

● КОНСТРУИРОВАНИЕ БГИС И АППАРАТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ ●

**Конструирование
и расчет
БГИС, микросборок
и аппаратуры
на их основе**

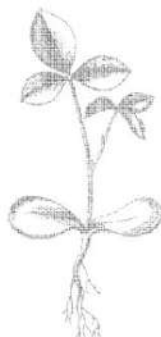


Конструирование и расчет больших гибридных интегральных схем, микросборок и аппаратуры на их основе

Под редакцией **Б. Ф. Высоцкого**

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

Москва «Радио и связь» 1981



Scan AAW

ББК 32.844

К65

УДК 621.396.6.049.77

Конструирование и расчет больших гибридных
К65 интегральных схем, микросборок и аппаратуры на
их основе: Учебное пособие для вузов/ Г. В. Алексеев, В. Ф. Борисов, Т. Л. Воробьева и др.; Под ред.
Б. Ф. Высоцкого. — М.: Радио и связь, 1981. —
216 с., ил.

65 к.

Рассмотрены методы и особенности расчета БГИС и микросборок различного назначения, методы автоматизированного конструирования БГИС с помощью ЭВМ. Изложены современные методы расчета и обеспечения надежности БГИС.

Предназначена в качестве учебного пособия для студентов вузов специальности «Конструирование и производство РЭА», а также для конструкторов и разработчиков микроэлектронной аппаратуры.

К $\frac{30407-123}{046(01)-81}$ 24-81(С. р.) 2403000000

ББК 32.844

6Ф2.1

Г. В. Алексеев, В. Ф. Борисов, Т. Л. Воробьева, Б. Ф. Высоцкий, А. С. Назаров,
В. А. Сорокопуд, М. Н. Ушкар, И. Б. Федюк, А. В. Фомин

Рецензенты: кафедра РТСУ Московского института электронного
машиностроения и В. Д. Ортенберг

Редакция литературы по электронной технике

Предисловие

XXVI съезд КПСС определил как одно из главных направлений развития отечественного аппаратостроения разработку новых образцов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на основе новейших достижений микроэлектроники — создание микроэлектронной аппаратуры (МЭА). Наибольшей степени микроминиатюризации и надежности МЭА позволяет достичь применение больших гибридных интегральных схем (БГИС), микросборок (МСБ) и других узлов аппаратуры на их основе. Надежность и микроминиатюризация — эти два качества являются решающими при выборе типа конструкции аппаратуры различного назначения во всех случаях, когда минимизация массы и объема (габаритов) при высокой функциональной сложности, а также уменьшение интенсивности ее отказов в значительной степени определяют качество всей системы в целом.

Микроэлектроника постоянно развивается в направлении повышения степени интеграции ее основных изделий (полупроводниковых больших интегральных схем (БИС), функциональных устройств и микрокомпонентов), что позволило в настоящее время довольно часто воплощать функционально и конструктивно законченное устройство в пределах одной микросборки. Этот факт устанавливает самую тесную связь между МСБ и МЭА в целом. Функциональное (схемотехническое) содержание создаваемого устройства непосредственно влияет на состав и характер МСБ, входящих в устройство, и, наоборот, возможности, заложенные в МСБ, непосредственно влияют на схемную идеологию устройства. Оптимальное решение можно получить методами функционально-материального синтеза (оптимизации). Исходя из этого в книге рассматриваются как микросборки, так и построение аппаратуры на их основе.

Дать полные проектно-конструкторские расчеты всех МСБ и МЭА в данной книге нельзя, да и нет в этом необходимости. Поэтому авторы сочли целесообразным раскрыть и систематизировать лишь особенности их конструирования (кроме особенностей конструирования СВЧ МСБ). Изложение строится на принципах системного подхода к созданию МСБ и МЭА на их основе, а также принципах синтеза (оптимизации) этих изделий на этапах как внешнего проектирования с учетом характеристик носителя МЭА, так и внутреннего проектирования.

МЭА на микросборках — молодое развивающееся направление в конструировании. Научные обобщения и обоснования его находятся в стадии динамического развития. Поэтому в содержании книги можно проследить два направления: 1) постановочные вопросы, требующие дальнейшей глубокой научной и инженерной

проработки, и 2) обобщение достигнутого уровня инженерного проектирования конструкции МЭА на МСБ. Это соответствует проблемным и дидактическим методам обучения.

В качестве объекта, на котором устанавливается МЭА, в книге выбран самолет, а в качестве примера устройств МЭА часто приводится радиолокационная станция (РЛС). Выбор этот чисто условный: на равных основаниях можно было бы выбрать, например, робот и его радиоэлектронное устройство или какой-либо другой объект установки МЭА. При этом выборе преследовалась одна цель — показать тесную связь характеристик объекта и его аппаратуры, которая наглядно показывает необходимость системного подхода при конструировании аппаратуры любого назначения.

Книга написана как учебное пособие для студентов старших курсов специальности «Конструирование и производство РЭА» и может быть полезной для инженеров ОКБ и НИИ соответствующего профиля.

Предисловие, введение и § 1.1 написаны Б. Ф. Высоцким и Т. Л. Воробьевой, § 1.2 — Б. Ф. Высоцким и Г. В. Алексеевым, § 1.3 и 2.4 — Г. В. Алексеевым и В. Ф. Борисовым, § 2.1 — И. Б. Федюком, § 2.2, 2.3 — М. Н. Ушкаром, § 3.1, 3.2, 3.3, 3.5 — А. С. Назаровым, § 3.4 — В. Ф. Борисовым, гл. 4 — В. А. Сорокопудом и гл. 5 — А. В. Фоминым.

Авторы благодарят зав. кафедрой МИЭМ д. т. н. профессора А. М. Чернушенко и его сотрудников, а также ведущего конструктора В. Д. Ортенберга за внимательный просмотр рукописи и ценные замечания, учет которых, несомненно, способствовал улучшению книги.

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Динамика развития микроэлектронной аппаратуры

Нарастающие темпы научно-технического прогресса приводят к постоянному росту сложности радиоэлектронной аппаратуры. Темпы этого роста за пятилетку возросли в 10 раз: сложность отдельных устройств в настоящее время доходит до 10^8 элементов на устройство и продолжает расти (рис. В.1). Быстрыми темпами увеличивается также степень интеграции ИС и БИС. Сейчас она достигла уровня более 10^3 эл/мм². Размеры кристалла к 1980—1985 гг. достигнут значений порядка 10 мм на сторону (рис. В. 2), а степень интеграции БИС к этому времени составит 1 000 000 элементов в одном кристалле. Этот процесс приводит к качественному изменению облика МЭА и ее элементной базы. Рост степени интеграции ИС постепенно стирает грань между элементной базой и устройством. Уже известны многие устройства, построенные на одной-двух БИС (калькуляторы, радиоприемники и др.).

Однако с ростом степени интеграции теряется универсальность БИС или микросборок (МСБ): они становятся пригодными только для данного типа устройств. Поэтому процесс конструирования БИС или МСБ помимо технологических вопросов включает в себя также и схемотехнические, и идеологию устройства в целом. Таким образом, техническая интеграция порождает необходимость организационной интеграции, получившей название «вертикальной». Это означает, что аппаратостроительные отрасли промышленности будут развивать разработку и конструирование МСБ, БИС и МЭА на их основе внутри своей отрасли. Этот процесс уже начался: на основе развитой технологии ведется конструирование и производство МСБ, а также подготовка к созданию полупроводниковых БИС собственного производства. Всегда, когда это возможно, будут широко использоваться крупносерийные универсальные массовые изделия, которые останутся в электронной отрасли. Один из примеров таких изделий — БИС микропроцессоров.

Проблема конструирования устройств заключается в необходимости широкого внедрения новых методов, получивших название комплексной микроминиатюризации (КММ).

КММ как новый этап конструирования охватывает обширный комплекс мероприятий системного, схемотехнического плана, а также создание новых принципов конструирования МЭА с учетом развития технологии, техники теплообмена, надежности и машинных методов. КММ требует организации целенаправленной работы различных специалистов и обеспечения оперативной связи между ними. Необходимость решения этой проблемы можно

показать на примере того, что отношение полезного объема (ИС, БИС, МСБ) к объему всего устройства составляет всего 10% и менее. Иными словами, отношение материального содержания устройства (масса, объем, стоимость) к его функциональному содержанию остается еще высоким. Требуется разработка новых методов формообразования конструкций, по-новому ставятся и задачи обеспечения надежности устройств.

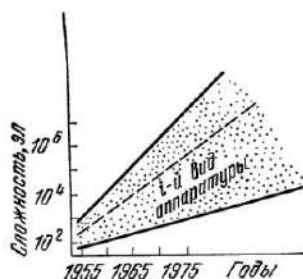


Рис. В.1.

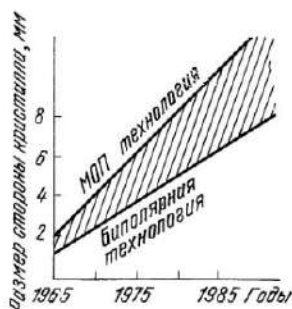


Рис. В.2.

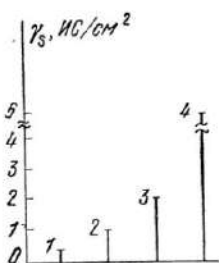


Рис. В.3.

Рис. В.1. Скорость роста сложности радиоэлектронной аппаратуры за последние десятилетия

Рис. В.2. Эволюция геометрических размеров ИС

Рис. В.3. Плотность размещения ИС на площади для четырех типов конструктивов МЭА:

1 — корпуса DIP с 14 выводами на печатной плате; 2 — плоские корпуса с 14 выводами на печатной плате; 3 — бескорпусные ИС (кристаллы) на гибридной подложке (МСБ); 4 — бескорпусные ИС на многослойной гибридной подложке (МСБ)

Параллельно с повышением степени интеграции БИС развивалась и техника размещения компонентов в функционально законченные блоки и устройства (аппаратуру). При этом преследовалась цель эффективно использовать новое качество БИС (т. е. их высокую степень интеграции) при конструировании устройства в целом. Одним из показателей качества компоновки является плотность размещения элементов или компонентов на единице площади монтажной плоскости. Величина этого показателя для конструкции устройства зависит от принятых методов компоновки. На рис. В. 3 приведены значения этого показателя для четырех методов компоновки и сборки (или для четырех типов конструктивов) МЭА.

В.2. Некоторые определения и классификация функциональной сложности современной микроэлектронной аппаратуры

В последнее время в микроэлектронике используется ряд новых понятий:

Конструктив — типовая разновидность конструкции того или иного уровня сложности МЭА, определяемая выбранной элементной базой и способом компоновки, например бескорпусная микросборка, функциональная ячейка (ФЯ) с корпусированными ИС на печатной плате, блок из ФЯ на металлических рамках и т. п.

Формообразование конструкций — конструкторское представление формы проектируемого изделия путем определенной компоновки составляющих его конструктивов в заданных объемах, например разработка компоновочной схемы (эскиза) блока МЭА.

Функциональное содержание устройства — совокупность его электрических (схемотехнических) характеристик.

Материальное содержание устройства — совокупность его материальных и технико-экономических характеристик, например массы, объема, стоимости.

