискрете, используя запасенные в библиотеке АРМ описания групповых элементов;

6) воспроизводить электрические схемы, сборочные чертежи по результатам расстановки на графопостроитель АП-7252 совместно с бланками различного формата в соответствии с ЕСКД;

7) транслировать с ЯГТИ и выводить на различные устройства АРМ текстовую и графическую информацию;

8) формировать описания библиотечных графических элементов с помощью графического дисплея, кодировщика графической информации, текстового дисплея или специальной программой.

В качестве примера использования ППП «Гриф» рассмотрим проектирование 1-го слоя разводки печатных соединений МПП на

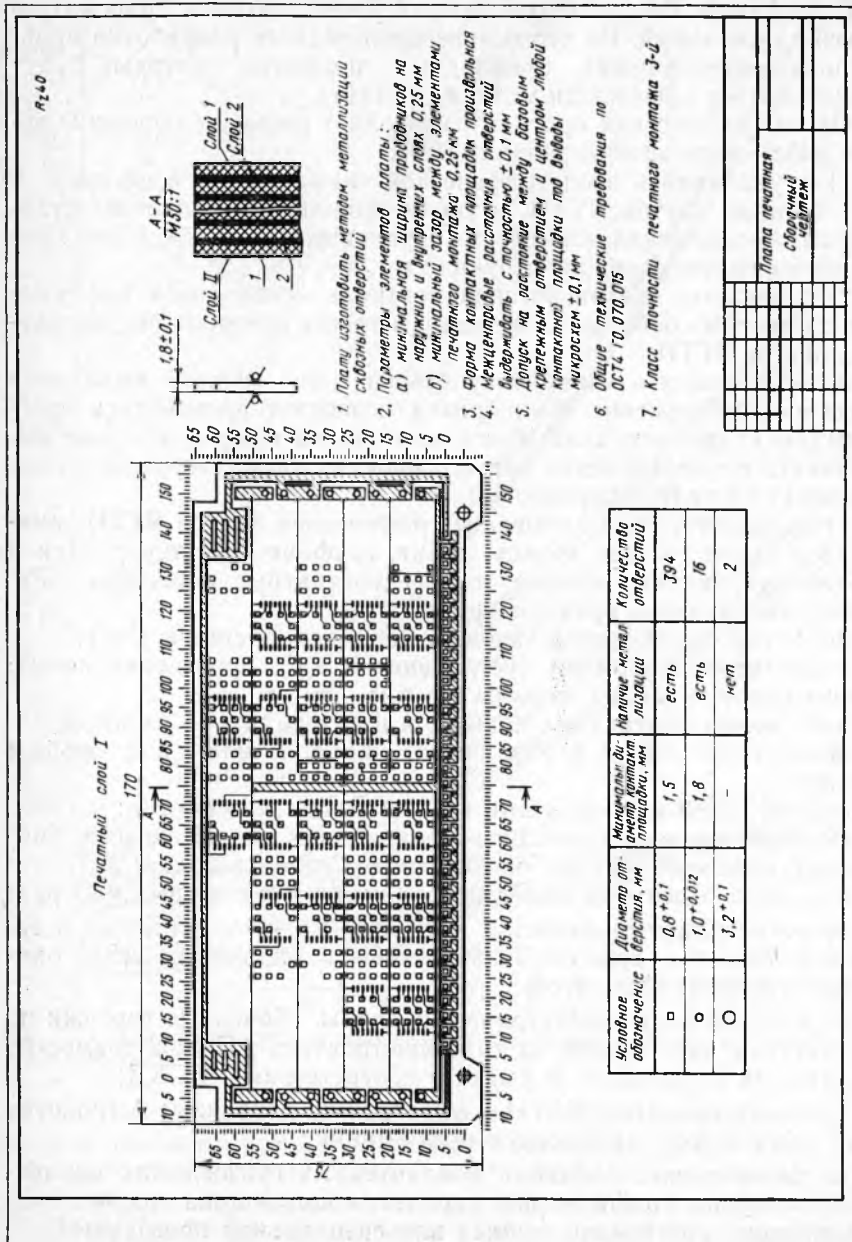


Рис. 5.12. Пример выполнения 1-го слоя разводки печатных соединений МПП на АРМ с использованием ППП «Гриф»

на АРМ с получением конструкторской документации в виде сборочного чертежа (рис. 5.12).

Для реализации данной задачи необходимо подготовить исходные данные. Предположим, что МПП задана и введена в систему одним из известных способов. Конструктивные данные представляют собой: описание совокупности таких параметров, как габаритные размеры и форма; расположение на ней соединителей и различных элементов механического крепления; размеры поля, на котором разрешено проводить размещение ЭРЭ; зоны, запрещенные для трассировки; экранные области и т. п.

Заданы также технологические правила и ограничения на конструирование элементов проводящего рисунка: ширина проводников, размеры и форма контактных площадок, допустимые расстояния между ними, правила установки межслойных переходов и т. д.

Основные этапы проектирования МПП заключаются в следующем:

- I — этап начального размещения ЭРЭ;
- II — этап улучшения начального размещения;
- III — этап решения вспомогательных задач, обеспечивающих решение задачи трассировки соединений;
- IV — этап трассировки.

Особенностью процесса проектирования МПП является произвольное чередование автоматических и ручных процедур, в том числе при размещении или трассировке, что и является отражением интерактивного режима работы.

Промышленные САПР. Наибольшее развитие промышленные САПР получили в радиоэлектронике, что объясняется как высокой сложностью проектируемых объектов и, следовательно, острой необходимостью автоматизации проектирования, так и наличием соответствующих инженерных кадров.

Примерами САПР РЭА являются система РАПИРА и ее дальнейшее развитие в системе ПРАМ. Системы РАПИРА и ПРАМ представляют собой совокупность автономных подсистем автоматизированного проектирования, представленных ППП сложной структуры со своим лингвистическим и информационным обеспечением. Большинство подсистем требует технического обеспечения в виде ЭВМ единой серии с емкостью оперативной памяти не менее 512 К байт. Для подсистем, связанных с выпуском документации, требуются чертежные автоматы. Некоторые из подсистем ориентированы на исполнение на мини-ЭВМ типа СМ. Основным языком программирования является язык ПЛ/1. Проектирующие подсистемы РАПИРЫ и ПРАМА решают широкий круг задач проектирования РЭА на макро- и метауровнях: моделирование функциональных и принципиальных схем, синтез контролирующих и диагностических тестов, конструирование ПП, СВЧ-узлов и ГИС, оформление конструкторской документации, подготовка управля-

ющей информации для программно-управляемых технологических автоматов и т. п.

При выполнении курсового проекта для получения навыков работы по автоматизации конструирования перечисленные задачи следует решать в рамках САПР путем использования ППП. Наиболее характерными особенностями ППП являются: ориентация на конкретный класс задач, определяемый предметной областью пакета; наличие средств настройки пакета на требуемый вариант работы по методам обработки, полноте диагностики; уменьшение требований к пользователю в области программирования; возможность работы пользователя на входных языках, близких к профессиональным. Современные ППП ориентируются на максимальное упрощение решения задач с их помощью, на минимизацию затрат времени специалистов-проектировщиков для получения результатов решения задач.

С помощью ППП, которые широко используются при создании САПР на базе СМ ЭВМ, эффективно решаются задачи размещения элементов на ПП, трассировки печатных соединений, корректировки ранее спроектированной ПП и др. Часть этих же задач может быть реализована на универсальных ЕС ЭВМ при наличии в их математическом обеспечении специализированных ППП.

В курсовом проектировании целесообразно применять следующие ППП [9]:

1. ППП «Конструкторское проектирование двусторонних печатных плат» «Рапира-3/ДПП» решает следующие основные задачи: размещение ИС на платах цифровых устройств; распределение контактов внешних соединителей плат; трассировку печатных соединений для плат цифровых, цифроаналоговых и аналоговых устройств.

Размещение микросхем на платах аналоговых устройств выполняется вручную.

Пакет прикладных программ «Рапира-3/ДПП» обеспечивает: подготовку, ввод и контроль формализованных заданий на проектирование на базе макроязыка конструктора Маяк;

доработку ПП после автоматической трассировки, выпуск комплекта конструкторской документации.

Исходными данными для ППП «Рапира-3/ДПП» является формализованное задание, составленное на макроязыке Маяк. Результатами работы программ является информация о координатах установки элементов, распределении контактов внешних соединителей, координатах и типах элементов печатного монтажа. Для функционирования данного ППП необходимо использовать ЕС ЭВМ, работающую под управлением ОС ЕС версии 4.1 и выше. Программы написаны на языке ПЛ/1.

2. ППП «Проектирование плоских конструктивов» ПППР—УПК решает следующие задачи:

вычерчивание сборочных и детализовочных чертежей на графопостроителе АП-7251 и автомате «Контур-К»;

составление таблиц координат элементов компоновки.

ПППР—УПК позволяет осуществлять:

формирование библиотек типовых графических элементов проектируемых конструкций; компоновку чертежей в интерактивном режиме с визуализацией на дисплее ЭПГ-400;

графическое редактирование компоновки (сдвиг, поворот, дополнение, удаление, мультиплицирование элементов), семантический контроль получаемых чертежей с помощью ЭПГ-400.

Выходными результатами работы ППП являются управляющие перфоленты для получения сборочного чертежа детали на графопостроителе АП-7251 или на чертежном автомате «Контур-К», а также таблица координат элементов компоновки. Данный ППП работает под управлением ДОС СМ, для его функционирования необходимы технические средства, входящие в АРМ на базе ЭВМ М-400, СМ-3, СМ-4, «Наири-4», «Электроника 100-25» или других программно-совместимых моделей.

3. ППП—ЧПК применяется для выпуска конструкторской документации с помощью технических средств, указанных АРМ; он обеспечивает:

получение управляющих перфолент для изготовления фотошаблонов ПП на координатографе «Картимат», получение чертежа детали и сборочного чертежа на графопостроителях АП-7251, АП-7252, «Контур-К»; получение перфоленты сверловки для станков типа ОФ-72;

подсчет числа типов контактных площадок и площади металлизации платы.

4. ППП «Проектирование многослойных печатных плат цифроаналоговых устройств» ППП «Рапира-6» решает задачи расстановки ЭРЭ на наружных слоях МПП, трассировки связей на внутренних слоях, введения банка данных, выпуска конструкторской документации. Пакет не требует специальной генерации и имеет модульную структуру. Входными языками являются язык Волс-Р, который описывает структуру электрической схемы, язык директив редактирования схемы и язык описания паспорта для описания учетной информации и констант технического проектирования. Пакет прикладных программ «Рапира-6» выполняет семантический контроль исходной информации. Выходные данные пакета: спецификация исполнения, сборочный чертеж исполнения, таблица проверки монтажа, программа контроля на перфоленте, программа изготовления переменных частей фотооригиналов слоев на перфоленте.

Данный ППП может быть использован для проектирования ПП с числом сигнальных слоев не более десяти при числе цепей не более 150. Число ЭРЭ в одной проектируемой схеме — не более 100.

Программы пакета написаны на языке ПЛ/1. Минимальная конфигурация технических средств: модель ЕС ЭВМ с ОП емкостью 256 К байт (начиная с ЕС 1022), работающая под управлением ОС ЕС версии 4.1 и выше.

Кроме описанных выше ППП, в последнее время получили развитие подсистемы базового информационно-программного обеспечения САПР на ЕС ЭВМ, такие как ПРАМ-0,5 (проектирование ПП), ПРАМ-2,4 (проектирование ПП с разногабаритными элементами) и др.

Техническое обеспечение САПР. Техническое обеспечение САПР включает универсальные средства вычислительной техники и специализированные средства для автоматизации процессов конструирования, изготовления и контроля РЭА. Основная задача технических средств САПР — организовать оперативный обмен информацией конструктора с ЭВМ в едином ритме с процессом творческого проектирования. Формы обмена проектной информацией и ее обработки в ЭВМ определяют требования к техническим средствам САПР [27]. Такими требованиями можно считать:

высокую точность вычислений, обеспечивающую требуемую глубину анализа альтернативных вариантов технических идей и конструкторских решений;

наглядность информации при взаимодействии с ЭВМ, позволяющую наиболее полно использовать знания и опыт конструктора для принятия оптимальных проектных решений;

возможность параллельной разработки отдельных узлов изделия в рамках общего проекта;

выдачу законченных результатов проектирования изделия и технологической проработки его деталей и сборочных единиц на технологическое оборудование;

использование ЭВМ непосредственно в конструкторском бюро, минуя промежуточные стадии программирования расчетов и кодирования информации в вычислительных центрах.

Требование к высокой точности вычислений достигается совместимостью моделей ЕС ЭВМ по памяти и быстродействию.

Универсальные средства вычислительной техники можно разделить на следующие группы: средства обработки информации (вычислительные машины); средства ввода информации в ЭВМ; средства вывода информации из ЭВМ.

Специализированные средства автоматизации включают группы: автоматизированные рабочие места — АРМ; пункты выпуска документации — ПВД; автоматизированные средства для изготовления и контроля РЭА.

В настоящее время вычислительная техника в СССР развивается по следующим основным направлениям: единая система ЭВМ — ЕС ЭВМ; «Эльбрус»; агрегатированная система вычислительной техники — АСВТ; микроЭВМ (на микропроцессорах).