Микросборка (МСБ) — микроэлектронное изделие типа ГИС или БГИС, выполняющее определенную функцию и состоящее из элементов, компонентов и (или) интегральных микросхем (корпусированных* и бескорпусных) и других радиоэлементов в различных сочетаниях, разрабатываемой и изготавливаемой разработчиками конкретной радиоэлектронной аппаратуры для улучшения показателей ее миниатюризации.

По технологии производства они не отличаются от гибридных интегральных схем (ГИС) или больших ГИС (БГИС). Как правило, по высокой степени интеграции или большой функциональной сложности МСБ соответствует БГИС. Однако микросборку изготавливают специально для конкретной МЭА. В отличие от ГИС и БГИС, представляющих собой самостоятельные законченные изделия общего применения, МСБ являются изделиями на уровне полуфабрикатов. Потребность в них возникла для улучшения показателей уровня микроминиатюризации МЭА. В зависимости от степени интеграции МСБ может выполнять функции субблока, блока или всего устройства. Об этом более подробно будет сказано ниже. Таким образом, микросборки являются микроэлектронными изделиями частного применения. В состав МСБ в качестве компонентов могут входить все виды изделий, перечисленных выше.

Аналогом микросборки в МЭА III поколения являются печатная плата, заполненная компонентами в виде корпусированных ИС соответствующего уровня интеграции. МСБ по своему функциональному содержанию является полным аналогом такой печатной платы и то же время резко отличается по конструкции и технологии исполнения, так как в качестве компонентов применены бескорпусные ИС, а в качестве соединений между ними используются толстопленочные или тонкопленочные проводники, вместо стеклотекстолитового основания используется тонкая керамическая или ситалловая подложка. Вследствие этого происходит своеобразная «усадка» всех размеров конструкции. На

* Имеются в виду корпуса, совместимые по своей конструкции с микросборкой, ГИС и БГИС.

рис. В. 4 даны фото этих изделий в реальном соотношении масштабов.

Рассмотрим классификацию МЭА по функциональной сложности интеграции и формообразованию. Функциональная сложность и формообразование МЭА сильно зависят от степени интеграции изделий МЭ. Проследим эти зависимости. Классификация МЭА по ее функциональной сложности может быть проведена на следующих уровнях: радиотехническая система, комплекс устройств, являющийся ее частью, устройство, блок, субблок, функциональный узел [1.1].

Устройство является основной составляющей частью любого комплекса; оно решает конкретную техническую задачу и представляет собой функционально и конструктивно законченное изделие МЭА, автономно эксплуатируемое. Примерами устройств могут быть радиоприемные, радиопередающие, радиолокационные устройства, ЭВМ и др. Микроэлектронное устройство может приобретать различные конструктивные формы в зависимости от их функциональной сложности и степени интеграции используемых микроэлектронных изделий. Например, при высокой степени интеграции и соответствующей функциональной сложности устройства оно может быть заключено в один объем, имеющий форму моноблока. При недостаточной степени интеграции микроэлектронных изделий, не соответствующей функциональной сложности устройства, формообразование его идет по пути создания многоблочной конструкции.

Блок микроэлектронного устройства обладает меньшей функциональной сложностью, он выполняет лишь частную целевую

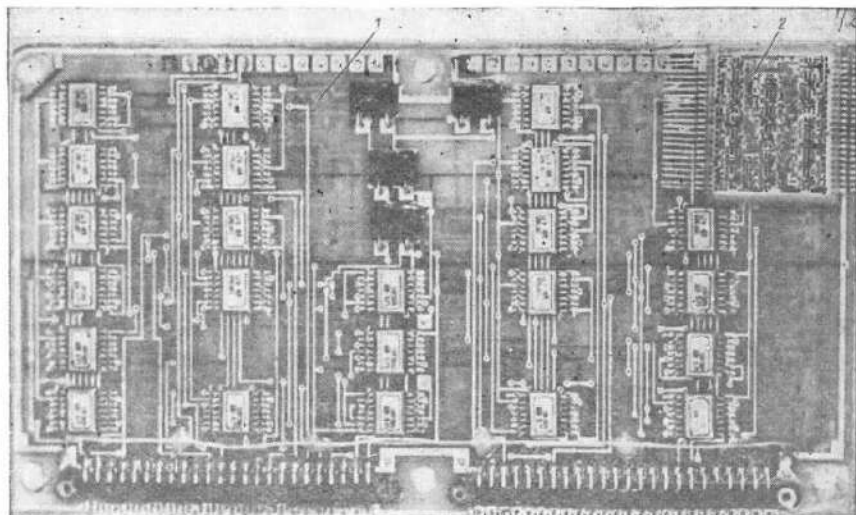


Рис. В.4. Процесс «усадки» габаритов конструкции устройства одинаковой сложности при переходе от печатных плат (1) к МСБ (2)

функцию по преобразованию и генерированию сигналов. Примерами блоков являются блок приемника или передатчика в составе дальномерного устройства, блоки памяти и процессоры в ЭВМ, блоки питания и т. п. Блок является функционально и конструктивно законченным изделием МЭА, автономно не эксплуатируемым. Способы формообразования блоков, как и устройств, подчиняются тому же правилу: соизмеряя функциональную сложность блока и степени интеграции применяемых микроэлектронных изделий, блоку можно придать различные конструктивные формы — от моноблока до отдельной ИС соответствующей степени интеграции.

Субблок является составной частью блока и выполняет функции отдельного его тракта (канала). Примерами субблоков могут быть тракты УПЧ и УНЧ, видеоканал, канал фазовой автоподстройки и т. п. По мере повышения степени интеграции изделий микроэлектроники понятие субблока может утрачивать свое самостоятельное значение. Оно становится чисто схемотехническим, обозначая определенную часть электрической схемы блока или устройства. Конструкции блоков и субблоков представлены в соответствующих разделах книги.

Функциональный узел может рассматриваться как основная единица сложности МЭА. В схемотехническом понимании функциональные узлы представляют собой, например, каскады усилителя или генератора. В качестве единицы сложности могут выбираться еще более простые узлы, как, например, инвертор или транзистор. Однако в каждом конкретном случае необходимо четко говорить, что именно принято за такую единицу. При современной интеграции микроэлектронных изделий функциональные узлы конструктивно могут быть представлены одной ИС малой степени интеграции или являться только частью одной, более сложной ИС.

Представленная выше классификация МЭА по функциональной сложности во многом не противоречит ранее существовавшей классификации РЭА. Однако главная особенность МЭА, а именно зависимость формообразования от степени интеграции изде-

Таблица В.1

Ранги функциональной сложности МЭА	Форма конструктивного исполнения при количестве элементов в ИС			
	не более 100	100...1000	1000...10 000	> 10 000
Устройство	Многоблочная конструкция из конструктивных блоков (моноблоков)	Моноблок или ФЯ	МСБ	БИС
Блок	Моноблок из функциональных ячеек (ФЯ)	МСБ	БИС	—
Субблок	ФЯ на многослойной печатной плате	БИС	—	—
Функциональный узел	ГИС, ИС, функциональный компонент	—	—	—

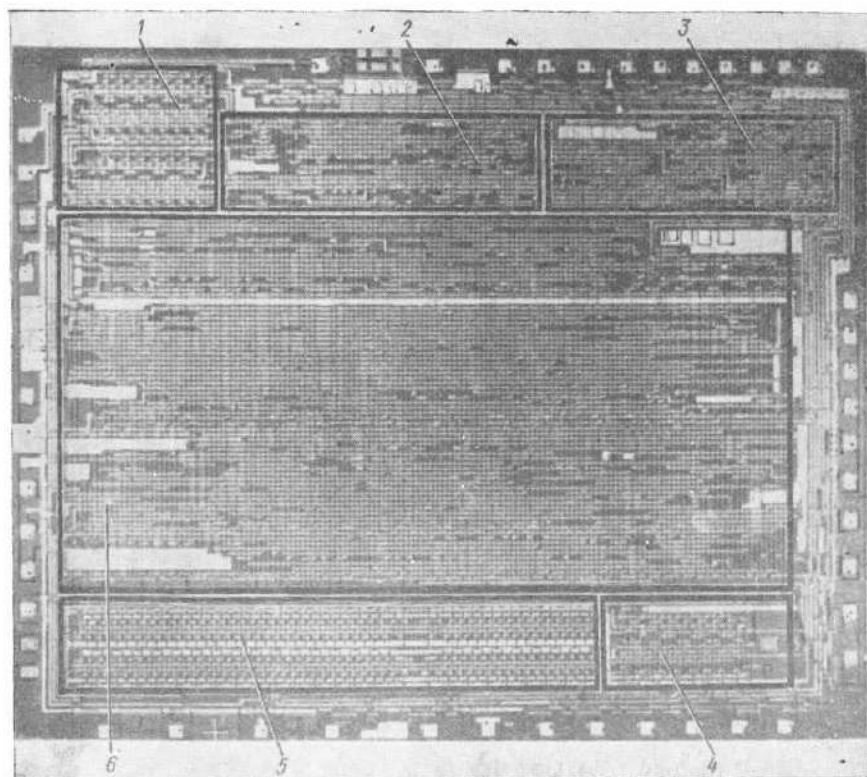


Рис. В.5. Микроэлектронное устройство, выполненное в виде моноблока:

1 — функциональная ячейка; 2 — МСБ; 3 — бескорпусная БИС; 4 — корпус-основание (верхняя крышка-кожух снята)

Рис. В.6. Кристалл БИС, выполняющий функции ЭКВМ:

1 — счетчики синхронизации ввода; 2 — ОЗУ; 3 — устройство ввода — вывода; 4 — счетчик сканирования индикации; 5 — ЗУ; 6 — микропрограммный автомат.



лий, приводит к тому, что понятие уровней сложности в схемотехническом и конструктивном понимании, свойственные классификации РЭА, начинают не совпадать.

По сложности конструктивных форм МЭА и ее частей их можно подразделить на многоблочные конструкции, моноблоки, функциональные ячейки, микросборки, ИС и функциональные компоненты. Заметим, что последние три позиции в то же время являются изделиями микроэлектроники.

В заключение приведем пример зависимости формообразования конструкций МЭА различной функциональной сложности от степени интеграции микроэлектронных изделий (табл. В. 1). В основу построения таблицы, имеющей гипотетический, иллюстративный характер, положено устройство определенной сложности и назначения. В качестве основных изделий микроэлектроники, определяющих конструктивную форму его исполнения, приняты ИС возрастающей степени интеграции. Указанные в таблице степени интеграции приведены условно. Для пояснения таблицы на рис. В. 5 и В. 6 приведены примеры форм конструктивного исполнения отдельных конструкций МЭА. На рис. В. 5 показано микроэлектронное устройство, выполненное в виде моноблока из функциональных ячеек с МСБ (графа 3 табл. В. 1.), а на рис. В. 6 — кристалл БИС, также выполняющий функции целого устройства (графа 5 табл. В. 1).

В связи со стремительным ростом интеграции полупроводниковых БИС и совершенствованием технологии печатных плат, резко повышающей плотность соединений (проводников) на них, часто возникает вопрос о выборе конструктивов МЭА. Применение таких БИС в бескорпусном исполнении всегда дает выигрыш в конструкции по сравнению с применением корпусированных БИС на печатных платах. Это утверждение справедливо до тех пор, пока степень интеграции БИС не переходит определенной величины, например когда одна БИС уже олицетворяет законченное устройство. Поэтому этот выигрыш может оказаться не настолько существенным, чтобы оправдать затраты на внедрение в производство технологии МСБ. В обозримом будущем оба метода компоновки (см. рис. В.3) устройств будут взаимно дополняющими и в каждой конкретной ситуации по результатам проведенного синтеза будут использоваться в соответствующих пропорциях, отвечающих заданному показателю качества проектируемой МЭА.

Для пояснения сказанного приведем таблицу применяемости МСБ и БИС в зависимости от типов устройств, их сложности и условий эксплуатации (табл. В.2). Таблица носит чисто иллюстративный, качественный характер и ее не следует рассматривать как руководство к действию. Однако она четко показывает важность применения МСБ в МЭА, а следовательно, и необходимость освоения методов конструирования и расчета МСБ и МЭА на их основе.

Таблица В.2

Тип устройства	Конструк- тивная сложность ¹⁾	Требования к массе, габаритам и надежности			
		жесткие ²⁾		менее жесткие ³⁾	
		микро- сборки	БИС на печатных платах	микро- сборки	БИС на печатных платах
Цифровые	Простые	— ⁴⁾	+	—	+
	Сложные	+	—	—	+
Цифроаналоговые	Простые	+	—	—	+
	Сложные	+	—	+	—
Аналоговые	Простые	+	—	—	+
	Сложные	+	—	+	—
СВЧ		+	—	+	—
Силовые (ВИП, сервоусилите- ли и пр.)		+	—	+	—

[Ж. 1] Деление устройств на простые и сложные дано здесь условно и может, например, измеряться количеством кристаллов ИС и БИС, в простых устройствах — до десятков, в сложных — сотнями и более.

²⁾ Жесткие требования соответствуют ситуации, когда массогабаритные и надежностные показатели МЭА в ином исполнении не могут обеспечить требуемый показатель проектируемого качества комплекса в целом.

³⁾ Менее жесткие требования соответствуют незначительному ухудшению показателя качества комплекса.

⁴⁾ —* — не рекомендованное и „+“ — рекомендованное применение.

Рассмотренная классификация позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением степени интеграции микроэлектронные изделия могут занимать более высокие уровни в функциональном делении МЭА, например при повышении степени интеграции БИС они могут перейти из ранга субблока в блок и далее в устройство. Рациональное управление этим процессом является важной задачей микросхемотехники.

2. Такие функциональные единицы МЭА, как функциональные узлы, субблок или блок, могут являться лишь определенной частью единой конструкции одной БИС.

3. Повышение степени интеграции сопровождается сокращением числа внешних соединений, а следовательно, уменьшением необходимости использования печатных плат (и тем более многослойных).

4. При определенных условиях целый комплекс микроэлектронных устройств может быть создан в едином объеме моноблока (табл. В. 1).

* *
*

Сложность устройств, о чем уже неоднократно упоминалось выше, понятие не однозначное. Подробно оно будет раскрыто в соответствующих разделах книги. Вкратце заметим, что понятие сложности может иметь по крайней мере два смысла:

— функциональная сложность устройства, которая может быть охарактеризована количеством простейших элементов, необ-

ходимых для выполнения заданных функций, или его электрическими показателями;

— конструктивная (материальная) сложность, характеризующаяся его конструктивными формами и материальными показателями.

Представим себе, что в одном кристалле БИС содержится множество элементов, воплощающих законченное устройство, например ЭВМ, а в своем материальном воплощении она представляет собой всего один кристалл. Такое устройство можно квалифицировать как очень сложное функционально и очень простое в своем конечном, материальном (конструктивном) образе. При этом надо отметить, что за этой кажущейся простотой кроется огромный труд конструкторов и технологов, при этом деятельность всех сотрудников и работа технологического оборудования должны быть безошибочными в течение всего процесса проектирования и изготовления образцов, длящегося месяцами.

Анализируя сказанное выше, приходим к выводу о необходимости непрерывного поиска новых, прогрессивных методов конструирования и технологии в соответствии с ростом сложности МЭА. Рост функциональной сложности МЭА — процесс бесконечный. Конструктивно-технологические методы ее овеществления конечны: каждый раз, исчерпав себя, они уступают место более новым и прогрессивным методам, отвечающим более высокому уровню сложности аппаратуры. Стимулирование этого процесса — главная задача ученых и инженеров, создающих изделия МЭ и МЭА.

Огромное значение в конструировании МСБ и МЭА на их основе имеют вопросы стоимости изделий и их экономической эффективности, однако в силу их специфичности в данном пособии их освещение не представляется возможным, хотя в методах оценки качества МСБ и МЭА они нашли свое отражение.

1. ЭТАПЫ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ И РАСЧЕТЕ МСБ И МЭА НА ИХ ОСНОВЕ

К выполнению проектно-конструкторских разработок, а также к синтезу (оптимизации) конструкции необходим системный подход.

Системой в широком смысле называется объективное единство закономерно связанных друг с другом предметов (объектов) и явлений. В прикладном понимании системой можно назвать совокупность объектов (средств), приведенных в действие для выполнения поставленной задачи или заданной операции. *Радиотехнической системой* (РТС) называется «совокупность сигналов в пространстве, операторов и радиоэлектронной аппаратуры, размещенных на объектах в определенных точках на поверхности или в пространстве, действующих в условиях помех и внешних возмущений» *).

Качественно оценивая сложность систем, различают: большие системы, подсистемы, комплексы, устройства. Как видно, система — понятие относительное и может применяться во всех случаях проектирования, когда для принятия правильного решения требуется учитывать взаимодействие многих факторов. Такой подход к проектированию называется *системным подходом*.

1.1. Общая характеристика метода синтеза МЭА и МСБ

1.1.1. Системная иерархия, разделение данных и методы синтеза

Системная иерархия. Современное микроэлектронное устройство представляет собой сложную систему, при своем создании зависящую от систем как более высокого уровня (ранга), так и от систем низших рангов. Являясь частью общей («большой») системы, предназначенной для выполнения заданной функции или операции в системе народного хозяйства, оно служит для обмена информацией между объектами системы или для управления ими или для того и другого вместе. Следовательно, устройство является неотъемлемой частью объекта, так как само существование объекта без устройства становится бессмысленным. Таким образом, объект образует систему типа «объект=МЭА+носитель», качество которой зависит от объема и распределения функциональных и материальных параметров между МЭА и носителем, например планером самолета.

Приведем развернутую структурную схему системной иерархии объекта; для конкретности в качестве носителя выберем самолет,

* Пестряков В. Б. Конструирование РЭА.—М.: Сов. радио, 1969, с. 6.

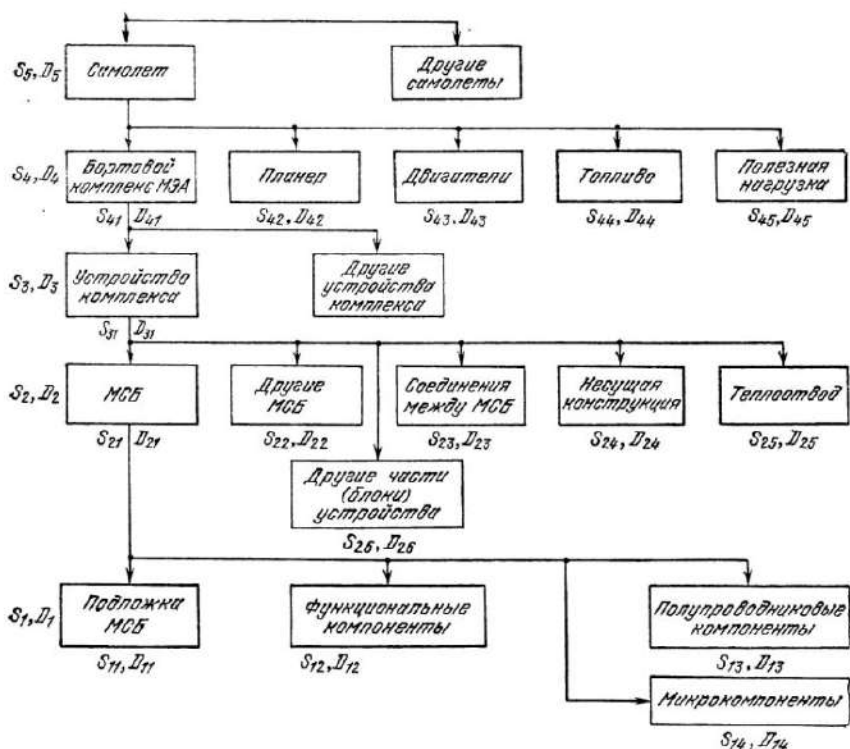


Рис. 1.1. Схема системной иерархии бортового комплекса МЭА самолета

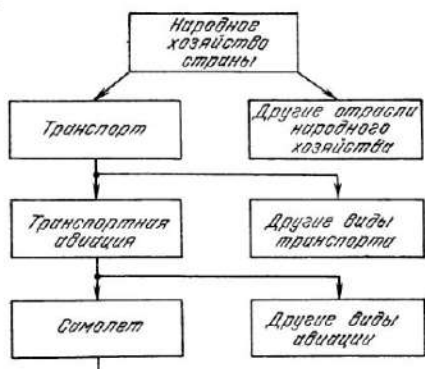


Рис. 1.2. Пример развития системной иерархии «вверх»

так как в этом случае достаточно полно вскрываются взаимосвязи системы (рис. 1.1). Как видно из рисунка, приведенная иерархия представляет собой многоуровневую (многогранговую) структуру частных систем, которую можно развивать как «вверх» (рис. 1.2), так и «вниз». Развивая эту иерархию вниз, спускаемся от уровня самолета S_5 до ранга S_1 , представляющего собой совокупность частей МСБ. Изучая представленные на рисунках структуры, можно сделать следующие выводы.

Эффективность (качество) большой системы зависит от качества систем низшего ранга. Так, например, при недостаточной эффективности самолета и большая система в целом будет недостаточно эффективна. Сказанное справедливо и для системы рис. 1.1: эффективность самолета S_5 зависит не только от параметров подсистем планер S_{42} — двигателя S_{43} — топлива S_{44} , но и от качества D_{41} бортового микроэлектронного комплекса S_{41} ; в конечном счете оно зависит от качества микросборки и других частей его устройств и так далее, по пути «вниз».

Из структурных схем видно, что исходные данные для конструирования системы данного ранга задаются системой верхнего ранга; в свою очередь, внутренние параметры данной системы служат исходными (выходными) данными для системы, расположенной рангом ниже. Отметим, что S_3 , S_2 , S_1 представляют собой совокупность изделий, образующую бортовую часть S_{41} РТС. Следовательно, первая группа данных, т. е. исходные данные, определяет назначение устройства и отвечает на вопрос, какие внешние функции оно выполняет, обладая при этом определенными внешними характеристиками. Вторая группа (внутренние параметры) отвечает на вопрос, какими средствами обеспечивается функционирование устройства и его внешние характеристики.

Отсюда вытекает порядок проведения проектно-конструкторских работ:

— этап внешнего проектирования устройства (например S_3), заключающийся в обосновании исходных данных D_3 ;

— этап внутреннего проектирования, заключающийся в выборе и отработке характеристик ($D_{21} \dots D_{26}$) составных частей устройства, обеспечивающих выходные данные (параметры) D_3 .