Таблица 5.4. Общие характеристики моделей ЕС ЭВМ

Наименование характеристики	Значения характеристик в моделях					
	ЕС 1022	ЕС 1033	ЕС 1045	ЕС 1055	ЕС 1060	ЕС 1065
Быстродействие, оп./с	80 000	200 000	870 000	870 000	1 300 000	5 000 000
Объем оперативной памяти, Мбайт	0,256 или 0,512	0,256 или 0,512	от 1 до 4	от 1 до 4	от 2 до 8	от 8 до 16
Объем виртуальной памяти, Мбайт	Нет	Нет	16	16	16	16

Таблица 5.5. Общие характеристики моделей СМ ЭВМ

Характеристика	Модели I очереди		Модели II очереди	
	СМ 3	СМ 4	СМ 1300	СМ 1420
Быстродействие, тыс. оп./с	250	800	500	1000
Максимальная емкость ОП, К слов	28	124	28	124/1920
Программная совместимость	—	с СМ 3	с СМ 3	с СМ 4

Все перечисленные ЭВМ могут применяться в САПР. Однако в связи с проблемой создания тиражируемых САПР РЭА организации ориентируются на ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ (в составе АРМ). В перспективе будут использоваться и микроЭВМ (прежде всего в АРМ).

В табл. 5.4, 5.5 приведены основные характеристики серийно выпускаемых ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ.

К ЭВМ, используемым в САПР, предъявляются следующие требования:

быстродействие (число операций в секунду) и объем оперативной памяти должны давать возможность решения задач в приемлемое время;

объем внешних запоминающих устройств (на магнитных лентах и магнитных дисках прямого доступа) должен быть достаточен для введения баз данных;

непосредственный доступ конструктора к вычислительным средствам в диалоговом режиме (режиме разделения времени);

коллективный доступ к вычислительным средствам для организации САПР коллективного пользования;

возможность объединения ЭВМ в многомашинные комплексы для расширения операций по оперативной памяти и эффективно-быстродействию и разумного распределения функций между ЭВМ.

К средствам ввода информации в ЭВМ относят:

устройства подготовки данных, предназначенные для нанесения данных на носители данных (перфокарты, магнитные ленты, маг-

нитные диски, микроленки, пишущие машинки со стилизованным шрифтом для читающих автоматов);

устройства ввода, предназначенные для ввода данных с носителей данных в ЭВМ;

устройства ввода графической информации, предназначенные для автоматического или полуавтоматического считывания данных, их преобразования и вывода на носители данных или для непосредственного ввода в ЭВМ (координатоскопы и сколки планшетного типа, оптические считывающие устройства сканирующего типа, лазерные устройства ввода данных с голограмм);

видеотерминалы (дисплеи) экранного типа, предназначенные для подготовки и вывода алфавитно-цифровых и графических данных в ЭВМ (в том числе, многопультные системы);

читающие распознающие автоматы;

линии связи (устройства телеобработки) для дистанционного ввода данных в ЭВМ.

К средствам вывода информации из ЭВМ относятся такие устройства, с помощью которых информация выводится из ЭВМ в виде: электрических сигналов (при передаче по линии связи и для управления исполнительными устройствами); изображений и текста, иногда в виде звуковых сигналов (если потребителем информации является человек); машинных носителей; конструкторской документации. Таким образом, выводимая из ЭВМ информация часто имеет те же формы, что и вводимая. Поэтому созданы средства, используемые как в режиме ввода, так и в режиме вывода: дисплеи и системы, построенные на их основе, линии связи. Кроме них к средствам вывода относят:

алфавитно-цифровые печатающие устройства, предназначенные для вывода из ЭВМ алфавитно-цифровых данных на бумагу;

устройства вывода на машинные носители (перфокарты, перфоленты, магнитные ленты и диски);

устройства вывода на микроленку, голограммы;

графопостроители (рулонные и планшетные), предназначенные для вывода данных в виде чертежей;

координатографы, с помощью которых получают чертежи, а также фотошаблоны (шаблоны);

магнитосчитывающие устройства, осуществляющие ввод данных с магнитной ленты в координатографы.

В настоящее время для автоматизации конструкторских работ широко используются диалоговые графические комплексы на основе мини-ЭВМ с развитой периферией (АРМ). Они предназначены как для автономного использования, так и для работы в составе объединенного комплекса ЕС ЭВМ-АРМ. На АРМ выполняют подготовку, редактирование, преобразование, контроль, отображение текстовой и графической информации, получают документацию на машинных носителях, а также чертежи, решают расчетные задачи. Автоматизированные рабочие места второго поколения, ос-

нащенные ЭВМ типа СМ-4 — мощные средства конструирования, на которых можно построить полный цикл разработки и выпуска конструкторской и технологической документации.

Автоматизация конструирования тесно увязана с автоматизацией изготовления и контроля РЭА. При производстве РЭА широко автоматизируются следующие операции: изготовление и контроль фототаблонов, сверление отверстий в ПП, выполнение электромонтажа плат, блоков, стоек, шкафов и его контроль, диагностика и контроль цифровых ячеек и типовых элементов замены, изготовление механических деталей на металлообрабатывающих станках.

Автоматизированное оборудование требует на входе либо управляющей перфоленты, либо магнитной ленты, выпускаемых в САПР. Часть оборудования имеет встроенные микроЭВМ, позволяющие управлять оборудованием в реальном масштабе времени непосредственно с микроЭВМ. Программа управления в случае использования САПР переносится в память микроЭВМ с машинных носителей, подготовленных в САПР.

Средства обработки информации представляют собой много-машинный иерархически построенный комплекс, включающий ЭВМ различной производительности: большой (свыше 1 млн. опер./с), средней (от 0,15 до 1 млн. опер./с). На мощные ЭВМ возлагают функции счета наиболее трудоемких задач, требующих больших ресурсов, на ЭВМ с меньшими ресурсами — функции управления вычислительным процессом, контроля, выпуска документации, обеспечения взаимодействия с АРМ и периферией и т. п.

На средствах вывода информации, как и на АРМ, получают документацию и машинные носители. Последние предназначены для устройств изготовления и контроля РЭА и пунктов выдачи документации. Автоматизированные рабочие места через устройства сопряжения электрически объединены в единый вычислительный комплекс со средствами обработки. Технические устройства и программное обеспечение позволяют организовывать различные структуры комплекса технических средств САПР.

Глава 6. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

6.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЫТОВОЙ АНАЛОГОВОЙ АППАРАТУРЫ

1. Тема проекта: Блок управления светодинамической установкой (БУСУ).
2. Исходные данные к проекту: схема электрическая принципиальная. Группа РЭА — стационарная, предназначенная для работы в отапливаемых помещениях. Тип производства — серийный. Себестоимость — не более 200 руб.
3. Объем и содержание графических работ:
 - Лист 1 (А1) — БУСУ. Схема электрическая принципиальная.
 - Лист 2 (А1) — БУСУ. Общий вид.
 - Лист 3 (А1) — Корпус. Сборочный чертеж.
 - Лист 4 (А1) — Ячейка. Сборочный чертеж.
 - Лист 5 (А1) — Печатная плата.
4. Объем и содержание расчетно-пояснительной записки:
 1. Анализ технического задания — 5 ... 8 с.
 2. Анализ существующих конструкций и выбор метода конструирования — 12 ... 15 с.
 3. Предварительная компоновка БУСУ — 20 ... 25 с.
 4. Разработка конструкции БУСУ и оценка его качества (с проведением расчетов: теплового режима, вибро- и ударопрочности, надежности) — 20 ... 30 с.Рассмотрим кратко содержание каждого раздела записки.

1. Анализ технического задания

1.1. Анализ технических требований

В этом параграфе рассмотрено расширенное техническое задание на проектирование БУСУ, в котором раскрыто содержание следующих пунктов:

1. Наименование изделия: блок управления светодинамической установкой (БУСУ).
2. Назначение: БУСУ предназначен для работы в составе светодинамической установки, используемой для оформления различных праздничных мероприятий и дискотек. БУСУ должен обеспечивать как работу от музыкального источника, так и автономно в режиме «бегущие огни».
3. Комплектность: один блок.
4. Технические параметры:
 - число каналов управления — 4;
 - частотные каналы: НЧ (20 ... 750 Гц), СЧ (750 ... 7500 Гц), ВЧ (7500 ... 16 000 Гц);
 - число управляемых источников света с общим напряжением питания 220 В — 4 шт.;
 - входное сопротивление по сигнальному входу — не менее 100 кОм;
 - максимальная мощность нагрузки — 2 кВт;
 - напряжение питания — 220 В, частота — 50 Гц.

5. Коэффициент унификации — не менее 0,7.
6. Требования к конструкции:
внешний вид БУСУ должен отвечать современным требованиям к бытовой аппаратуре;
габаритные размеры не более $260 \times 210 \times 100$ мм;
масса не более 3 кг;
блок должен быть снабжен ручкой для переноски.
7. Характеристики внешних воздействий:
окружающая температура $-20 \dots +30^\circ\text{C}$;
относительная влажность 80 % при температуре $+25^\circ\text{C}$;
удары длительностью 1 мкс ускорением до $10g$;
вибрации в диапазоне частот $10 \dots 60$ Гц ускорением до $3g$;
атмосферное давление — 10^5 Па.
8. Все элементы управления и индикации должны быть легкодоступны и вынесены на переднюю панель.
9. Среднее время наработки до отказа должно быть не менее 10 000 ч.
10. Тип производства — серийный. Себестоимость — не более 200 руб.

1.2. Анализ электрической принципиальной схемы БУСУ

1.3. Анализ элементной базы БУСУ

Содержание данных параграфов пояснительной записки к курсовому проекту изложено в качестве примера в § 3.2. Чертеж электрической принципиальной схемы БУСУ приведен на рис. 3.5.

В заключение данного раздела сформулированы выводы о соответствии примененной элементной базы техническим требованиям.

Общий объем 1-го раздела составил 8 страниц рукописного текста.

2. Анализ существующих конструкций и выбор метода конструирования

2.1. Анализ аналогов

В этом параграфе студент проводит патентный поиск, анализ аналогичных конструкций по данным советских журналов «Радио» и популярных изданий в помощь радиолюбителям-конструкторам. Кроме того, изучает конструкции бытовой РЭА, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью.

В процессе изучения существующих светодинамических установок (СДУ) сделан вывод о целесообразности создания отдельного блока управления СДУ, который можно было использовать с различными видами экранов или прожекторов.

2.2. Выбор метода конструирования

Рассмотрены различные методы конструирования. Выбран функционально-узловой метод. Проанализированы книжный, кассетный и разъемный варианты конструкции БУСУ. Предпочтительным оказался разъемный вариант, так как он наиболее совместим с существующими конструкциями.

Общий объем 2-го раздела составил 12 страниц, включая рисунки.

3. Предварительные компоновка и разработка конструкции БУСУ

3.1. Объемно-пространственная компоновка

В параграфе проведено функциональное разбиение электрической принципиальной схемы БУСУ. Принято решение, что блок должен включать следующие функциональные узлы:

- устройство сжатия динамического диапазона НЧ-сигнала — компрессор;
- фильтры для разделения спектра НЧ-сигнала на три частотные полосы;
- устройство управления световыми источниками и устройство, обеспечивающее режим работы «бегущие огни»;
- коммутационная панель или плата.

Так как был выбран разъемный вариант конструкции блока, то основная часть функциональных узлов блока будет представлять собой ячейки на печатных платах, снабженные соединителями.

Несущая конструкция блока является не типовой, что экономически оправдано для бытовой РЭА, выпускаемой серийно. Эскиз конструкции блока приведен на рис. 6.1.

Все ЭРЭ блока сведены в таблицу, в результате обработки данных которой определены суммарный объем радиоэлементов БУСУ:

$$V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N V_i n_i = 0,00246 \text{ м}^3, \quad (6.1)$$

где V_i и n_i — соответственно объем и число ЭРЭ i -го типа; N — число типов ЭРЭ. Исходя из принятого коэффициента заполнения блока, который для бытовой переносной и стационарной аппаратуры составляет 0,5 ... 0,7, определен объем самого блока: $V_{\text{бл}} = V_{\Sigma} / \kappa_{\text{зв}} = 0,004 \text{ м}^3$.

Далее определены суммарные, установочные площади ЭРЭ каждого функционального узла БУСУ: компрессора (AR_1) — $S_{\Sigma AR_1} = 2800 \text{ мм}^2$; фильтров

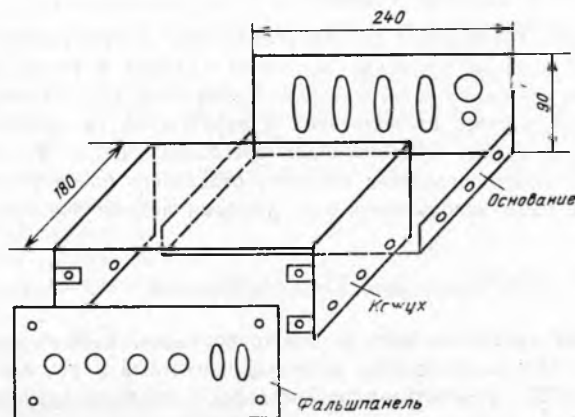
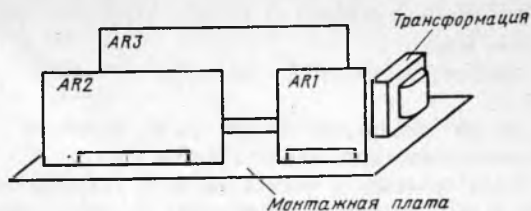


Рис. 6.1. Эскиз несущей конструкции БУСУ

Рис. 6.2. Эскиз расположения ячеек БУСУ



(AR2) — $S_{\Sigma AR2} = 6720 \text{ мм}^2$; устройств управления — $S_{\Sigma AR3} = 9520 \text{ мм}^2$. С учетом рекомендуемого значения коэффициента заполнения площади ПП для бытовой РЭА, равного 0,65 ... 0,75, получены значения площадей ПП каждой ячейки: $S_{AR1} = 4000 \text{ мм}^2$, $S_{AR2} = 9600 \text{ мм}^2$; $S_{AR3} = 13\,600 \text{ мм}^2$.

Рассматривались несколько вариантов соотношения сторон ПП ячеек и окончательно выбраны следующие:

- платы ячейки AR1 — $50 \times 80 \text{ мм}$;
- платы ячейки AR2 — $120 \times 80 \text{ мм}$;
- платы ячейки AR3 — $170 \times 80 \text{ мм}$.

Размеры ячеек должны иметь ограниченную высоту при установке их в блок — не более 80 мм.

На рис. 6.2 показан окончательный вариант расположения ячеек в блоке. Размеры коммутационной платы — $100 \times 215 \text{ мм}$. Тогда размеры блока с учетом принятого варианта компоновки будут следующие: $0,24 \times 0,18 \times 0,09 \text{ мм}$.

3.2. Выбор способов защиты БУСУ от внешних воздействий

В этом параграфе рассмотрены различные внешние факторы, дестабилизирующие работу блока, в том числе температура окружающей среды, механические воздействия, влага и электромагнитные помехи.

Для обеспечения нормального теплового режима введена перфорация, причем коэффициент перфорации менялся в пределах 0,1 ... 0,3. Каждый вариант включал определение температуры самого нагруженного элемента — тиристора КУ202Н. В результате принято решение взять коэффициент перфорации равным 0,2, что соответствует суммарной площади отверстий в корпусе, равной $0,0324 \text{ мм}^2$. При этом получают следующие данные расчета теплового режима:

- базовая температура — $+30^\circ\text{C}$;
- давление окружающей среды — 10^5 Па ;
- размеры блока — $0,24 \times 0,18 \times 0,09 \text{ м}$;
- коэффициент перфорации корпуса блока — 0,2;
- мощность, рассеиваемая внутри блока, — 20 Вт;
- размеры нагретой зоны — $0,2 \times 0,06 \times 0,08 \text{ м}$;
- зазор между нижней поверхностью блока и нагретой зоной — 0,005 м;
- приведенная степень черноты поверхности корпуса — 0,85;
- мощность самого нагруженного элемента — 3 Вт.

Расчетные данные:

- температура корпуса блока — $+35,5^\circ\text{C}$;
- температура нагретой зоны — $+43,6^\circ\text{C}$;
- температура корпуса тиристора — $+82,1^\circ\text{C}$.

Полученные результаты расчета теплового режима позволили сделать следующие выводы:

температура нагретой зоны намного меньше температуры, допустимой для ЭРЭ;

данная конструкция блока при естественном воздушном охлаждении обеспечивает нормальный тепловой режим работы.

Была произведена оценка вибро- и ударпрочности ячейки AR2. Ниже приведен пример расчета, выполненный по методике, изложенной в § 4.5.

Определена собственная частота колебаний платы размерами 120×80 мм, выполненной из гетинакса толщиной 2 мм. Длинные стороны платы заземлены, короткие — свободны. Данные для расчета следующие: модуль упругости материала платы $E = 3,3 \cdot 10^{10}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$; плотность гетинакса $\rho = 2050$ кг/м³; масса ЭРЭ, расположенных на плате, — 96,2 г.

С учетом этих данных получено:

цилиндрическая жесткость платы $D = 23,1$ Н·м;

частота собственных колебаний платы $f_0 = 1608$ Гц.

Далее определена максимальная виброперегрузка, равная 3,22g, и сравнена с допустимой перегрузкой самого ненадежного в этом смысле элемента — конденсатора типа К506, равной 6g. Следовательно, требования вибропрочности ЭРЭ выполняются.

Определен допустимый прогиб платы по формуле $x_{\text{доп}} = 0,003b = 0,003 \cdot 80 = 0,2$ мм. Далее произведено сравнение $x_{\text{доп}}$ с максимальным прогибом платы под действием вибрации, равным 0,03 мкм. Следовательно, прогиб платы много меньше допустимого и плата является вибропрочной.

Аналогично оценена вибропрочность ячеек AR1 и AR2. Также произведен расчет ударной прочности ячеек. Результатом расчетов явился вывод о том, что для обеспечения защиты БУСУ от механических воздействий дополнительных конструктивных мер не требуется.

Объем 3-го раздела пояснительной записки составил 20 стр.

4. Разработка окончательного варианта конструкции БУСУ и оценка его качества

4.1. Разработка типовой конструкции ячейки

В этом параграфе в соответствии с методикой, изложенной в § 3.4, разработана конструкция ячейки БУСУ как типовой. Сборочный чертеж ячейки приведен на рис. 6.3. Печатная плата выполнена из фольгированного гетинакса марки ГФ1-П.

4.2. Разработка конструкции блока

Чертеж общего вида БУСУ приведен на рис. 6.4. В качестве несущих использованы конструкции, выполненные из стального листа марки СТ10 толщиной 1 мм. Это позволило выполнить требования, предъявляемые к прочностным характеристикам конструкции, так как из-за наличия перфорации в корпусе применение алюминиевого листа не обеспечило бы требуемой прочности. Чертеж корпуса приведен на рис. 6.5.

Так как стальной корпус не стоек к коррозии, применено покрытие из аналинового красителя черного цвета, что позволило улучшить теплоотдачу излучением. Фальшпанель, поскольку она выполняет лишь декоративную функцию, выполнена из алюминия АД-1 толщиной 1 мм.

Для пайки ответственных элементов (транзисторов, конденсаторов) применяют припой ПОС-61, а для неответственных (тумблеров, розеток) — ПОС-30. Соединение ячеек и объединительной платы осуществляется с помощью соединителей. Для низковольтных цепей используются соединители НПР-7 (рассчитаны на напряжение до 40 В), для высоковольтных — МРН-7-1 (на напряжения до 250 В). Кроме того, для соединения объединительной платы с розетками РД2 и сетью используется соединитель РП-14 (напряжение до 300 В).

4.3. Оценка надежности и показателей качества БУСУ

Ниже приведен пример расчета надежности из пояснительной записки к курсовому проекту.

Интенсивность отказов ЭРЭ λ_i в общем случае выражается формулой

$$\lambda_i = \lambda_{0i} k_1 k_2 k_3 k_4 a_i (k_n, T), \quad (6.2)$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от давления, для наземной РЭА ($k_1=1$); k_2 ; k_3 — коэффициенты, зависящие от механических воздействий, суммарного воздействия ($k_3 k_4=1,65$); $a_i(k_n, T)$ зависит от температуры T поверхности элемента и коэффициента нагрузки k_n . В данной схеме для резисторов $k_n=0,5$; для транзисторов, тиристоров и диодов $k_n=0,7$; для конденсаторов $k_n=uc/u_{проб}$.

Таблица 6.1. Интенсивность отказов элементов БУСУ

№	Элементы	$\lambda_{0i} \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	k_n	a_i	N_i	$\lambda_i \cdot 10^6$	$\lambda_i N_i \cdot 10^6$
1	КТ315В	0,5	43	0,7	0,61	14	0,5	7,0
2	ПО1А	0,7	43	0,7	0,61	1	0,7	0,7
3	КУ202Н	0,85	84	0,7	0,91	4	1,3	5,1
4	Д232	0,8	80	0,7	0,88	4	1,2	4,6
5	Д226	0,46	43	0,7	0,61	14	0,7	10,7
6	Д223	0,6	43	0,7	0,61	4	0,6	2,4
7	КС156А	5	43	0,7	0,61	1	3,1	3,1
8	К50-6	2,4	43	0,2	0,42	12	1,0	12
9	К53-1	1,2	43	0,1	0,36	6	0,7	4,3
10	К10-17	0,98	43	0,2	0,42	4	0,7	2,7
11	ЭТО-2	0,82	43	0,1	0,38	4	0,5	2,1
12	МЛТ-0,125	0,3	43	0,5	0,68	25	0,3	8,4
13	МЛТ-0,25	0,4	43	0,5	0,61	5	0,4	2,2
14	МЛТ-2	0,6	43	0,5	0,68	4	0,7	2,7
15	СПЗ-16	1,2	43	0,5	0,68	4	1,3	5,4
16	РЭС-47	1,6	43	0,1	0,85	4	2,2	9,0
17	ОНЦ-ВГ-4-5	0,14	35	—	—	1	0,2	0,2
18	Соединители	0,14	43	—	—	6	0,2	1,4
19	Микротумблер МТ-3	3	43	—	—	2	4,9	9,9
20	Печатная плата	0,7	43	—	—	4	1,1	4,6
21	Трансформатор	0,4	43	0,7	0,91	1	0,6	0,6

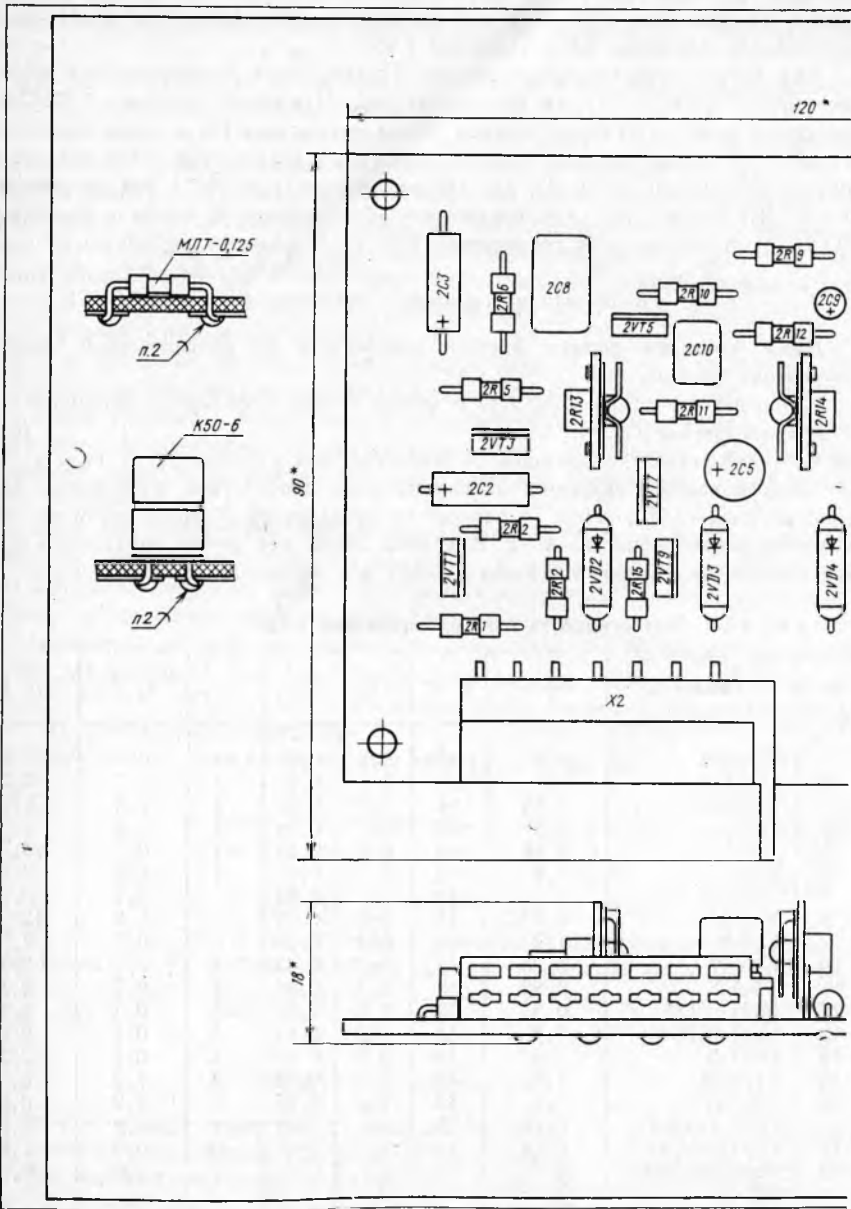
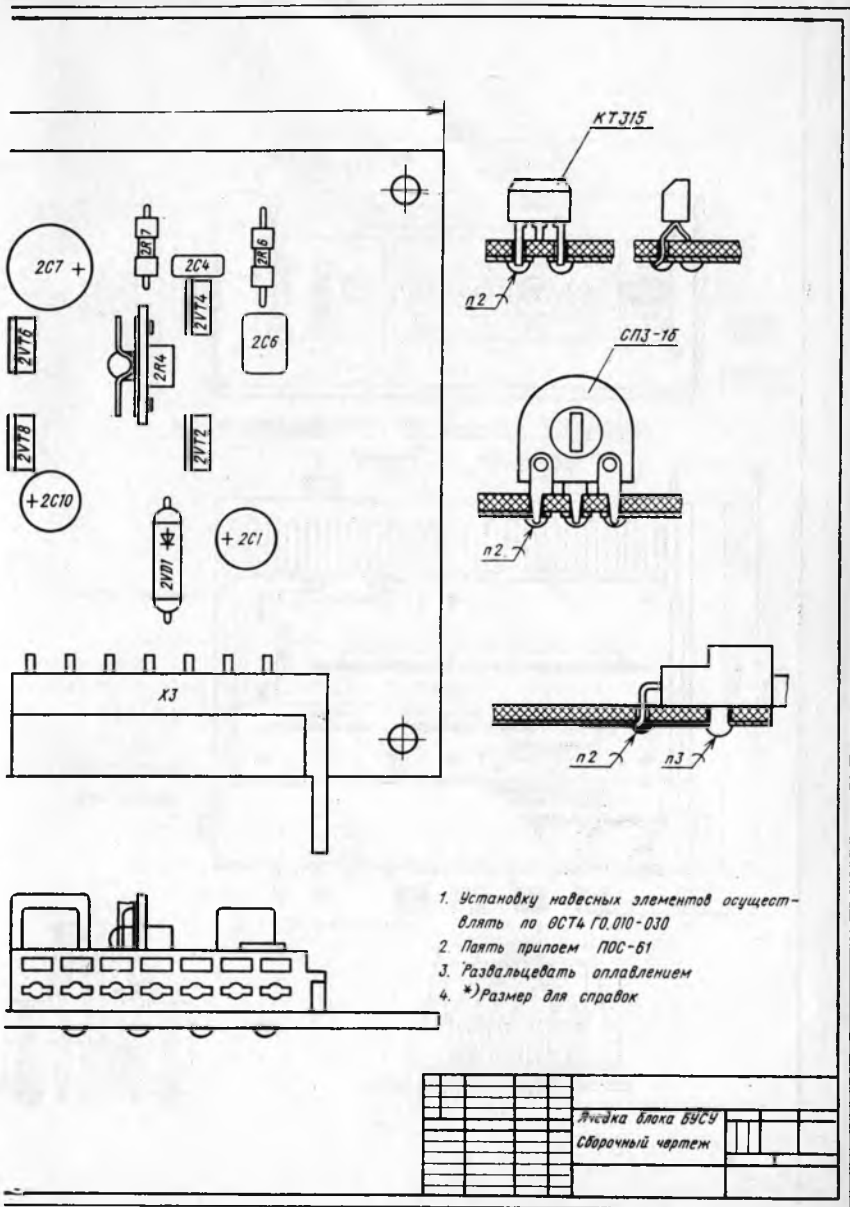