Каждый из этих этапов имеет свои особенности. Внешние (выходные) параметры изделия (устройства) при его достаточно высоком ранге (S_3 , S_4 , S_5) называют тактическими, а внутренние — техническими. Их совокупность называют тактико-техническими требованиями (ТТТ), а при разработке задания на конструирование — тактико-техническими заданиями (ТТЗ).

Методы работы над этими этапами, называемые синтезом, имеют много общего, направлены на решение общей задачи — создание изделий высокого качества — и ставят своей целью найти наилучший вариант совокупности характеристик изделия.

Примеры количественных оценок данных D , характеризующих качество систем S . В основу этих примеров положим иерархию систем от 5-го до 2-го ранга ($S_5 \dots S_2$). Заметим, что каждый из символов, D_i или D_{ij} , в развернутом виде в свою очередь представляет собой совокупность многих функциональных и материальных параметров и характеристик; ниже приведем лишь некоторые из них.

Пример 1.1. Система S_5 . Ее данные: скорость полета v_{51} ; дальность полета L_{51} ; полетный вес (масса) m_{51} ; вероятность выполнения операции (задания) $Вер_{51}$; стоимость C_{51} и т. д. Таким образом,

$$D_{51} = \{v_{51}, L_{51}, m_{51}, Вер_{51}, C_{51}, \dots\}.$$

Пример 1.2. Система S_4 . Ее данные для

- бортового комплекса S_{41} : дальность действия радиотехнических средств; скорость обработки информации; точность измерений; масса и объем $m_{41}, V_{41}, \dots$;
- планера S_{42} : коэффициент аэродинамического сопротивления, удельная нагрузка на крыло, масса планера $m_{42}, \dots$;
- двигателя S_{43} : тяга; удельный расход топлива; масса двигателя $m_{43}, \dots$;
- топлива S_{44} : масса и объем топлива m_{44}, V_{44} ; стоимость $C_{44}, \dots$;
- полезной нагрузки S_{45} : масса, объем $m_{45}, V_{45}, \dots$, т. е.

$$D_4 = \{D_{41} \dots D_{45}\}.$$

Пример 1.3. Система S_3 . Для большей определенности в качестве примера устройства выберем радиолокационную станцию (РЛС). Запишем совокупность ее данных: дальность обнаружения объекта R_{31} ; вероятность правильного обнаружения Ver_{31} ; эквивалентная площадь рассеивания объекта σ_{31} ; разрешающая способность Δ_{31} , интенсивность отказов Λ_{31} , стоимость C_{31} ; масса и объем m_{31}, V_{31} ; ... Таким образом,

$$D_{31} = \{R_{31}, Ver_{31}, \sigma_{31}, \Delta_{31}, \Lambda_{31}, C_{31}, m_{31}, V_{31}, \dots\}.$$

Пример 1.4. Система S_2 . Предположим, что МСБ S_{21} представляет собой приемное устройство РЛС; это предположение при современном росте степени интеграции элементной базы становится реальным. Тогда в качестве данных можно записать: мощность шума, отнесенная к его входу, $P_{ш21}$, коэффициент передачи K_{21} , ширина полосы Δf_{21} , площадь подложки S_{21} ; масса и объем $m_{21}, V_{21}, \dots$, частота отказов и стоимость Λ_{21}, C_{21} , следовательно,

$$D_{21} = \{P_{ш21}, K_{21}, \Delta f_{21}, S_{21}, m_{21}, V_{21}, \Lambda_{21}, C_{21}, \dots\}.$$

Подобными совокупностями, но наполненными другим содержанием, могут быть охарактеризованы и другие части системы ($S_{22} \dots S_{24}$); например, предположив, что S_{26} представляет собой передатчик с антенной, можно записать $D_{26} = \{S_{a26}, G_{a26}, \dots, P_{a26}\}$, где параметры в фигурных скобках обозначают соответственно площадь раскрыва антенны, коэффициент ее усиления и мощность передатчика.

Разделение и классификация данных для синтеза изделий.

Цель разделения — выделить из совокупности всех данных именно те параметры (характеристики), варьирование которых изменяет качество изделия — *показатели качества* [1.2]. Такое разделение позволяет исключить принятие заведомо худших решений и ускоряет процесс принятия оптимального (лучшего) решения.

Разделим совокупность данных $D = \{D_1 \dots D_n\}$ на следующие подгруппы:

- $Y = \{Y_1 \dots Y_k\}$ — условия, определяющие назначение системы и воздействие внешней среды.
- $O_S = \{O_{S_1} \dots O_{S_l}\}$ — ограничения на структуру системы,
- $K = \{K_1 \dots K_m\}$ — показатели качества системы,
- $O_K = \{O_{K_1} \dots O_{K_n}\}$ — ограничения на показатели качества системы.

Более подробное определение перечисленных подгрупп приведено в табл. 1.1. Ввиду некоторой условности деления совокупности на подгруппы в зависимости от конкретной обстановки при создании данного устройства данные из одной подгруппы могут переходить в другую и наоборот.

Из всего набора альтернативных решений, удовлетворяющих Y, O_S, O_K , система, обладающая наилучшим комплексным (об-

Таблица 1.1

Подгруппа	Определение
У	Назначение (область применения) МЭА: авиационная техника, промэлектроника, бытовые устройства; тип устройства: РЛС, рация, линия связи; условия эксплуатации, внешняя среда, помехи
O_S	Ограничения в выборе типа сигнала, антенной системы (зеркальная или АФАР); ограничения по элементной базе, например все устройство должно быть построено на МСБ
К	Заданные энерго-информационные характеристики: дальность действия, точность, быстродействие и материальные характеристики: масса, объем, надежность, стоимость (см. пример 1.3) Показатели качества, например функциональные показатели: мощность передатчика (P_{21}), площадь антенны (S_{21}), характеристики приемника ($P_{ш21}$, $K_{ус21}$), а также материальные показатели, например передатчика и приемника (см. пример 1.4)
O_K	Ограничения, накладываемые на показатели качества; кроме того, ограничения типа технико-экономических и организационно-производственных (срок разработки, размер партии, уровень кооперирования, оснащенность предприятия)

щим) показателем качества К, будет оптимальной (наилучшей). При этом предварительно выбирается критерий предпочтения (критерий оптимальности), на основании которого можно считать, какое значение К будет лучшим и какое худшим в сравнении с другим его значением.

Таким образом, задача синтеза (отыскание оптимальной, т. е. наилучшей системы) заключается в отыскании системы S, удовлетворяющей исходным данным {У, O_S , К, O_K } и имеющей наилучшее значение К.

Методы синтеза (оптимизации). Математический синтез заключается в математической записи совокупности всех данных, выработке критерия предпочтения и отыскании оптимального решения. Этот метод получает свое развитие в системах автоматизированного проектирования радиоаппаратуры (САПР). Однако так как точно и исчерпывающе описать реальные ситуации языком математических моделей невозможно, метод дополняется эвристическим синтезом, т. е. творчеством коллектива, использующего накопленный опыт, изобретательством, интуицией и приближенными расчетами. Рациональная комбинация обоих методов называется инженерным синтезом. Различают также следующие виды синтеза:

- векторный — учитываются все показатели качества $\langle K_1, \dots, K_m \rangle$, т. е. этот вид синтеза многокритериальный;
- скалярный — учитывается единственный заранее выбранный показатель качества;

— глобальный — учитываются все существенные показатели качества, включая экономические, производственные, организационные и другие;

— частный — учитываются лишь отдельные показатели качества.

Во всех случаях, когда это возможно, векторный синтез стараются свести к скалярному. Для этого известны два метода. Первый — образование обобщающей целевой функции

$$f_0(K_1, \dots, K_m); \quad (1.1)$$

при этом ищут систему S , которая, удовлетворяя U , O_S и O_K , дает ее наименьшую величину, если критерий предпочтения заключается в минимизации этой функции. Второй — отыскание такой системы S , которая обеспечивает минимальную величину одного из показателей, например K_1 , в то время как остальные показатели качества переведены в разряд O_K типа равенств или неравенств.

Скаляризация позволяет решать задачу методами математического программирования, в том числе с использованием САПР. Инженерный синтез включает следующие этапы: синтез структуры системы, устройства; оптимизация параметров и выбор оптимального решения системы S путем выбора наилучшего (по критерию качества K) из рассмотренных решений $S^{(1)}$, $S^{(2)}$ и т. д.

Отсюда видно, что весь процесс инженерного синтеза является рядом последовательно чередующихся этапов внешнего и внутреннего проектирования. Синтез (оптимизация) систем и устройств производится на всех этапах проектно-конструкторских работ. Важно его начинать в самом начале работы с рассмотрения ТТЗ, потом на этапе технического предложения и далее. Такой подход необходим в чрезвычайно сложной и динамичной обстановке развития научно-технического прогресса и преследует цель избежать большого экономического и научно-технического ущерба.

1.1.2. Показатели качества

Комплексный показатель качества. Рассмотрим некоторые примеры формирования комплексного показателя качества (частный синтез). В качестве первого примера возьмем устройство S_{31} ; образуем скалярное выражение для K , состоящее из суммы показателей качества ^{*)}:

$$K = \varphi_m m_0 + \varphi_V V_0 + \varphi_P P_0 + \varphi_C C_0 + \varphi_\Delta \Delta_0 + \dots + \varphi_T T_{p0}, \quad (1.2)$$

где m_0 , V_0 , P_0 , C_0 , Δ_0 , T_{p0} — масса, объем, потребляемая мощность, стоимость, интенсивность отказов и срок разработки соответственно. Индексы «нуль» означают, что все эти величины безразмерны и нормированы относительно какого-либо заданного уровня их значений, они могут быть определены из O_S и O_K ; $\varphi_m, \dots, \varphi_T$

^{*)} Для выражения K могут быть использованы и другие известные формулы этого показателя, например произведение показателей и т. д.

число технологических операций; d — дефектность структуры; $K_{ис}$ — технико-экономический показатель качества ИС, равный $100/Qs_{яч}C_{уд}$; Q — фактор качества, пДж; $s_{яч}$ — площадь ячейки; $C_{уд}$ — удельная стоимость ИС.

В этом примере в объем частного синтеза входит много показателей качества как физического, так и технико-экономического происхождения, причем критерием предпочтения является максимальное значение величины K .

Заметим в заключение, что оптимизация на уровне S_{13} непосредственно влияет на качество уровня S_{21} , которое в конечном счете определяет качество устройства S_{31} .

Относительные показатели качества. Они являются отношением материальных показателей к функциональным.

Функциональные показатели (Ф) вытекают из назначения изделия и определяют его возможности (свойства), отвечая на вопросы: «Для чего оно сделано?» или «Что оно может делать?». Например, для самолета этими показателями будут скорость и дальность полета и т. д., для радиолокационной станции — дальность обнаружения цели, точность измерения дальности и т. д., для МСБ — мощность шума на входе, коэффициент передачи, АЧХ *) ... Однако теория и соответствующие уравнения для расчета этих показателей не дают ответа о материальных (в прямом смысле этого слова) затратах, связанных с выполнением этих показателей при воплощении их в изделие.

Материальные показатели (М) вытекают из материального содержания изделия, которое часто упрощенно называют его конструкцией, конструктивом, и отвечают на вопрос: «Из чего и как оно сделано?» К этим показателям, например, относятся масса, объем, надежность, стоимость и т. д.