Рис. 6.3. Сборочный чертеж ячейки БУСУ



1. Установка навесных элементов осуществ-
лять по ГОСТ 4 ГО.010-030
2. Паять припоем ПОС-61
3. Развальцевать оплавлением
4. *) Размер для справок

Листок блока БУСУ
Сборочный чертеж

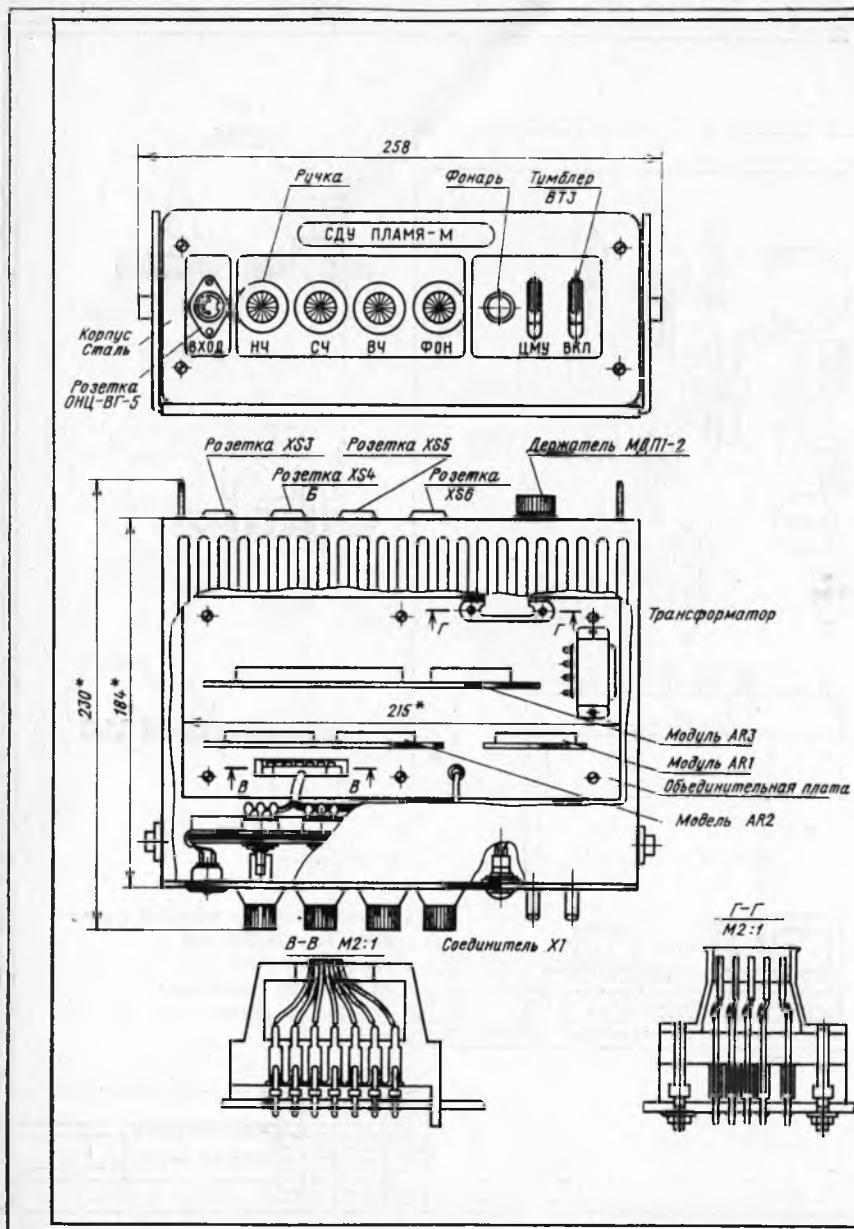


Рис. 6.4. Чертеж общего вида БУСУ

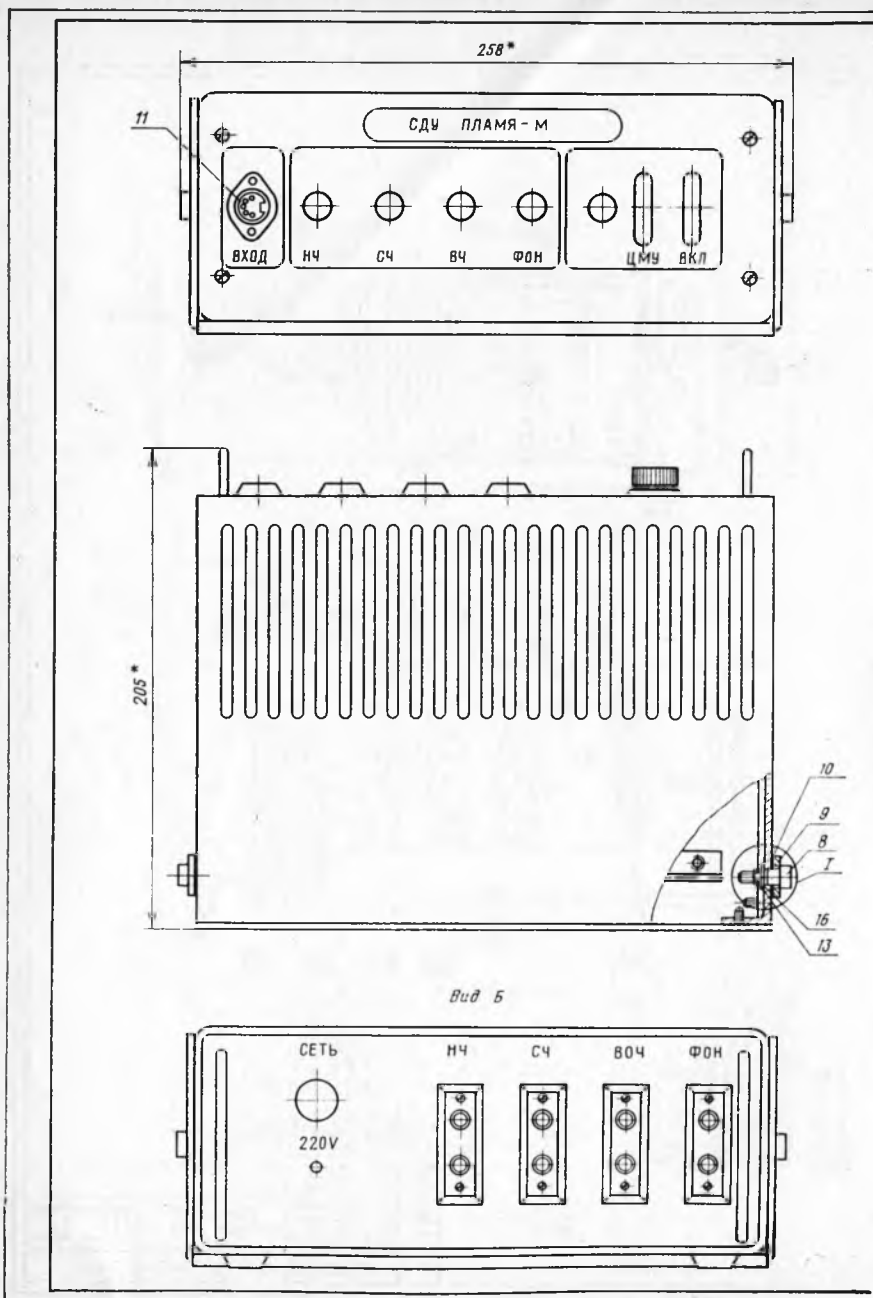


Рис. 6.5. Сборочный чертеж БУСУ

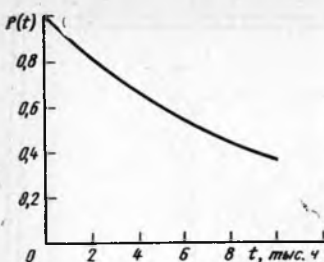


Рис. 6.6. Зависимость вероятности безотказной работы БУСУ от времени

Составляем свободную таблицу данных (табл. 6.1).

Определяем интенсивность отказов всего блока:

$$\lambda_{\text{бл}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i N_i = 99,1 \cdot 10^{-6}, \text{ 1/ч.} \quad (6.3)$$

Вычисляем вероятность отказов блока через 10 000 ч.

Результаты представляем в виде графика (рис. 6.6).

Находим среднее время наработки блока на отказ

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\text{бл}}} = \frac{1}{99,1 \cdot 10^{-6}} = 10\,090,8 \text{ ч.} \quad (6.4)$$

Среднее время наработки блока на отказ соответствует заданному в техническом задании, следовательно, требования надежности выполнены.

Далее сделана оценка технологичности и уровня миниатюризации БУСУ. Основным показателем, используемым для оценки технологичности конструкции, является комплексный показатель технологичности K .

Изделие относится по ОСТ 4ГО 091.219 к электронным блокам.

Определяем коэффициент автоматизации и механизации монтажа изделия:

$$K_{\text{а.м}} = N_{\text{а.м}} / N_{\text{м}},$$

где $N_{\text{м}}$ — общее число монтажных соединений; $N_{\text{а.м}}$ — число соединений, полученных автоматизированным способом:

$$K_{\text{а.м}} = 483 / 558 = 0,86.$$

Определяем коэффициент механизации подготовки ЭРЭ к монтажу:

$$K_{\text{м.пЭРЭ}} = N_{\text{м.пЭРЭ}} / N_{\text{мЭРЭ}},$$

где $N_{\text{м.пЭРЭ}}$ — число ЭРЭ, подготовленных к монтажу механизированным способом; $N_{\text{мЭРЭ}}$ — число монтажных ЭРЭ;

$$K_{\text{мЭРЭ}} = 86 / 112 = 0,78.$$

Вычисляем коэффициент механизации контроля и настройки:

$$K_{\text{м.к.н}} = N_{\text{м.к.н}} / N_{\text{к.н}} = 9 / 12 = 0,75.$$

Находим коэффициент повторности ЭРЭ:

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

где $H_{\text{т ЭРЭ}}$ — число применяемых типов ЭРЭ; $H_{\text{ЭРЭ}}$ — число применяемых ЭРЭ;

$$K_{\text{пов ЭРЭ}} = 1 - 17/116 = 0,85.$$

Определяем коэффициент применяемости ЭРЭ:

$$K_{\text{пр ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{тпр ЭРЭ}}/H_{\text{т ЭРЭ}},$$

где $H_{\text{т ЭРЭ}}$ — число типов ЭРЭ; $H_{\text{тпр ЭРЭ}}$ — число типов применяемых ЭРЭ;

$$K_{\text{пр ЭРЭ}} = 1 - 7/17 = 0,59.$$

Получаем комплексный показатель технологичности конструкции изделия

$$K = \frac{0,86 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 0,75 + 0,75 \cdot 0,5 + 0,85 \cdot 0,3 + 0,59 \cdot 0,187}{1,0 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187} = 0,8.$$

Таким образом, достигнутый уровень технологичности конструкции превышает заданный.

Обеспечение требуемого уровня миниатюризации изделия является одним из основных требований обеспечения его эффективности.

Вычисляем коэффициент применяемости модулей k -го поколения:

$$K_{\text{пр.к}} = \frac{N_{\text{э ис}}}{N_{\text{э ис}} + N_{\text{ЭРЭ}}},$$

где $N_{\text{э ис}}$ — число элементов, используемых в модуле k -го поколения; $N_{\text{ЭРЭ}}$ — общее число используемых ЭРЭ;

В разрабатываемом блоке используется элементная база 2-го поколения:

$$K_{\text{пр.к}} = \frac{116}{116 + 1162} = 0,3.$$

Определяем коэффициент заполнения объема $K_{\text{з.о}} = V_{\text{полезн}}/V_{\text{общ}}$, где $V_{\text{полезн}}$ — объем, занимаемый ЭРЭ:

$$K_{\text{з.о}} = 0,002462/0,003888 = 0,63.$$

Находим показатель качества РЭА:

$$F_k = \sum_{j=1}^n \frac{\bar{y}_{j \text{ БИС}}}{\bar{y}_{jk}} \varphi_{jk},$$

где φ_{jk} — весовой показатель; \bar{y}_{jk} — показатель качества. Используем следующие показатели: $\bar{y}_{1к}$ — масса; $\bar{y}_{2к}$ — объем; $\bar{y}_{3к}$ — энергопотребление; $\bar{y}_{4к}$ — надежность; $\bar{y}_{5к}$ — стоимость.

Для разрабатываемого блока РЭА на элементной базе 2-го поколения имеем: $\bar{y}_{12} = 1,5$; $\bar{y}_{22} = 3,9 \cdot 10^{-3}$; $\bar{y}_{32} = 0,5$; $\bar{y}_{42} = 25$; $\bar{y}_{52} = 9,2$.

Для блока, выполненного на СБИС: $\bar{y}_{1\text{СБИС}} = 0,8$; $\bar{y}_{2\text{СБИС}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$;

$\bar{y}_{3\text{СБИС}} = 0,15$; $\bar{y}_{4\text{СБИС}} = 11,6$; $\bar{y}_{5\text{СБИС}} = 30$.

Определяем весовые коэффициенты:

$$\varphi_n = \frac{1}{1 + (1/n) (1/\sigma_1 + 1/\sigma_2 + 1/\sigma_3 + 1/\sigma_4)},$$

где n — кратность резервирования;

$$n = \left| \frac{\ln(\lambda_{\min} \text{ БИС}^t)}{\ln(\lambda_{\max}^t)} \right| = \frac{7 \ln 10}{\ln(99,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5)} = 7,02;$$

σ_i — коэффициенты, учитывающие изменение величин при резервировании: $\sigma_1 = 1,12$; $\sigma_2 = 1,1$; $\sigma_3 = 10$; $\sigma_4 = 10,5$. Тогда

$$\varphi_n = \frac{1}{1 + \frac{1}{7,02} \left(\frac{1}{1,12} + \frac{1}{1,1} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10,5} \right)} = 0,78;$$

$$\varphi_M = \frac{\varphi_n}{n \sigma_1} = \frac{0,78}{7,02 \cdot 1,12} = 0,1;$$

$$\varphi_O = \frac{\varphi_n}{n \sigma_2} = \frac{0,78}{7,02 \cdot 1,1} = 0,1;$$

$$\varphi_W = \frac{\varphi_n}{\eta \sigma_3} = \frac{0,178}{7,02 \cdot 10} = 0,01;$$

$$\varphi_C = \frac{\varphi_n}{n \sigma_4} = \frac{0,78}{7,02 \cdot 10,5} = 0,01.$$

Находим коэффициент качества:

$$F_K = \frac{0,8}{1,5} 0,1 + \frac{1,2}{3,9} 0,1 + \frac{0,15}{0,5} 0,01 + \frac{92}{11,6} 0,78 + \frac{30}{25} 0,01 = 0,072.$$

Определяем коэффициент миниатюризации: $\mu = 0,63 \cdot 0,3 \cdot 0,072 = 0,014$.

Коэффициент миниатюризации удовлетворяет техническому заданию.

Объем 4-го раздела составил 20 стр.

6.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЛОКА СВЧ

1. Тема проекта: Проектирование широкополосного усилителя (ШУ).

2. Исходные данные к проекту: схема электрическая принципиальная ШУ. Группа РЭА — самолетная. Тип производства — единичное. Показатели надежности: $P(100 \text{ ч}) \geq 0,9$.

3. Объем и содержание графических работ:

Широкополосный усилитель. Сх. эл. принц. — 1 л. (A1).

Широкополосный усилитель. Общий вид. — 2 л. (A1).

Плата усилителя. Сб. чертеж — 1 л. (A1).

Топология платы усилителя — 1 л. (A1).

4. Объем и содержание расчетно-пояснительной записки:

1. Анализ технического задания — 10 ... 15 стр.

2. Предварительная компоновка — 15 ... 20 стр.

3. Окончательная разработка и описание конструкции — 20 ... 25 стр.

5. Дополнительные указания к проекту: произвести расчет и спроектировать систему жидкостного термостатирования.

1. Анализ технического задания, электрической схемы и элементной базы

Расширенное техническое задание на проектируемый модуль представляет собой следующее:

1. Наименование изделия: широкополосный усилитель.
2. Назначение изделия: блок для работы в составе передающего устройства.
3. Комплектность изделия: один блок.
4. Технические параметры, характеризующие основные свойства изделия: напряжение питания блока $U_{пит1} = +24$ В; $U_{пит2} = +15$ В, $U_{пит3} = -15$ В; диапазон рабочих частот $f_{раб} = 1-5$ ГГц; потребляемая мощность $P = 20$ Вт; коэффициент усиления $K_y = 30$ дБ.
5. Уровень унификации $K_{ун} \geq 0,7$.
6. Требования к конструкции:

габаритные размеры блока не более $380 \times 130 \times 110$ мм;

масса блока не должна превышать 1,5 кг;

тепловыделение блока не более 9,5 Вт;

конструкция блока должна обеспечивать возможность использования жидкостного термостатирования; температура жидкостного термостатирования 45 ... 75°C.

7. Хранение и перевозка. Изделие транспортируется в упаковке автомобильным, железнодорожным, водным и воздушным транспортом. Условия транспортирования — средние (СТ). Хранение изделия осуществляется в упаковке предприятия-изготовителя. Условия хранения — средние по ГОСТ 15150—69.

8. Характеристики внешних воздействий:

температура окружающей среды —60 ... +70°C;

относительная влажность воздуха 98 % при температуре +30°C;

вибрации в диапазоне частот 10 ... 300 Гц с ускорением до 3g;

ударное воздействие с пиковым ускорением до 6g при длительности ударного импульса 20 мс;

атмосферное давление воздуха не ниже 22,4 кПа.

9. Вероятность безотказной работы блока должна быть не менее 0,9 за время непрерывной работы 100 ч.

10. Объем производства — 10 шт. в год. Себестоимость блока должна быть не более 3000 руб.

В разделе проведен анализ электрической принципиальной схемы модуля, чертеж которой приведен на 1-м листе графической части проекта (рис. 6.7).

Электрическую принципиальную схему усилителя можно разбить на ряд узлов: три каскада усилителей; усилитель функционального контроля; детекторное устройство; усилитель-преобразователь; ограничитель мощности.

Усилитель работает в импульсном режиме. Сигнал поступает на вход детекторного устройства и снимается с выхода ограничителя мощности. Централь-

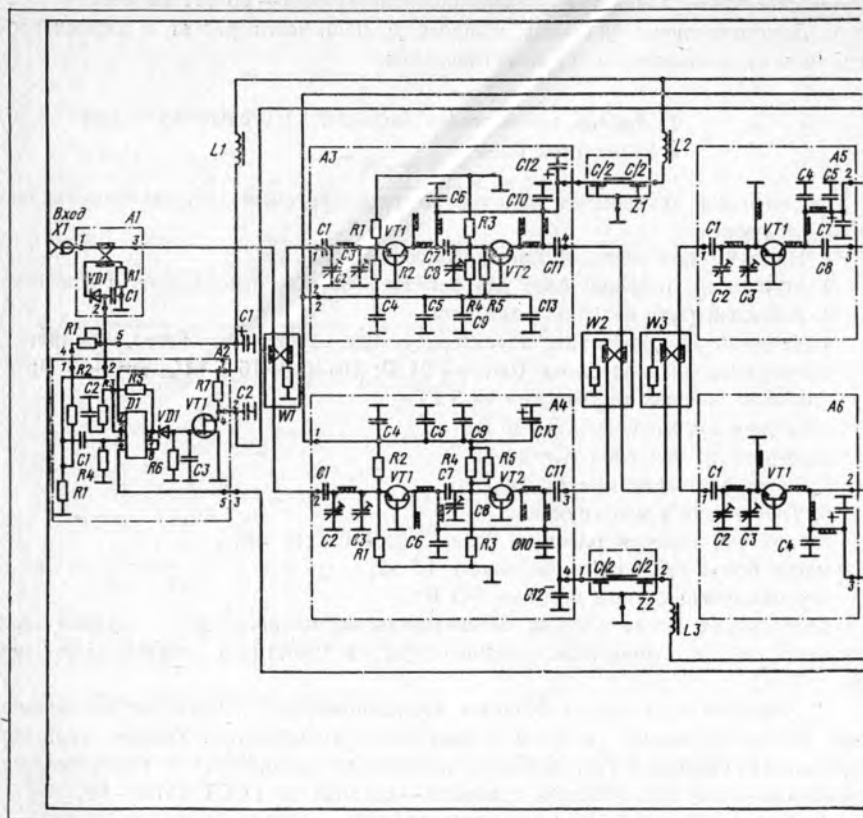
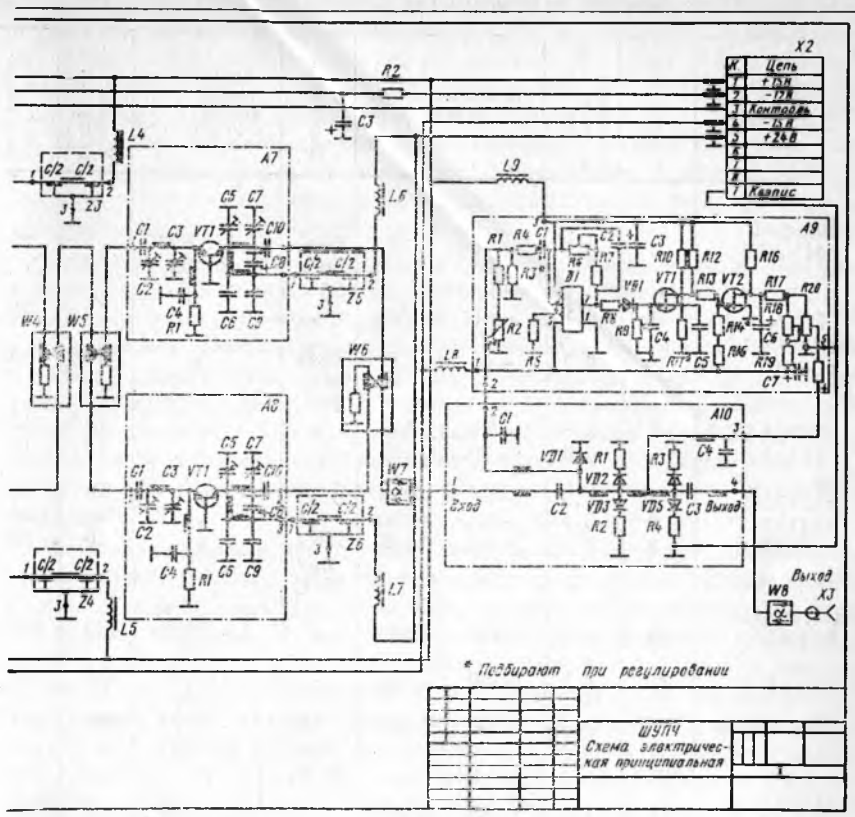


Рис. 6.7. Схема электрическая принципиальная

ное место занимает трехкаскадный балансный усилитель. Применение балансных усилителей позволяет уменьшить взаимное влияние отдельных каскадов и повысить устойчивость схемы.

Высокочастотный сигнал, поступающий на вход детекторного устройства A1, через направленный ответвитель подается на диод VD1, который осуществляет детектирование. После этого уже низкочастотный сигнал поступает на усилитель функционального контроля A2, где импульсы преобразуются в постоянное напряжение. Усилитель функционального контроля служит для контроля наличия входного сигнала с помощью индикаторной лампочки, которая загорается при его появлении.