Любое изделие — это прежде всего материал, выбранный человеком и соответствующим образом обработанный, с тем чтобы изделие в целом могло овеществить требуемые от него свойства, т. е. функциональные показатели. Отсюда вытекает, что свойства изделия пропорциональны массе материалов, затраченных на их воплощение. В свою очередь, каждый функциональный показатель (каждое свойство) имеет свой материальный эквивалент в виде массы, стоимости и т. д. Символически это положение можно записать в виде отношений $K_m = m/\Phi$, $K_v = V/\Phi$, $K_c = C/\Phi$, которые назовем относительными показателями качества по критерию массы, объема, стоимости и т. д. В зависимости от назначения изделия и критичности этих показателей любому из них может отдаваться предпочтение.

В общем относительный показатель качества определяет научно-технический уровень развития данной отрасли техники, в том числе уровень достижений в проектно-конструкторских и техноло-

*) Рассматривается возможность обобщенного выражения для Φ , например через объем информации или пропускную способность устройства (по Шеннону, Харкевичу).

гических направлениях. Чем меньше этот показатель, тем совершеннее изделие.

В ряде случаев проектирования изделий масса является критической величиной, т. е. $K_m \leq K_{m \text{ доп.}}$. При конструировании таких изделий иногда оказывается невозможным при заданном объеме функций удовлетворить это условие; тогда необходимо искать другие, более прогрессивные способы овеществления заданных функциональных показателей. Если такой поиск не дает результатов, то приходится пересматривать данные «соседних» систем или характеристики системы более высокого ранга.

Раскроем связь функциональных и материальных показателей качества на примере одного из важнейших материальных показателей качества — массы изделия; заметим еще раз, что и другие материальные показатели легко вписываются в рассматриваемую методикку, если им отдается предпочтение.

Пусть $\Phi_1 \dots \Phi_\alpha$ суть совокупность функциональных показателей качества проектируемой конструкции (изделия). Обеспечение каждого из этих показателей требует овеществления в соответствующих массах $m_1 \dots m_\alpha$. Следовательно, общая масса конструкции будет

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_\alpha. \quad (1.6)$$

Это уравнение будем называть *балансом масс* (в других примерах могут быть уравнения баланса стоимости, интенсивности отказов и т. д.). Связывая каждую из слагаемых масс с соответствующими функциональными параметрами изделия через функции $f_1 \dots f_\alpha$, получаем

$$m = f_1(\Phi_1) + f_2(\Phi_2) + \dots + f_\alpha(\Phi_\alpha). \quad (1.7)$$

Это уравнение, заимствованное из авиационной техники [1.3], называют уравнением существования изделия. Его можно с успехом использовать при проектировании МЭА для подвижных объектов, для которых масса является одним из главных показателей качества и ее минимизация является критерием предпочтения, т. е. предметом синтеза (оптимизации) при проектировании изделия. В применении к МЭА уравнение существования отвечает на вопрос о возможности овеществления электродинамических и радиотехнических параметров в конкретном изделии при заданных требованиях к его массе.

Удобным выражением уравнения (1.7) является его нормализованная форма (форма относительных масс)

$$1 = f_1(\Phi_1)/m + f_2(\Phi_2)/m + \dots + f_\alpha(\Phi_\alpha)/m$$

или

$$1 = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_\alpha. \quad (1.8)$$

Эта форма уравнения наглядно показывает долю использования единицы массы для удовлетворения различных свойств изделия.

Определение $f_1 \dots f_\alpha$ часто представляет собой трудную задачу, так как они могут выражаться сложными функциональными зависимостями, не всегда имеющимися в распоряжении конструктора-проектировщика. Они определяются либо эмпирическим путем на основе обобщения и анализа предшествующих разработок, либо расчетным путем исходя из уровня и перспектив развития элементной базы и технологии. Первый путь чреват опасными последствиями, так как может приводить к созданию заранее устаревших конструкций и развитию психологической инерции, которая, как известно, является главным препятствием для роста творчества и изобретательства.

В общем задача определения $f_1 \dots f_\alpha$ формулируется так: найти некоторую функцию f , связывающую функциональный параметр (показатель качества) Φ_i данного изделия с его материальным параметром, в нашем случае массой m_i , т. е. $m_i = f(\Phi_i)$. Эти функции могут быть линейными, например типа $m_i = a + b\Phi_i$, или нелинейными $m_i = a + \Phi_i^b$, где a, b — постоянные коэффициенты. Отсутствие связей затрудняет оптимизацию и снижает качество конструкции, поэтому в промышленности ведется работа по их выявлению. В дальнейшем для установления таких связей будем пользоваться коэффициентами связи или удельными коэффициентами:

$$m_i = k_0(\Phi_i) \Phi_i. \quad (1.9)$$

Здесь $k_0(\Phi_i)$ есть удельный коэффициент параметра Φ_i , имеющего размерность кг/ Φ_i . Например, для передающего устройства, мощность которого измеряется в ваттах, размерность будет кг/Вт и т. д. Будем считать, что $k_0(\Phi_i)$ для каждого значения Φ_i нам известно, или там, где это возможно, принимаем связь между m_i и Φ_i линейной: $m_i = k_0\Phi_i$.

Абсолютная величина удельного коэффициента k_0 определяется выбранной элементной базой и уровнем конструирования, и, в свою очередь, удельные коэффициенты характеризуют научно-технический прогресс в данной отрасли. Заметим также, что наличие удельных коэффициентов облегчает решение задачи автоматизированного проектирования на основе САПР.

Планарные конструкции характерны для МЭА третьего и тем более четвертого поколения в виде полупроводниковых БИС, МСБ и печатных плат. Поэтому в решении задач оптимизации компоновки конструкций удобно пользоваться удельными коэффициентами использования площади конструкции (s), т. е.

$$k_{s0} = s/\Phi, \quad (1.10)$$

и соответственно уравнение существования запишется как

$$s = f_{s1}(\Phi_1) + f_{s2}(\Phi_2) + \dots + f_{s\alpha}(\Phi_\alpha). \quad (1.11)$$

В нормализованном виде (форма относительных площадей) оно примет вид

$$1 = \frac{f_{s1}(\Phi_1)}{s} + \frac{f_{s2}(\Phi_2)}{s} + \dots + \frac{f_{s\alpha}(\Phi_\alpha)}{s}. \quad (1.12)$$

Выражение $s_i = k_{s0}(\Phi_i) \Phi_i$ показывает связь параметра Φ_i с затраченной площадью s_i конструкции через удельный коэффициент k_{s0} , имеющий размерность $\text{м}^2/\Phi_i$. Перейти к массообъемным характеристикам нетрудно: полученные значения s_i нужно умножить на высоту конструкции и удельную плотность ее материала.

Рассмотрим примеры использования уравнений существования в задачах оптимизации.

Пример 1.5. Система $S_5 \dots S_4$. Для проверки соответствия летно-технических характеристик (ЛТХ) самолета S_5 его конструктивным данным составляется уравнение существования путем расчета удельных масс его составных частей (система S_4):

$$1 = \mu_{\text{РЭО}} + \mu_{\text{пл}} + \mu_{\text{ДУ}} + \mu_{\text{Т}} + \mu_{\text{Н}}. \quad (1.13)$$

Здесь (по порядку слагаемых) μ — удельные массы: комплекса радиоэлектронного оборудования, планера, двигательной установки, топлива и полезной нагрузки. Из выражения (1.13) видно, что если по уровню технологии их сумма оказывается больше единицы, то самолет с заданными ЛТХ летать не сможет. В общем случае это уравнение указывает на тесную связь радиоэлектронного комплекса с ЛТХ самолета.

Пример 1.6. Система $S_3 \dots S_2$. Известно, что существенную часть общей массы устройства (S_3 в наших примерах — РЛС) занимает масса передатчика и антенны. Энергетический потенциал Π этой части РЛС будет

$$\Pi = PG_a, \quad (1.14)$$

где P — мощность передатчика; G_a — коэффициент усиления антенны.

Баланс масс этих частей РЛС соответственно будет $m = m_P + m_{G_a}$, где m — заданная величина общей массы передатчика и антенны, а слагаемые — масса передатчика и антенны. Согласно общим положениям, приведенным выше, положим, что связь параметров (показателей качества) P и G_a с их массами будет соответственно равна $m_P = f_P(P) = k_{0P}(P)P$ и $m_{G_a} = f_{G_a}(G_a) = k_{0G_a} \times (G_a)G_a$; тогда уравнение существования, т. е. возможность создания передатчика и антенны с заданной общей массой m , можно записать так:

$$1 = k_{0P}(P) (P/m) + k_{0G_a}(G_a) (G_a/m). \quad (1.15)$$

Здесь k_{0P} и k_{0G_a} — относительные удельные показатели качества, или, сокращенно удельные коэффициенты передатчика и антенны. Их размерности: кг/Вт и $\text{кг/единицу усиления антенны}$. Удельные коэффициенты отражают достигнутый уровень техники и технологии этих устройств. Если, например, одно из слагаемых или их сумма оказывается больше единицы, то это означает, что устройство с энергетическим потенциалом Π и заданной массой m построено быть не может. Следовательно, необходим пересмотр принятых решений в выборе варианта конструкции или нужна постановка исследований для повышения уровня техники, т. е. уменьшения удельных коэффициентов.

Пример 1.7. Система $S_2 \dots S_1$. Изложенный подход можно использовать и для оценки качества конструирования: пусть масса какой-либо части устройства равна m . Тогда баланс масс [1.1] можно записать в виде

$$m = m_N + m_m + m_n, \quad (1.16)$$

где слагаемые соответствуют массе полезных элементов и компонентов, массе межсоединений и несущей (механической) части конструкции. Переходя к записи уравнения в относительных массах, получаем

$$1 = m_N/m + m_m/m + m_n/m. \quad (1.17)$$

Если при этом окажется, что показатель m_N/m занимает малую долю от единицы в сравнении с остальными двумя слагаемыми, то это будет указывать на недостатки в конструкции или на неиспользованные резервы.

Этот же способ оценки качества можно применить и к МСБ и к БИС. Вследствие планарности этих изделий удобно использовать баланс площади и уравнение относительных площадей. Пусть общая площадь подложки МСБ будет s ; тогда можно записать

$$s = s_K + s_R + s_C + s_M + s_{CB}, \quad (1.18)$$

где s_K , s_R , s_C , s_M , s_{CB} — соответственно площадь, занятая компонентами, пленочными резисторами, конденсаторами, проводниками, а последнее слагаемое — незаполненная (свободная) площадь. Переходя к уравнению относительных площадей, получаем

$$1 = s_K/s + s_R/s + s_C/s + s_M/s + s_{CB}/s, \quad (1.19)$$

что сразу позволяет вскрыть качество топологии и неиспользованные резервы.

В равной мере этот прием можно распространить и на БИС, где будет фигурировать площадь, занимаемая активными элементами (например, транзисторами), а также площадь, занимаемая межэлементной изоляцией, контактными площадками и т. д.

Рассмотрим способы определения величин удельных коэффициентов (относительных показателей качества). Выше уже упоминалось о трудностях определения связи (удельных коэффициентов k_0) между свойствами и материальным содержанием изделий; упоминалось также и о сочетании эмпирических и расчетно-аналитических методов решения этой задачи. Приведем несколько примеров ее решения.