Ограничитель мощности служит для ограничения уровня сигнала, подаваемого на выход модуля, до значения 2 Вт. На вход A10 поступает амплитудно-импульсно-модулированный сигнал, который проходит через последовательный фильтр.



широкополосного усилителя

Усилитель-преобразователь А9 управляет работой ограничителя мощности. Далее проведен анализ элементной базы блока, данные которого сведены в табл. 6.2.

Из анализа элементной базы сделан вывод, что без дополнительных мероприятий нельзя обеспечить нормальный тепловой режим работы модуля.

Объем 1-го раздела составил 12 страниц.

2. Предварительная компоновка и разработка конструкции блока

Широкополосный усилитель работает в диапазоне частот 1 ... 5 ГГц. Это сантиметровый поддиапазон СВЧ. Конструирование СВЧ-устройств имеет особенности как конструктивного, так и физического характера. Параметры элементов и узлов определяются структурой электромагнитного поля, что требует от конструкции выполнения условий, обеспечивающих стабильное возбуждение

Таблица 6.2. Элементная база усилителя

Тип элемента	Количество	Интенсивность отказа, $\lambda_0, 10^3, 1/ч$	Диапазон температур, °С	Влажность	Вибрации в диапазоне частот, Гц, с ускорением	Ударные перегрузки, g	Линейные ускорения, g
Микросхемы: 544УД2Б	1	0,3	-40...+70	98% при 25°С	1...600 до 10g	75	25
574УД1Б	1	0,7	-45...+70	"	"	75	25
Транзисторы: 2П303Е	3	0,7	-60...+125	98% при 40°С	"	15	15
2Т938А-2	6	0,5	-60...+125	"	"	15	15
2Т919А	2	0,5	-60...+125	"	"	15	15
Диоды: 2А517А-2	4	0,8	-60...+125	"	"	20	20
3А112А	2	0,1	-60...+100	"	"	20	20
2Д522Б	2	2	-60...+125	98% при 35°С	"	15	20
Конденсаторы: К53-4А	15	0,6	-60...+85	"	1...3000 до 20g	150	200
К10-17	45	0,1	-60...+125	"	1...5000 до 40g	150	500
Катушки индуктивности	9	0,1	-60...+125	98% при 20°С	1...3000 до 20g	1000	100
Резисторы: СП5-24	1	1,3	-60...+80	"	5...2500 до 20g	20	30
С2-23	31	5	-60...+155	"	10...2000 до 20g	20	30
С2-10	6	5	-60...+150	"	"	20	30
СП4-1в	1	0,7	-60...+80	"	1...2000 до 20g	20	30
СП5-16ВЛ	2	0,8	-60...+80	"	5...2500 до 20g	20	30
СТ3-17	1	0,5	-60...+120	"	10...2000 до 20g	20	20
Прибор ФПВН-2Б	2	0,1	-40...+80	"	1...600 до 10g	15	15
Фильтр Б23А	6	0,3	-60...+125	98% при 40°С	5...600 до 10g	15	20
Соединители: СРГ-50	2	5,2	-60...+75	"	5...2000 до 30g	20	20
РП-15	1	0,5	-60...+85	"	10...200 до 5g	25	20

нужной структуры поля. Основные характеристики находятся в прямой зависимости от геометрических размеров конструкции, что часто вызывает необходимость применения жестких допусков при изготовлении. Способность к интенсивному излучению, вредное биологическое влияние вызывают необходимость предъявления особо жестких требований к электрогерметичности.

Невысокий уровень мощности и используемый рабочий диапазон частот позволяют выполнить модуль на микрополосковых линиях передачи, комбинируя элементы с сосредоточенными и распределенными параметрами. Это приводит к уменьшению массы и габаритов модуля.

Основой конструкции усилителя служит микрополосковая плата. Между платами, установленными в корпус, электрическая связь осуществляется с помощью ленточных перемычек из фольги. Необходимость соблюдения однородности СВЧ-тракта предъявляет жесткие требования к взаимному расположению выходных микрополосков сопрягаемых функциональных узлов СВЧ. Соединение отдельных модулей между собой осуществляется с помощью коаксиально-полосковых переходов типа СРГ-50 и радиочастотных кабелей типа РК-50. Для подвода питания и вывода низкочастотных сигналов используются выводы типа «слезка». Для подключения блока к источнику питания можно использовать соединитель РП-15.

Важным является вопрос о числе плат, на которых будут размещены элементы устройства. Ранее электрическая принципиальная схема блока была разбита на отдельные функциональные узлы, которые будем размещать на отдельных платах. Это позволит выделить НЧ- и СВЧ-узлы, разделить вход и выход блока для устранения взаимного влияния, обеспечить контроль и настройку отдельных узлов до окончательной сборки. Основная часть блока — усилители по балансной схеме. Каждый усилитель состоит из делителя и сумматора мощности и двух каналов усиления на транзисторах. Каналы усиления целесообразно расположить на двух платах зеркально симметрично. Делитель и сумматор мощности представляют собой направленные ответвители на связанных линиях, которые будем располагать на отдельных платах. Таким образом, все элементы блока размещаются на 16 отдельных платах.

К корпусу блока усилителя предъявляются высокие требования. Он должен обеспечивать: жесткое закрепление плат и соединение их выводов с переходами, предназначенными для связи с внешними цепями; защиту плат и ЭРЭ от внешних климатических, механических и других воздействий; экранирование схемы от внешних электромагнитных излучений и наводок; подавление возможных СВЧ-излучений в окружающую среду; теплоотвод от внутренних участков модуля, в которых рассеивается значительная тепловая энергия. Кроме того, корпус должен быть технологичным, экономически выгодным, обеспечивать возможность сборки схемы, контроль, надстройку, ремонт.

При выборе материала корпуса необходимо учитывать требования уменьшения массы, снижения стоимости изготовления, соответствия температурных коэффициентов линейного расширения материалов корпуса и плат, возможность пайки и хорошую теплопроводность.

По типу конструкции корпуса подразделяются на коробчатые, рамочные, пенальные, пластинчатые, составные и др. [23]. Для данного блока выбираем

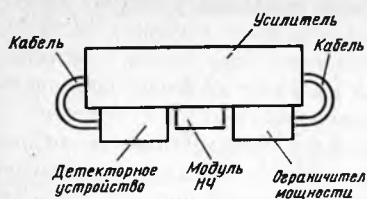


Рис. 6.8. Компоновочный эскиз блока усилителя

коробчатый корпус. В таком корпусе легко реализовать жидкостное термостатирование в соответствии с требованием технического задания.

Так как в одном корпусе нельзя разместить все платы, что объясняется ограниченными габаритами и тем, что не все узлы требуют герметизации и термостатирования, разделим блок на отдельные модули. Каждый модуль имеет свой корпус. Компоновочный эскиз блока приведен на рис. 6.8. В большом корпусе размещены все усилители СВЧ, в маленьких корпусах — детекторное устройство и ограничитель мощности. Низкочастотная часть вынесена отдельно и закрывается кожухом.

Далее рассматриваются методы защиты блока от внешних дестабилизирующих факторов. С учетом анализа условий эксплуатаций блока и существующих конструкций аналогичных устройств можно сделать вывод, что для защиты элементов конструкции от воздействия внешних факторов необходима общая герметизация. Внутри герметизированного корпуса создается благоприятный микроклимат для нормального функционирования изделия. Герметизация маленьких типовых корпусов осуществляется сваркой основания и крышек корпусов. Вскрытие таких корпусов возможно путем механического снятия сварного шва. Этот способ широко используется для герметизации корпусов микросборок. Герметизация большого корпуса производится пайкой по контуру крышки и коаксиальных переходов. При проведении герметизации воздух из корпуса откачивается через штенгель, затем через него же вводится инертный газ, а штенгель зачеканивается. Воздух корпуса откачивается до давления $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Корпус заполняется смесью газов гелия и аргона в соотношении 1:1 по объему до давления 0,05 ... 0,1 кг/см².

Выбор материалов и покрытий. Прежде всего необходимо выбрать материал подложек микрополосковых плат. Для плат усилителей выбираем органический диэлектрик ФАФ-40 — фторопласт армированный, фольгированный (ГОСТ 21000—81), имеющий следующие характеристики: $\epsilon_r = 2,5$; $\text{tg } \delta = 7 \cdot 10^{-4}$; диапазон рабочих температур от -60 ... $+250$ °С. Платы ограничителя мощности и детекторного устройства выполняются на подложках из поликора. Направленные ответвители выполняются на подложках из ситалла СТ-38. Для низкочастотных плат используется стеклотекстолит.

В качестве материала несущих конструкций блока выбирается алюминиевый сплав Д16. Этот материал обеспечивает достаточную герметичность, хорошо обрабатывается, легок и дешев.

Основания для плат усилителей и ответвителей, а также общее основание изготавливают из сплава АМг ГОСТ 4784—74. Типовые маленькие корпуса изготовлены из титанового сплава ВТ1 ОСТ 190013—71.

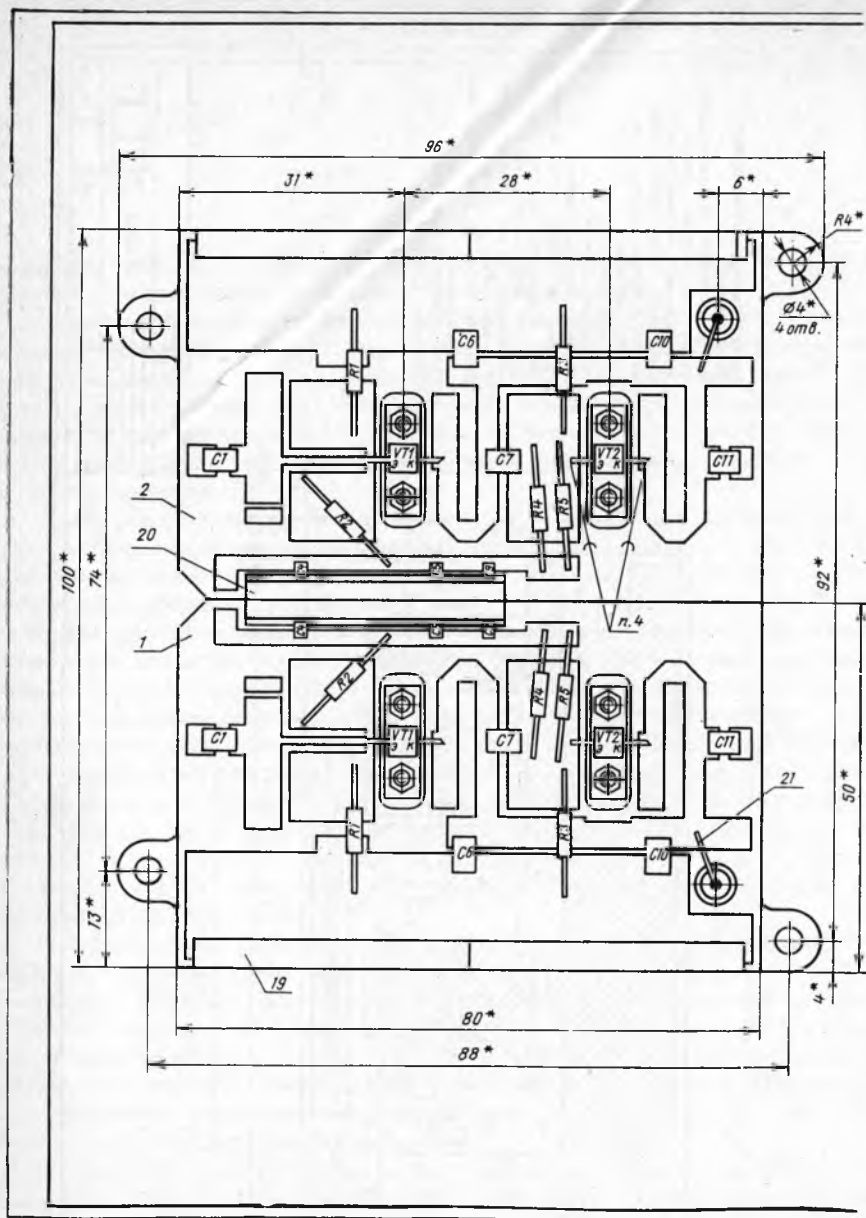


Рис. 6.10. Ячейка усилителя

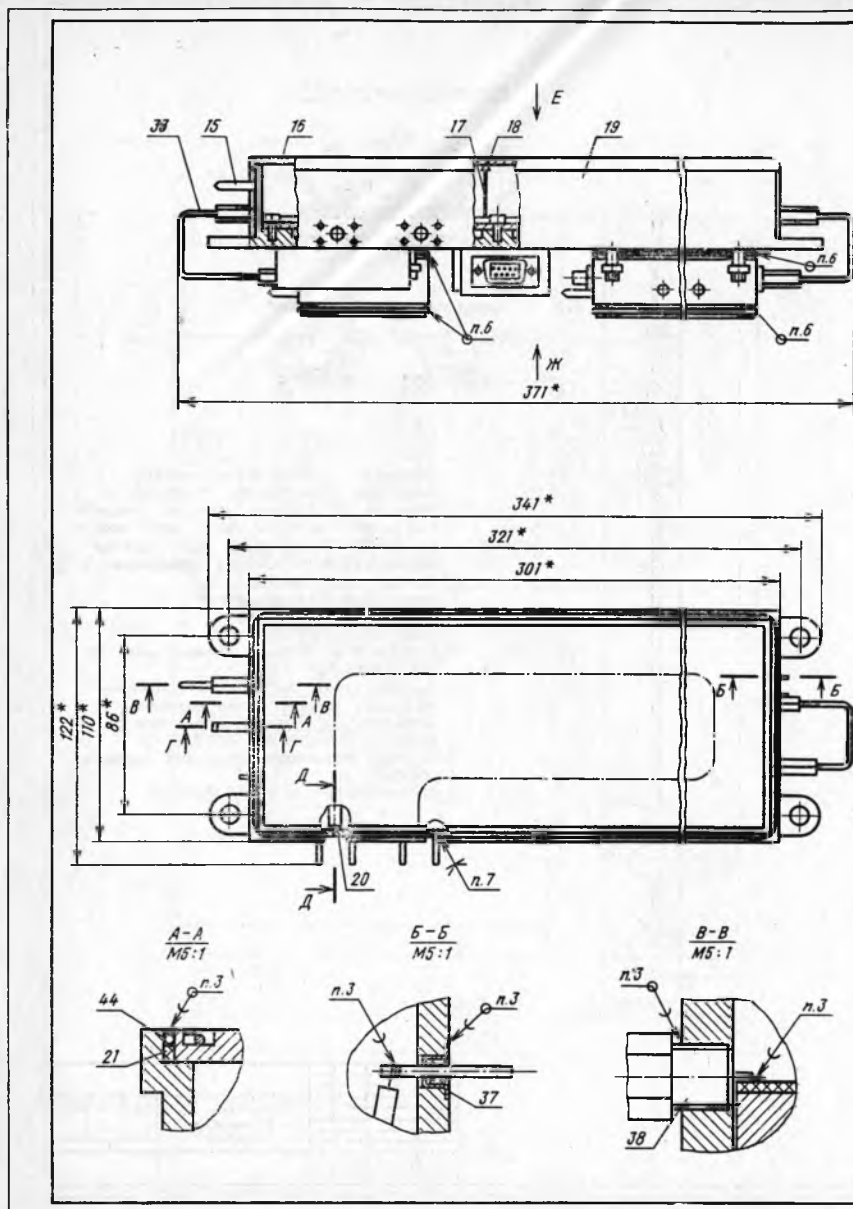
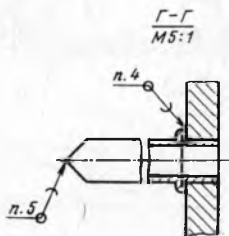
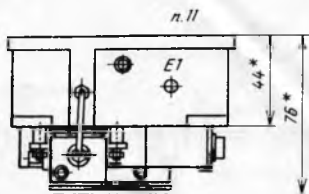
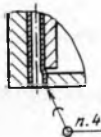


Рис. 6.11. Чертеж общего вида широкополосного усилителя (лист. 1)



Д-Д

M2:1



- 1.* Размеры для справок
2. ПрМТ 45 ОСТ 4Г 0.033.200
3. ПОСК 50-18 ГОСТ 21930-76
4. ПОС 61 ГОСТ 21930-76
5. Произвести холодную сварку и опаять ПОС-61 ГОСТ 21930-76
6. Сварка микроплазменная. Варить после настройки
7. Клей К-400, состав 1, ОСТ 4Г 0.029.204
8. Изделие должно быть герметичным. Допустимая скорость натекания не более $1 \cdot 10^{-5}$ л/мм рт.ст./с. Контроль герметичности и заполнение инертным газом проводить согласно инструкции
9. Требования к качеству паяных швов по ОСТ 4Г 0.054.035
10. Электрический монтаж производить согласно схеме электрической принципиальной
11. Маркировать краской МКЗ4 черной по ОСТ 4Г 0.054.205. Лак ЭП-730 УХЛ2. Шрифт 3 по НО.010.007
12. Остальные ТТ по ОСТ 4Г 0.070.015

ШУПЧ	
чертеж	
общего вида	

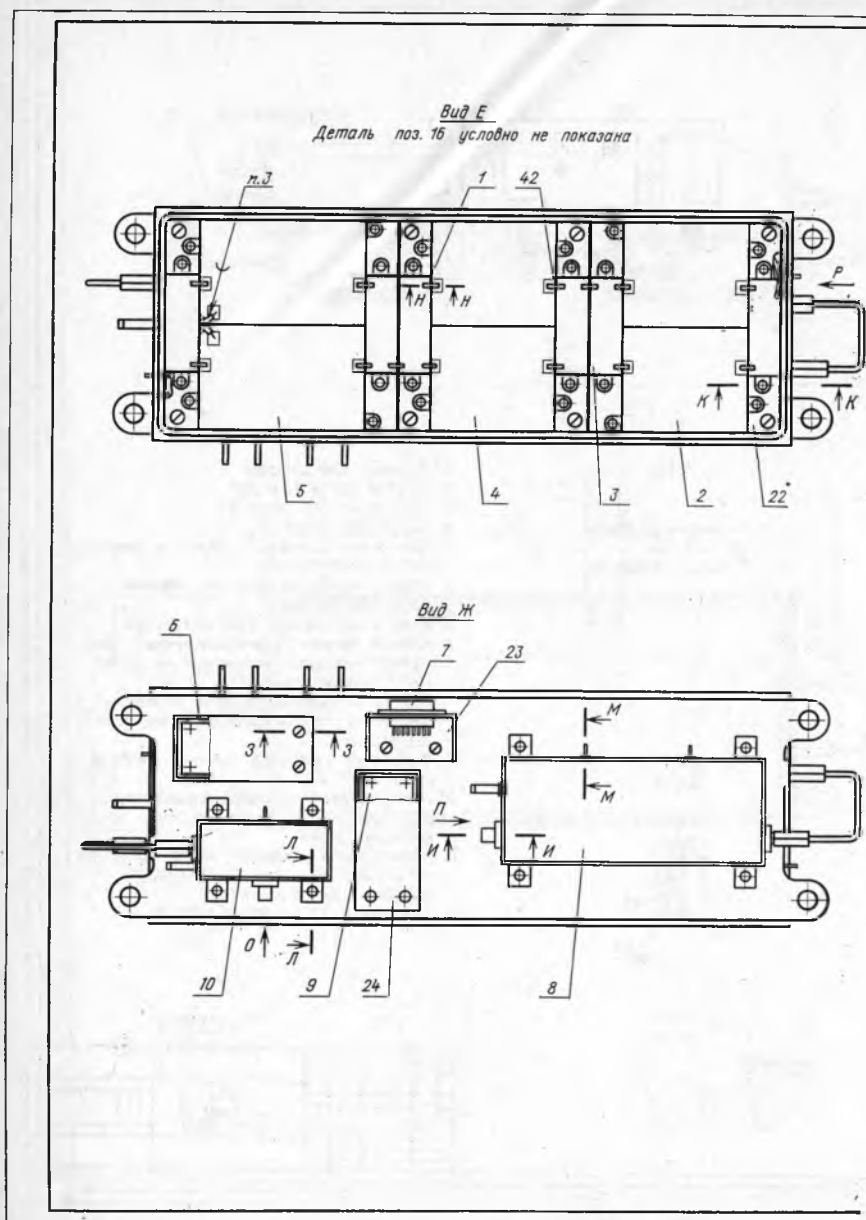
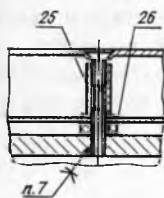
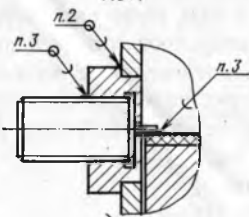


Рис. 6.12. Чертеж общего вида широкополосного усилителя (лист 2)

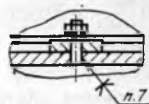
Г-Г
M2:1



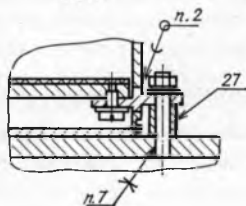
И-И
M5:1



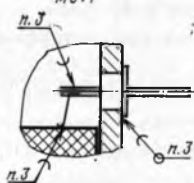
К-К
M2:1



Л-Л повернута
M2:1



М-М повернута
M5:1



Н-Н
M5:1



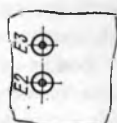
Вид О
M2:1



Вид П
M2:1



Вид Р
M2:1



Для защиты материалов от атмосферных воздействий необходимы покрытия. На проводники микрополосковых плат усилителей наносим защитное антикоррозионное покрытие олово-свинец методом гальванического осаждения. Для корпуса используем покрытие Хим. Н12.М3.0 — Ви (99,7) 12 — покрытие химическое, никель 12 мкм, медь 3 мкм, олово-висмут (99,7 % олова).

С целью обеспечения вибропрочности и повышения жесткости конструкции микрополосковые платы припаиваются к металлическому основанию, которое затем закрепляется в четырех точках. Вибропрочность подтверждена расчетом микрополосковой платы на действие вибрации. Исходные данные для расчета:

- размер платы 100×80 мм;
- толщина платы — 2,5 мм;
- модуль упругости $3 \cdot 10^{11}$ Па;
- коэффициент Пуассона — 0,3;
- масса платы — 100 г;
- закрепление в четырех точках.

При этом частота собственных колебаний равна 2359 Гц. В диапазоне частот вибрации 10 ... 300 Гц с перегрузкой до 3g максимальное виброускорение составляет 3g, а прогиб менее $8 \cdot 10^{-9}$ мм.

Общий объем данного раздела составил 18 стр.

3. Окончательная разработка и описание конструкции блока

Основой конструкции блока является микрополосковая плата. Разработка топологии производится в соответствии с ОСТ 4.ГО.010.202 и включает следующие этапы:

- разработка схемы соединений пленочных элементов на плате, т. е. выбор взаимного расположения линий, резисторов, конденсаторов и т. д.;
- расчет геометрических размеров микрополосковых элементов;
- выбор формы и размещения пленочных элементов на рабочей площадке подложки;
- оценка качества разработанной топологии и при необходимости проведение соответствующих ее корректировок.

В разделе сделан расчет геометрических размеров микрополосковых линий, резисторов и емкостей с распределенными параметрами. Затем с учетом геометрических размеров проведена топология платы, чертеж которой приведен на рис. 6.9. Сборочный чертеж платы усилителя дан на рис. 6.10.

На рис. 6.11 и 6.12 приведен чертеж общего вида блока широкополосного усилителя. Корпус усилителя имеет довольно сложную форму и изготавливается фрезерованием. В корпус устанавливается общее основание, на котором закреплены функциональные узлы.

Электрическое соединение линий, расположенных на разных подложках, осуществляется с помощью перемычек из фольги ДПРНТ 0,05 М1 ГОСТ 5638—75. Пайка перемычек осуществляется припоем ПОСК 50-18 ГОСТ 21930—76. Соединение модулей в один блок производится с помощью полужесткого кабеля типа РК50-2-25 ГОСТ 11326.35—79, который предназначен для миниатюрных СВЧ-устройств. Кабель присоединяется к коаксиально-полосковым переходам СРГ-50-751ФВ. Переходы устанавливаются в корпуса и оплавляются по контуру для обеспечения герметичности. Тип припоя — ПОСК 50-18 ГОСТ 21930—76.

Таблица 6.3. Зависимость t_y от t_0

$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_y, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_y, ^\circ\text{C}$
-60	-43	10	30
-50	-30	20	39
-40	-19	30	48
-30	-8	40	57
-20	2	50	67
-10	11	60	77
0	20	70	87

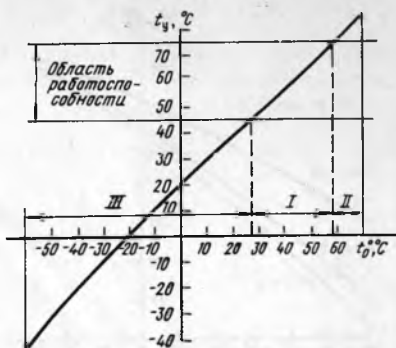


Рис. 6.13. Зависимость t_y от t_0

Подключение блока к источнику питания осуществляется с помощью вилки РП15-9ШВВ. Подвод питания к элементам производится проводом МЛТПЭ. Для облегчения монтажных работ провода имеют разную окраску.

Важным вопросом является проектирование жидкостной системы термостатирования. Без учета термостатирования изменение температуры платы усилителя t_y в зависимости от температуры окружающей среды t_0 просчитано на ЭВМ, а результаты занесены в табл. 6.3.

По данным табл. 6.3 построен график (рис. 6.13). Определим температуру жидкости, которая необходима для поддержания температуры платы усилителя в диапазоне 45 ... 75°C; на графике этот диапазон выделен.

На графике можно выделить три участка:

- 1 — температура платы находится в заданном диапазоне (45 ... 75)°C, термостатирование не нужно;
- 2 — температура платы более +75°C, необходимо охлаждение блока;
- 3 — температура платы ниже +45°C, необходим подогрев блока.