Пример 1.8. Антенна с приводом [1.4]. На основании анализа существующих конструкций и обработки полученных данных найдена следующая эмпирическая зависимость ее массы от ее главного параметра — коэффициента усиления (G_a): $m = 3 \cdot 10^{-6} G_a - 6 \cdot 10^{-3} G_a + 6$ [кг]. Эта формула справедлива для $G_a = 10^3 < 5 \cdot 10^3$ и для СВЧ диапазона волн. Тогда искомое k_0 будет $k_0 = m/G_a = 3 \cdot 10^{-9} G_a - 6 \cdot 10^{-3} + 6/G_a$ [кг/усл. ед.].

Пример 1.9. Мощный передатчик РЛС [1.4]. Известно, что найдено эмпирическое уравнение для массы передатчика $m = 2,5 + 0,4P$, где P — импульсная мощность передатчика, построенного на магнетроне (в кВт). Тогда $k_0 = (2,5/P) + 0,4$ [кг/кВт] при $10 < P < 100$ кВт или в пересчете на среднюю мощность [кг/Вт].

Одним из типов полупроводниковых передатчиков на МСБ может служить приемопередающий модуль (рабочая частота 9 ГГц) активной фазированной решетки типа МЕРА [1.4]. Этот модуль имеет выходную мощность 0,7 Вт в непрерывном режиме и занимает объем 25 см³ с массой около 100 г; площадь модуля — 20 см². По этим данным определяем примерную величину $k_0 = 0,14$ кг/Вт, или, в пересчете на площадь модуля, $k_0 = 35$ см²/Вт.

Рассмотрим способы определения удельных коэффициентов приемно-усилительных трактов и цифровых устройств. Типичной самой общей структурной схемой приемно-усилительного тракта является цепочка вида «усилитель → фильтр → накопитель (интегратор) → пороговое устройство». Основными электрическими (функциональными) характеристиками этой структуры являются: коэффициент шума, коэффициент передачи, полоса пропускания фильтра, внеполосное затухание, необходимость введения АРУ и т. д.

Установление связи такой большой и разнообразной номенклатуры функциональных показателей с материальными показателями — пока еще не решенная задача. Для ее решения может быть предложен упрощенный способ, суть которого заключается в отождествлении функциональных показателей устройства с количеством элементов его электрической схемы, необходимым для их удовлетворения. Иными словами, функциональная сложность может быть приближенно выражена через определенное количество активных, например транзисторных, элементов схемы, так называемых функциональных транзисторов. Материальное овеществление функциональных показателей в свою очередь осуществляется овеществлением этих элементов с занимаемыми объемами, площадью и массой, потребляемой мощностью, надежностью и стоимостью. Отсюда можно определить и удельные коэффициенты в следующих размерностях: $\text{см}^3/\text{эл}$, $\text{см}^2/\text{эл}$, $\text{г}/\text{эл}$, ...

Важными показателями для проведения таких расчетов являются плотность упаковки в объеме и на плоскости (γ_v , γ_s) и соответствующие коэффициенты дезинтеграции q_v и q_s .

Приведем теперь количественные оценки сказанного; широкополосный усилитель с коэффициентом передачи по напряжению $K_u=100$ и шириной полосы до 30 МГц выполнен в виде ИС типа 1УС751, которая содержит $N_a=11$ схемных элементов; площадь кристалла $s_k=1 \text{ мм}^2$. Тогда плотность упаковки $\gamma_s=N_a/s_k=11 \text{ эл}/\text{мм}^2$. Очевидно, что удельный коэффициент будет $k_{0s}=1/\gamma_s=0,09 \text{ мм}^2/\text{эл}$. Допустим, что в задачу конструктора входит построение усилителя промежуточной частоты с $K_u=1000$ на этих ИС. Расчетом определено, что для этого потребуется три таких ИС; располагая их на одной микросборке и рассчитывая коэффициент дезинтеграции по площади q_s , находим требуемую площадь подложки: $s_{\Pi}=k_{0s} \cdot 3N_a \cdot q_s=0,09 \cdot 33 \cdot q_s$.

Аналогичный подход может быть принят и к определению k_0 для цифровых логических и запоминающих устройств. Для этих устройств k_0 может определяться как отношение массы, объема, площади и т. д. относительно бита или байта информации.

Вторичные источники питания помимо требований к количеству номиналов напряжений, стабильности и величине пульсаций имеют главные функциональные параметры: отдаваемую (полезную) мощность и к. п. д., которые определяют тепловую напряженность устройства. Эти показатели связаны с материальными показателями через отношения: $\text{Вт}/\text{кг}$, $\text{Вт}/\text{дм}^3$, $\text{Вт}/\text{см}^2$. Очевидно, что обратные значения этих величин и являются искомыми удельными коэффициентами.

В заключение еще раз отметим, что минимизация удельных коэффициентов показателей качества является основной целью оптимального конструирования при условии соблюдения соответствующих ограничений.

1.2. Основные задачи и порядок внешнего проектирования устройств МЭА и микросборок

1.2.1. Обоснование исходных данных

Как уже говорилось, этап внешнего проектирования конструкции (изделия) заключается в обосновании исходных данных для ее разработки. Недостаточно тщательно обоснованные исходные данные и тем более назначенные произвольно приводят либо к неоправданным излишкам в параметрах изделия, в том числе в его стоимости, либо к тому, что изделие не будет в состоянии выполнять возложенные на него функции.

Проследим процесс и методы обоснования исходных данных по системной иерархической цепочке $S_5 \dots S_1$, т. е. «от самолета до микросборки». Для понимания этого процесса и его методов, имея в виду множество исходных показателей, с которыми приходится работать на практике *) и во избежание их излишнего нагромождения, в этом разделе будем рассматривать отдельно выбранные исходные данные, например массу и дальность действия.

Микроэлектронная аппаратура (S_4, S_3). Одним из важных исходных показателей, который устанавливается в интересах системы S_5 (самолет), является масса m_{41} бортового комплекса S_{41} . Обоснование этого параметра проводится путем установления связи между массой и ЛТХ самолета S_5 . Оценим величину этих связей для самолета неизменной конструкции, проследив, как влияет изменение m_{41} на дальность L полета. Для этого воспользуемся уравнением существования самолета (1.13). Положим, что для достигнутого уровня техники $k_{0T} = k_{0T}L$, где k_{0T} — удельный коэффициент, характеризующий расход топлива (кг/км); тогда

$$1 = \mu_{РЭО} + \mu_{пл} + \mu_n + \mu_{ДУ} + k_{0T}L. \quad (1.20)$$

Полагая величины $\mu_{пл}$, μ_n , $\mu_{ДУ}$, k_{0T} постоянными и заданными ЛТХ, можно прийти к следующим заключениям: если относительная масса комплекса $\mu_{РЭО}$ соответствует приведенному равенству, то можно считать, что его абсолютная масса m_{41} обоснованна; если $\mu_{РЭО}$ превышает эту величину, что ЛТХ не могут быть выполнены. При невозможности восстановить равенство единице правой части уравнения за счет других членов уравнения необходимо исследовать возможности дальнейшей микроминиатюризации комплекса.

Пример 1.10. Связь между массой комплекса и дальностью L . Для ее определения используем пример из литературы [1.3, с. 33, 34], где $\mu_{РЭО} = 0,1$; $\mu_{пл} = 0,3$; $\mu_n = 0,1$; $\mu_T = 0,1$; $\mu_{ДУ} = 0,4$, предположив при этом, что комплекс РЭО построен на элементной базе третьего поколения. Переход на элементную базу четвертого поколения с применением микросборок (см. рис. 1.1, S_2) позволит уменьшить массу комплекса от 2 до 5 раз; соответственно обратив этот выигрыш в массу топлива μ_T , получим выигрыш в дальности полета в 1,5...1,8 раз.

*) На практике эта работа представляет собой очень сложный процесс, требующий привлечения всех методов и средств современного инженерного синтеза.

Другим избранным исходным показателем является *дальность действия РЛС комплекса S_3* . Ранее уже упоминалось, что в качестве примера устройства нами выбрана РЛС. Этот выбор объясняется тем, что РЛС среди всего набора устройств является одним из наиболее сложных. Она включает в себя все виды аппаратуры: СВЧ, приемно-передающие, излучающие, аналоговые и цифровые блоки. Вместе с этим методы внешнего проектирования, показанные на примере выбранного устройства, легко переносятся

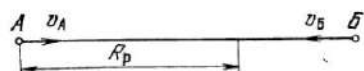


Рис. 1.3. К обоснованию дальности действия РЛС в примере задачи встречи двух самолетов

и на другие, равные по сложности или менее сложные устройства комплекса.

Выбор в качестве исходного параметра дальности действия РЛС для иллюстрации одного из возможных методов его обоснования оправдан тем, что мощность P , излучаемая передатчиком, связана с R как $P \sim R^4$, т. е. для удвоения R потребовалось бы увеличить мощность в 16 раз. В свою очередь, масса передатчика вносит основной вклад в массу РЛС в целом, в чем и заключается критичность этого параметра и необходимость тщательного его обоснования.

Перейдем непосредственно к изложению существа одного из методов его обоснования. Рассмотрим задачу встречи [1.4] самолета А с самолетом Б (рис. 1.3). Предположим, что сближение происходит при прямолинейном встречном движении самолетов. Пусть самолет А имеет на борту РЛС, в задачу которой входит обнаружение самолета Б на дальности R , которую требуется обосновать в процессе внешнего проектирования. В интересах выполнения операции встречи задается рубеж (R_p), на котором должна произойти встреча; R_p отсчитывается от текущего положения самолета Б в момент начала операции. Примем, что скорости самолетов А и Б при встречном движении соответственно равны v_A и v_B . Задача решается в три этапа:

— определяется интервал времени Δt_0 до начала сближения, необходимый для радиолокационного обнаружения самолета Б с заданной вероятностью определения его принадлежности и принятия решения о начале сближения; за это время самолет Б пройдет путь $R_1 = v_B \Delta t_0$;

— время, затраченное самолетом А для достижения рубежа R_p , примем равным Δt_A и, следовательно, $R_p = v_A \Delta t_A$;

— в свою очередь, за это время самолет Б пройдет путь, равный $R_2 = v_B \Delta t_A$.

Искомая дальность действия РЛС будет равна $R = R_1 + R_p + R_2$. После подстановки времени и скорости и необходимых преобразований получим

$$R = v_B \Delta t_0 + R_p (1 + v_B / v_A). \quad (1.21)$$

Заметим, что R_p можно выразить, не учитывая необходимого запаса, через половину дальности полета самолета А [см. (1.3)]; тогда

$$R = v_B \Delta t_0 + (L/2) (1 + v_B/v_A). \quad (1.22)$$

Приведенные зависимости также демонстрируют тесную связь и влияние системы S_3 и ее данных D_{31} на S_4 и в конечном счете на S_5 . Анализируя полученный результат, необходимо отметить:

— одним из возможных путей сокращения требуемой дальности действия (R) является автоматизация процесса обнаружения и принятия решения, что позволит сократить затраченное на это время. Этого можно достигнуть включением в состав РЛС бортовой ЭВМ при условии жесткой ее микроминиатюризации с помощью применения микросборок и БИС;

— сокращение R , в свою очередь, как уже отмечалось, уменьшит массу РЛС и, следовательно, долю массы ($\mu_{РЭО}$) комплекса S_4 , что, как было показано выше, повысит v_A ; увеличение v_A , в свою очередь, несколько сократит R и т. д. до достижения наилучшего решения.