В качестве жидкости для термостатирования используем незамерзающий при низких температурах антифриз марки 65, для которого значения плотности ρ , удельной теплоемкости C_p , теплопроводности λ , кинематической вязкости ν и коэффициента объемного расширения β в зависимости от абсолютной температуры T можно вычислить по следующим формулам:

при низких температурах антифриз марки 65, для которого значения плотности

$$\rho = 1320 - 0,96 T + 1,05 \cdot 10^{-3} T^2 - 1,3 \cdot 10^{-6} T^3,$$

$$C_p = 1,133 + 5 \cdot 10^{-3} T + 4,4 \cdot 10^{-6} T^2,$$

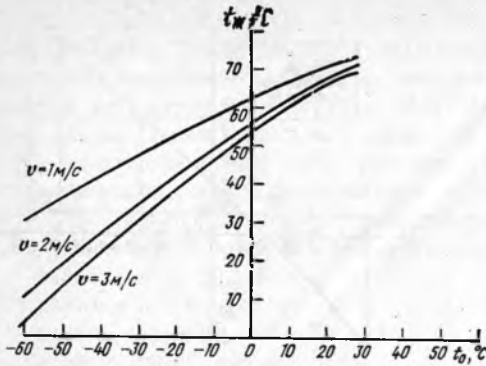
$$\lambda = 1,05 - 8,23 \cdot 10^{-3} T + 2,97 \cdot 10^{-5} T^2 - 3,38 \cdot 10^{-8} T^3,$$

$$\nu 10^6 = (-2,664 + 3,763 \cdot 10^{-2} T - 1,773 \cdot 10^{-4} T^2 + 2,787 \cdot 10^{-7} T^3) - 1,$$

$$\beta 10^4 = 3,765 + 2,04 \cdot 10^{-2} T - 5,72 \cdot 10^{-5} T^2 + 6,508 \cdot 10^{-8} T^3.$$

С использованием этих данных определена температура подогретой жидкости $t_{ж}$ в зависимости от t_0 для трех значений скорости движения в трубке $u_{ж} =$

Рис. 6.14. Зависимость $t_{ж}$ от t_0



$=1, 2, 3$ м/с. Графики $t_{ж}(t_0, v_{ж})$ приведены на рис. 6.14. Таким образом, обеспечено жидкостное термостатирование блока.

Далее решены вопросы обеспечения электромагнитной совместимости отдельных узлов блока. Для этой цели в блоке предусмотрены электромагнитные экраны. Расчет экранного затухания произведен на ЭВМ. Исходные данные:

- относительная магнитная проницаемость материала экрана $\mu_r=1$;
- толщина экрана 3 мм;
- проводимость материала экрана $\sigma=3,6 \cdot 10^7$ См/м;
- диапазон частот помехи 1 ... 5 ГГц;
- расстояние между стенками экрана 0,1 мм.

В результате расчета оказалось, что экранное затухание превышает 700 дБ, что обеспечивает требуемую помехозащищенность.

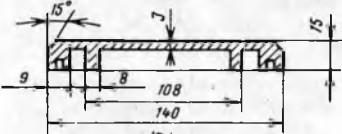
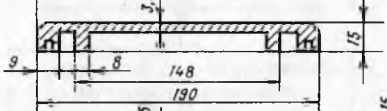
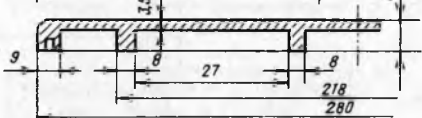
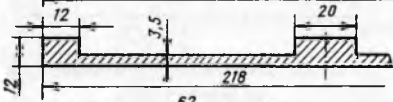
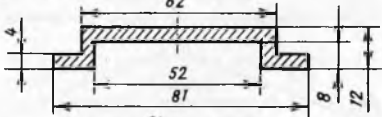
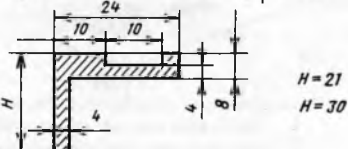
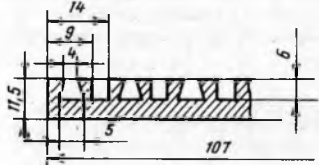
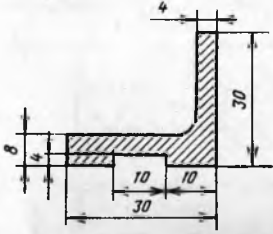
Для облегчения сборки, эксплуатации и ремонта блока выполняется маркировка, указывающая вход и выход, номера выводов. Маркировка изделия выполняется черной краской МКЭ4 по ОСТ 4.ГО.054.205.

В заключение проведен анализ надежности блока широкополосного усилителя. Расчет надежности был произведен в соответствии с рекомендуемой методикой. Интенсивность отказов блока равна $6,8 \cdot 10^{-4}$ 1/ч, а вероятность безотказной работы за 100 ч составляет 0,93, что соответствует техническим требованиям.

Объем раздела составил 26 стр.

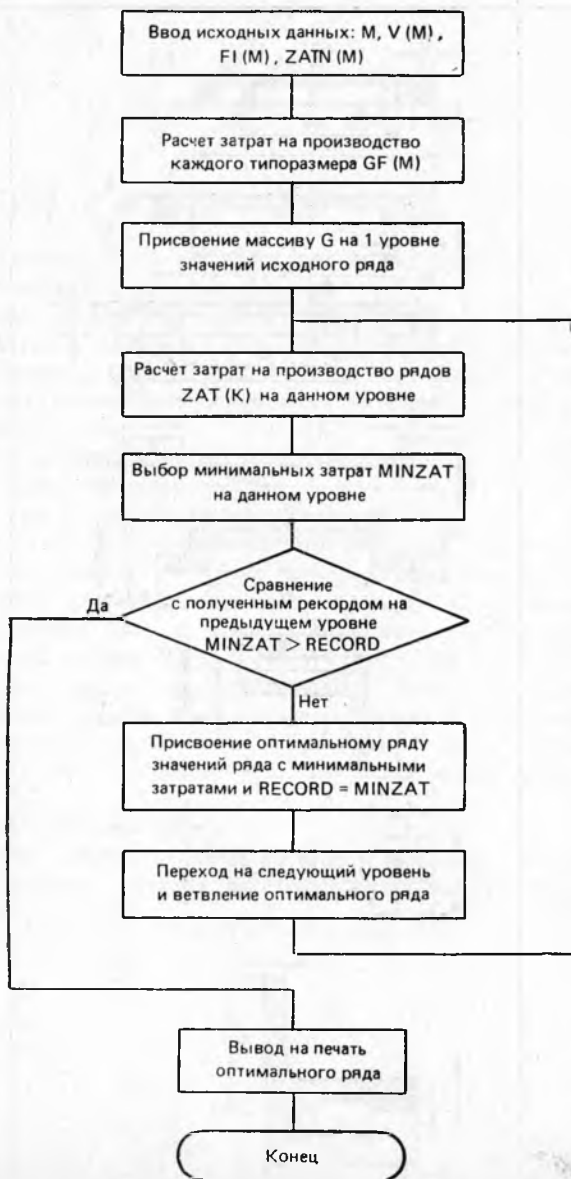
Общий объем записки, включая аннотацию, введение, заключение, список литературы, оглавление, составил 61 стр. Кроме того, приложена распечатка расчетов на ЭВМ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРЕССОВАННЫЕ ПРОФИЛИ

Марка	Размеры	Погонная масса, кг/м
ПК 8332		1,908
ПК 8333		2,468
ПК 8334		3,82
ПК 8335		3,081
ПК 8336		3,081
ПК 8337	 <p style="text-align: right;">$H = 21$ $H = 30$</p>	0,553 0,65
ПК 8417		2,412
ПК 8419		0,78

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ТИПОРАЗМЕРНОГО РЯДА



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Базовый принцип конструирования РЭА/** Под ред. Е. М. Парфенова.—М.: Радио и связь, 1981.—120 с.
2. **Верхопятницкий П. Д., Латинский В. С.** Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры.—Л.: Судостроение, 1983.—232 с.
3. **Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры полимерными компаундами/** Ю. В. Зеленева, А. А. Кирилин, Э. Б. Слободник, Е. Н. Галицкий; Под ред. Ю. В. Зеленева.—М.: Радио и связь, 1984.—120 с.
4. **Гельс П. П., Иванов-Есипович Н. К.** Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры.—Л.: Энергоатомиздат, 1984.—536 с.
5. **Деньдобренко Б. Н., Малика А. С.** Автоматизация конструирования РЭА.—М.: Высшая школа, 1980.—384 с.
6. **Дульнев Г. Н.** Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре.—М.: Высшая школа, 1984.—247 с.
7. **Интегральные микросхемы:** Справочник/Б.В. Тарабрин, А.Ф. Лунин, Ю.Н. Смирнов и др.; Под ред. Б. В. Тарабрин.—М.: Энергоатомиздат, 1985.—528 с.
8. **Компоновка и конструкции микросхемной аппаратуры:** Справ. пособие/ П. И. Овсичер, И. И. Лившиц, А. К. Орчинский и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого.—М.: Радио и связь, 1982.—208 с.
9. **Кузмин А. Я.** Конструирование и микроминиатюризация электронной вычислительной аппаратуры.—М.: Радио и связь, 1985.—280 с.
10. **Модули СВЧ/** Л. М. Арутюнов, И. П. Блудов, В. Д. Давыдов и др.—М.: Радио и связь, 1984.—72 с.
11. **Мюллер И.** Эвристические методы в инженерных разработках.—М.: Радио и связь, 1984.—144 с.
12. **Пестряков В. Б., Кузенков В. Д.** Радиотехнические системы.—М.: Радио и связь, 1985.—376 с.
13. **Пименов А. И.** Снижение массы конструкций РЭА.—М.: Радио и связь, 1981.—128 с.
14. **Полонский Н. Б.** Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры.—М.: Сов. радио, 1979.—216 с.
15. **Поляков К. П.** Конструирование приборов и устройств радиоэлектронной аппаратуры.—М.: Радио и связь, 1982.—240 с.
16. **Преснухин Л. Н., Шахнов В. А.** Конструирование электронных вычислительных машин и систем.—М.: Высшая школа, 1986.—512 с.
17. **Разработка и оформление конструкторской документации РЭА:** Справ. пособие/ Э. Т. Романычева, А. К. Иванова, А. С. Куликов, Т. П. Новикова.—М.: Радио и связь, 1984.—256 с.
18. **Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. В.** Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА.—М.: Сов. радио, 1976.—232 с.
19. **Сборник задач и упражнений по технологии РЭА/** А. С. Беляева, К. И. Билибин, К. Б. Лукин и др.; Под ред. Е. М. Парфенова.—М.: Высшая школа, 1982.—255 с.
20. **Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы)/** А. И. Горобец, Л. И. Степаненко, В. М. Коронкевич.—Киев: Техника, 1985.—312 с.
21. **Справочник конструктора РЭА:** Компоненты, механизмы, надежность/ Н. А. Барканов, Б. Е. Бердичевский, П. Д. Верхопятницкий и др.; Под ред. Р. Г. Варламова.—М.: Радио и связь, 1985.—384 с.
22. **Справочник конструктора РЭА:** Общие принципы конструирования/ Под ред. Р. Г. Варламова.—М.: Сов. радио, 1980.—480 с.
23. **Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств/** С. И. Бахарев, В. И. Вольман, Ю. Н. Либи и др.; Под ред. В. И. Вольмана.—М.: Радио и связь, 1982.—328 с.
24. **Типовая методика оптимизации многомерных параметрических рядов.—М.: Изд-во стандартов, 1975.—42 с.**
25. **Тохарев М. Ф., Талицкий Е. Н., Фролов В. А.** Механические воздействия и защита РЭА.—М.: Радио и связь, 1984.—224 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	4
1.1. Основные требования при проектировании современной РЭА	4
1.2. Цели и задачи курсового проекта	11
1.3. Задание на курсовое проектирование и его анализ	14
Глава 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	18
2.1. Указания по составлению и оформлению пояснительной записки	18
2.2. Указания по выполнению графических работ	28
2.3. Особенности исследовательских курсовых проектов	41
2.4. Рекомендации по выполнению защиты курсового проекта	46
Глава 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	46
3.1. Методология проектирования конструкций РЭУ	46
3.2. Анализ существующих конструкций и выбор метода конструирования	58
3.3. Предварительная разработка и компоновка конструкции устройства	83
3.4. Разработка конструкции устройства и оценка его качества	101
Глава 4. КОНСТРУКТИВНЫЕ РАСЧЕТЫ	114
4.1. Компоновочный расчет блока РЭА	114
4.2. Расчет электромагнитной совместимости	124
4.3. Расчет параметров электрических соединений	134
4.4. Расчет теплового режима	141
4.5. Расчет на механические воздействия	158
4.6. Расчет надежности РЭА	172
4.7. Расчет оптимального типоразмерного ряда БНК модулей радиотехнических устройств	179
Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ И САПР В КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ	186
5.1. Рекомендации по применению ЭВМ и САПР в курсовом проектировании	186
5.2. Перечень и содержание конструкторских работ, рекомендуемых для выполнения с помощью ЭВМ	200
5.3. Особенности применения САПР в курсовом проектировании	221
Глава 6. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	238
6.1. Проектирование бытовой аналоговой аппаратуры	238
6.2. Проектирование блока СВЧ	252
Приложения (1, 2)	269
Список литературы	271