Микросборки (S_2, S_1). В качестве примера выберем приемно-усилительный тракт (ПУТ) РЛС. Примем для обоснования следующие параметры: $P_{ш0}$ — плотность мощности шума на 1 Гц полосы пропускания, отнесенная ко входу приемника, K_u — коэффициент передачи ПУТ от входа до выхода, $m_{ПУТ}$ — масса ПУТ. Подчеркнем, что эти параметры являются следствием внутреннего проектирования РЛС, т. е. системы S_3 высшего ранга, и в свою очередь представляют собой исходные данные для системы S_2 низшего ранга. Действительно, $P_{ш0}$ является одной из внутренних характеристик РЛС, обеспечивающей ее дальность обнаружения; коэффициент передачи обеспечивает согласование напряжения выходного сигнала ПУТ с отображающими или вычислительными устройствами РЛС; масса ПУТ является частью общей исходной массы РЛС.

Плотность мощности шума $P_{ш0}$ [Вт/Гц] в этой размерности есть его энергия. Известно, что она связана с отношением сигнал/шум Q как $Q = P_c T_{наб} / P_{ш0}$ (при работе на согласованный фильтр), где P_c — мощность сигнала на входе ПУТ; $T_{наб}$ — время наблюдения (интегрирования) сигнала; Q относится к одной из важных внутренних характеристик РЛС, обеспечивающих ее заданную дальность обнаружения при заданной вероятности правильного обнаружения. Из приведенного отношения следует, что

$$P_{ш0} = P_c T_{наб} / Q. \quad (1.23)$$

Коэффициент передачи по напряжению K_u можно определить как $K_u = u_{вых} / u_{вх}$, где $u_{вых}$ — требуемое напряжение, согласующее ПУТ с блоками отображения информации или обработки (например, ЭВМ); $u_{вх}$ — напряжение сигнала на входе ПУТ, определяемое как $u_{вх} = (P_c r_{вх})^{1/2}$; здесь $r_{вх}$ — входное сопротивление ПУТ.

Масса ПУТ связана с массой РЛС ($m_{\text{РЛС}}$) через баланс масс

всей станции $m_{\text{РЛС}} = m_{\text{ПУТ}} + \sum_{i=1}^n m_i$, где $m_{\text{РЛС}}$ — величина заданная, а под знаком суммы — массы остальных (n) функциональных блоков

РЛС; отсюда находим $m_{\text{ПУТ}} = m_{\text{РЛС}} - \sum_{i=1}^n m_i$.

Переходя к внутреннему проектированию ПУТ, получаем необходимый набор данных (параметров, характеристик), как, например, промежуточные частоты ($f_{\text{пр}}$), ПУТ, ширина полосы пропускания (Δf), АЧХ, электрическая схема (СхЭ) и т. д. Эти данные необходимы для проектирования и выбора всех элементов МСБ S_1 , т. е. подложки, функциональных и полупроводниковых компонентов (ФК, ИС), а также микрокомпонентов и топологии.

Подытоживая рассмотренные примеры этого сквозного процесса внешнего проектирования, изобразим его в виде схемы на рис. 1.4. Из этого рисунка видно, что внешнее проектирование (обоснование

Рис. 1.4. Схема сквозного процесса внешнего проектирования системы на уровнях $S_5 \dots S_1$; исходные данные — числитель, внутреннее — знаменатель

исходных характеристик) чередуется с внутренним проектированием (стрелки вниз), данные внутреннего проектирования становятся исходными для конструирования и расчета нижнего звена. На рисунке показаны обратные связи (стрелки вверх) процесса в целях оптимизации конструкции. Так, например, может оказаться, что ПУТ может не вмещаться на одной МСБ и его нужно разместить на двух-трех МСБ или, наоборот, в одной МСБ, кроме ПУТ, можно разместить еще какую-либо функциональную часть устройства.

1.2.2. Особенности конструирования МСБ, критерии и правила

Критерии конструирования МСБ и МЭА не различаются. Суть их заключается в достижении возможно большей степени интеграции как в комплектующих микросборку компонентах (БИС), так и в микросборке в целом. Главной задачей конструктора микросборки и МЭА является устранение крупногабаритных компонентов, не совместимых с планарной формой микросборки. Эта задача может решаться двумя путями: миниатюризацией таких компонен-

тов или заменой их путем изменения электрической схемы устройства. Первый путь по ряду известных причин не перспективен. Второй путь, принятый в настоящее время, заключается в том, чтобы изменением электрической схемы устройства функции такого крупногабаритного компонента выполняли ИС, БИС или функциональные микрoeлектронные компоненты. Так, аналоговый резистивно-емкостный интегратор можно заменить интегратором на ИС; усилитель радиочастот, построенный на громоздких контурах, можно заменить широкополосным усилителем на ИС в комбинации с интегральным полосовым или цифровым фильтром на БИС.

Можно сформулировать обобщенное правило выбора элементной базы (ЭБ) в условиях поступательного роста сложности МЭА и МСБ: *следует выбирать такую ЭБ из изделий микроэлектроники, физико-технические характеристики которой еще далеки от теоретического или физического предела, но развиваются в сторону его достижения, а достигнутый их уровень уже позволяет начать их применение в проектируемых устройствах.*

В табл. 1.2 показаны области применения МСБ различных типов и совместимых с ними компонентов в основных функциональных частях МЭА. Таблица показывает, что МСБ применяются практически во всей номенклатуре устройств МЭА.

Одним из преимуществ применения МСБ в МЭА является возможность построения многоканальных устройств (модульные

Таблица 1.2

Функциональные части МЭА	Типы микросборок	Основные компоненты для микросборок
Генераторы и усилители СВЧ	СВЧ МСБ с сосредоточенными и распределенными микрополосковыми элементами	Бескорпусные СВЧ транзисторы и диоды; СВЧ ИС
Антенные фазированные решетки (АФР)	СВЧ МСБ в модулях, образующих АФР	То же
Усилители радиочастот с сосредоточенной избирательностью	Широкополосные усилительные МСБ	Интегральные фильтры: пьезо-акустоэлектрические, на поверхностных волнах Линейные полупроводниковые ИС
Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи	Аналого-импульсные и цифровые МСБ	Полупроводниковые ИС компараторов, операционных усилителей, цифровые БИС
Цифровые вычислительные и управляющие устройства, цифровые фильтры	Цифровые МСБ	Цифровые БИС средней и большой степени интеграции, в том числе БИС микропроцессоров
Устройства силовой электронной автоматики и вторичные источники питания	Силовые МСБ	Силовые бескорпусные транзисторы, диоды и БИС для управляющих цепей
Соединения между МСБ и устройствами МЭА	—	Пленочные полосковые шлейфы (схемы), светопроводы

структуры). Благодаря минимальным массам и объемам МСБ появляется возможность строить многоканальные функциональные блоки, что улучшает энергетические, надежность и функциональные характеристики устройств. Приведем несколько примеров.

Пример 1.11. Радиолокационная станция обнаружения. Из основ радиолокации известно, что при проектировании такой станции исходят из того, что дальность до цели и ее скорость относительно РЛС неизвестны. Задача обнаружения состоит в том, чтобы на данном направлении определить дальность и частоту приходящего от цели сигнала. Это делается двумя способами: либо созданием многоканальной системы, перекрывающей рассматриваемый диапазон задержек сигнала (дальность) и его частот (скорость), либо при помощи одноканальной системы, осуществляющей поиск по дальности и скорости. Возможно сочетание этих способов. Многоканальная система соответствует оптимальному обнаружению цели с неизвестными параметрами. Система с поиском при одинаковой мощности передатчика существенно проигрывает в дальности обнаружения в сравнении с многоканальной (беспоисковой) системой; эти потери обусловлены тем, что время на поиск цели ($T_{\text{п}}$), являясь исходным параметром, задано и ограничено; ведение поиска неизбежно сокращает время наблюдения цели ($T_{\text{наб}}$). Количественно это сокращение будет

$$N_k = \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{наб}}} = \frac{\Delta F_{\text{п}}}{\Delta F_{\text{к}}} \frac{\Delta t_{\text{п}}}{\Delta t_{\text{к}}}, \quad (1.24)$$

где $\Delta F_{\text{п}}$, $\Delta F_{\text{к}}$ — соответственно диапазон доплеровских частот и интервал частот, пропорциональных диапазону скоростей цели и интервалу скоростей, измеряемых одним каналом; $\Delta t_{\text{п}}$, $\Delta t_{\text{к}}$ — соответственно диапазон задержек и интервал задержки одного канала, пропорциональных дальности до цели.

Отсюда следует, что мощность передатчика РЛС поисковой системы должна быть (в зависимости от скорости флуктуации отраженного от цели сигнала) от $N_k^{1/2}$ до N_k раз больше, чем в многоканальной системе с указанными параметрами ($\Delta F_{\text{к}}$, $\Delta t_{\text{к}}$). В зависимости от исходных данных на конструирование РЛС использование многоканальности позволяет заменить генераторы на электронно-вакуумных приборах (ЭВП) генераторами на полупроводниковых приборах (ПП) в конструктивах МСБ. Одним из конкретных воплощений этой возможности является конструкция антенных фазированных решеток, состоящих из

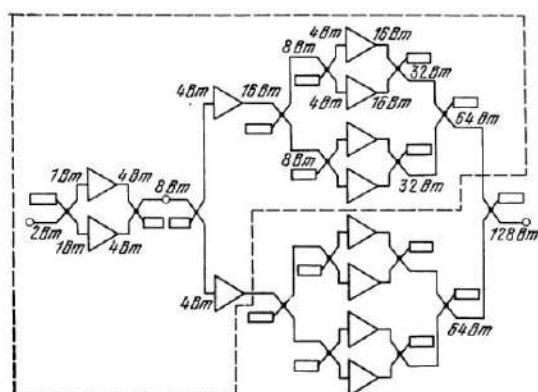


Рис. 1.5. Структурная схема многоканального широкополосного мощного усилителя со сложением мощности в нагрузке



Рис. 1.6. Модульная структура ЭВМ

СВЧ модулей на МСБ со сложением мощности модулей в пространстве. В свою очередь, приемно-усилительные многоканальные блоки на микросборках имеют существенно меньшую массу и габариты и большую надежность, что и определяет возможность создания многоканальных устройств.

Пример 1.12. Широкополосный УКВ усилитель мощности (рис. 1.5) [1.1]. Его выходная мощность равна 128 Вт при рабочем напряжении питания 26 В, при к. п. д. 35% в полосе частот 250...400 МГц. Конструкция усилителя хорошо реализуется на 6...8 МСБ.

Пример 1.13. Микроэлектронные ЭВМ. Как показано на рис. 1.6, необходимое число модулей ЭВМ подключается к общим шинам обмена. Такое построение обеспечивает увеличение мощности ЭВМ путем присоединения дополнительных модулей.

Главными достоинствами многоканальных (модульных) конструкций являются: возможность унификации МСБ на различных уровнях функциональной схемы и существенное повышение надежности. Модульная структура устройств содержит в себе эффект резервирования, выход из строя одного модуля не приводит к внезапному полному отказу системы в целом, как это произошло бы при одноканальной схеме; многоканальная система в этих случаях при некоторой утере функций остается работоспособной. Так, например, если в РЛС обнаружения выпадает лишь один частотный канал обнаружения по скорости, то остальные будут работоспособны; в АФР отказ до 10% модулей приводит лишь к незначительному уменьшению коэффициента усиления; выход из строя одного модуля в ЭВМ, при соответствующей ее организации, скажется на быстрейшем действии или на объеме памяти, а в целом ЭВМ останется работоспособной.

Таким образом, при модульном построении устройств из n модулей оказывается справедливым неравенство

$$\Lambda_z < \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (1.25)$$

где Λ_z — интенсивность отказов устройства, а λ_i — интенсивность отказов i -го модуля.

Другим преимуществом применения МСБ в МЭА является *возможность мультиплексирования*, т. е. выполнения нескольких различных функций одним и тем же устройством, блоком или элементом данного изделия. Понятие это очень широкое, и для его пояснения укажем некоторые случаи применения этого принципа:

- уплотнение линий передачи данных и обмена информацией, например между функциональными блоками устройства или между устройствами комплекса;

- уплотнение функциональных блоков или устройств для передачи данных от нескольких датчиков информации, например передача данных через один общий усилитель или через один общий радиопередатчик;

- уплотнение конструкции («комплексирование функций»).

На первый взгляд, последнее толкование принципа мультиплексирования может вызвать оправданные возражения. Однако если этот принцип истолковать в достаточно широком смысле, то его

можно применить и к созданию механических конструкций, например объединить в единый конструктив (моноблок) несколько функционально законченных устройств единого комплекса. Связь этих принципов с основными критериями конструирования МЭА на основе МСБ покажем на примере уплотнения линий передачи данных.

Рассмотрим на простейшем примере (рис. 1.7), а затем сравним два способа передачи данных: обычный (а) и с уплотнением (б). Здесь А и Б — функциональные единицы (блоки, устройства и т. д.), между которыми происходит обмен данными. Пусть для этого обмена по первой схеме (рис. 1.7,а) требуется M линий (проводов) *).

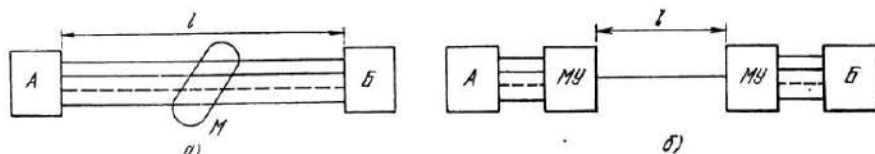


Рис. 1.7. Способы передачи данных в линиях МЭА:

а — обычный, по жгуту проводов; б — мультиплексный, с уплотнением по одному проводу

По схеме уплотнения (рис. 1.7,б) в блоки А и Б встраиваются мультиплексирующие устройства (МУ), уплотняющие и адресующую информацию, вследствие чего она может быть передана по одному проводу ($M=1$). Устройства МУ и провод образуют уплотненную линию. Для сравнения способов а и б в качестве показателей качества примем соответственно массу линий m_a , m_b и интенсивность их отказов Λ_a и Λ_b . Развернем эти показатели в уравнения:

$$m_a = Ml\delta; \quad \Lambda_a = 2M\lambda_n + M\lambda_{пр}, \quad (1.26)$$

где λ_n — интенсивность отказов соединений; $\lambda_{пр}$ — интенсивность отказов провода; δ — погонная масса; l — длина линии;

$$m_b = 2m_{МУ} + l\delta, \quad (1.27)$$

где $m_{МУ}$ — масса мультиплексирующего устройства;

$$\Lambda_b = 2\lambda_{МУ} + 2\lambda_n + \lambda_{пр}, \quad (1.28)$$

где $\lambda_{МУ}$ — интенсивность отказов МУ.

Очевидно, что уплотненная линия будет себя полностью оправдывать, если $m_b \ll m_a$, а $\Lambda_b < \Lambda_a$.

Если МУ выполнено на БИС и микросборках (IV поколение), масса которых исчисляется граммами, то при достаточно больших значениях l приведенные неравенства становятся очевидными, что и утверждает преимущества применения БИС и МСБ. Однако следует отметить, что принятые показатели качества (m , Λ) в свою

*) В приведенной модели для упрощения принято, что отказ хотя бы одного провода из M проводов приводит к катастрофическому отказу всей линии передачи информации.

очередь зависят от других показателей — скорости и объема передаваемой информации, при росте которых указанные условия могут нарушаться. Выбор наилучшего варианта уплотненной линии решается в процессе оптимального конструирования. Разумеется, при реальном проектировании все приведенные соотношения с учетом схемотехники и технологии МУ должны быть составлены надлежащим образом.

Еще одним преимуществом применения МСБ является то, что благодаря уже упоминавшемуся постоянному увеличению степени интеграции цифровых БИС открываются широкие возможности внедрения всех преимуществ цифровой техники в микроминиатюрные устройства МЭА. Это — управление режимами аппаратуры и автоматизация этих процессов, замена ненадежных механических органов настройки электронными, замена электромеханических шкальных приборов цифровыми (не механическими) и т. д. Внедрение в конструирование МЭА этих приемов иногда называют *цифровизацией*.

В то же время применение микросборок при конструировании МЭА имеет ряд ограничений. К числу наиболее важных из них относится *тепловая напряженность*. Чтобы обеспечить допустимый тепловой режим аппаратуры, необходимо учитывать следующее:

- уменьшение объемов изделий увеличивает удельные тепловые нагрузки;
- низкие напряжения, необходимые для питания ИС, снижают потребляемую мощность и, следовательно, величину потерь;
- повышение степени интеграции уменьшает паразитные емкости ИС и тем самым снижает зарядные токи, обуславливающие тепловые потери за их счет;
- разрабатываются БИС с малым потреблением мощности питания.

Несмотря на эти облегчающие факторы, реализация потенциальных возможностей микроминиатюризации ограничивается возрастанием тепловой напряженности конструкций. Для преодоления этого необходимо вести разработки с учетом отвода тепла, соизмеримых с габаритами приборов. Иначе говоря, достижению наилучших массогабаритных показателей устройств и блоков препятствует их тепловая напряженность; с увеличением температуры блока растет интенсивность его отказов. Таким образом, объем блока V_b , интенсивность отказов Λ_b и его температура T_b оказываются взаимно связанными. Правильное решение задачи заключается в разработке теплоотводящего устройства с объемом V_T и интенсивностью отказов λ_T , которое удовлетворяло бы условиям $V_T \ll V_b$ и $\lambda_T \ll \Lambda_b$.

Ввиду относительной малости величин V_T и λ_T получаем нужное решение: $V_\Sigma \approx V_b$, а $\Lambda_\Sigma \approx \Lambda_b$; здесь V_Σ , Λ_Σ — объем и интенсивность отказов блока со встроенным устройством теплоотвода.

Количество внешних соединений и количество выводов из МСБ и БИС также является одним из препятствий к достижению высоких показателей микроминиатюризации и надежности, поскольку

соединения, занимая большие объемы и площади, одновременно являются потенциальными носителями отказов.

Сосредоточение максимального числа соединительных проводников в ИС, а следовательно, и максимальное сокращение числа соединений между ними — важная особенность конструирования БИС, МСБ и МЭА в целом. При разбиении функциональной схемы устройства на БИС и микросборки целесообразно эту задачу решать минимизацией количества выводов (контактных площадок), даже вводя некоторую функциональную избыточность или используя мультиплексирование.

В качестве показателя эффективности построения межсхемных соединений используют так называемый показатель функционального разбиения

$$\text{ПФР} = B/M, \quad (1.29)$$

где B — число вентилях или других элементов в ИС или микросборке; M — число выводов из ИС.

Руководствуясь этим показателем, схему всего устройства можно рационально разбивать на блоки, МСБ и БИС (конечно, с учетом других факторов, влияющих на общий показатель качества). Очевидно, что наибольший выигрыш в ПФР можно получить при построении крупных БИС и микросборок.

1.2.3. Порядок оптимального проектирования (синтеза)

Оптимальное проектирование может основываться на методах оптимального конструирования, изложенных в § 1.1 и 1.2. Ниже излагается общая схема*) решения этой задачи путем «сквозного» проектирования сверху вниз (рис. 1.4), т. е. от устройства до микросборки, поскольку устройство определяет необходимый набор МСБ для его конструктивной реализации в виде готового изделия или его опытного образца. Решение задачи проводится начиная с уровня S_3 .

I. В начальной стадии на этапе разработки технического задания формируются условия задачи, а также вся совокупность данных (внешних и внутренних), относящихся к устройству S_3 , т. е.

$$D_3 = \{D_{31}, D_{32}, \dots, D_{3n}\}. \quad (1.30)$$

Затем эти данные разделяют на группы по соответствующим признакам, пример которых дан в табл. 1.1.

В группу Y записывают данные, определяющие назначение и тип устройства S_3 , условия воздействия внешней среды и т. д., тем самым образуется группа данных под символом Y ; если какой-либо параметр D_{3i} относится к этой группе, то его обозначают соответствующим символом Y_{3i} , т. е.

$$Y = \{Y_{31}, \dots, Y_{3i}\}. \quad (1.31)$$

*) Напомним, что решение этой задачи не может быть полностью формализовано, поэтому в схеме ее решения находят место как эвристические, так и математические приемы.

В группу O_S заносят данные, определяющие структуру устройства и представляющие собой ограничения на структуру. В их число должны быть включены обоснованные и согласованные (см. п. 1.2.1) исходные данные, т. е. внешние характеристики устройства:

$$O_S = \{O_{S1}, \dots, O_{Si}\}. \quad (1.32)$$

Эти ограничения могут быть жесткими типа равенств или нежесткими (необязательными). Нежесткие ограничения позволяют, пользуясь обратными связями (рис. 1.4), улучшать показатели качества конструкции.

В группе K объединяются показатели качества устройства; их величинами варьируют в процессе проектно-конструкторской разработки:

$$K = \{K_{31}, \dots, K_{3m}\}. \quad (1.33)$$

В группу O_K записывают ограничения на показатели качества. В зависимости от выбранного критерия предпочтения, например минимизации показателей качества, эти ограничения имеют вид неравенства типа $K_{3i} \leq K_{3i\text{доп}}$, т. е. любой из показателей качества в процессе их варьирования не должен превышать наперед заданного значения.

II. Исходя из назначения изделия составляется его математическая модель

$$f(K_{31}, K_{32}, \dots, K_{3m}) = \text{const}. \quad (1.34)$$

Если составление математической модели затруднено, то ее частично или полностью заменяют упорядоченной совокупностью данных

$$D\{K_{31}, K_{32}, \dots, K_{3m}\}. \quad (1.35)$$

Математическую модель устройства S_3 разрабатывают после того, как по условиям задачи установлен тип устройства (данные группы Y) и с обязательным учетом данных группы O_S , т. е. структурных ограничений, накладываемых, например, на выбор рода работ, тип сигнала и т. д. Разработанная модель является основанием для разработки структурной или функциональной схемы S_3 .

III. Структурная (или функциональная) схема, разработанная на основании модели, должна содержать информацию о функциональном назначении каждого элемента схемы с соответствующими функциональными показателями. На этой стадии решения задачи материальные показатели еще не участвуют. Поэтому разработан-

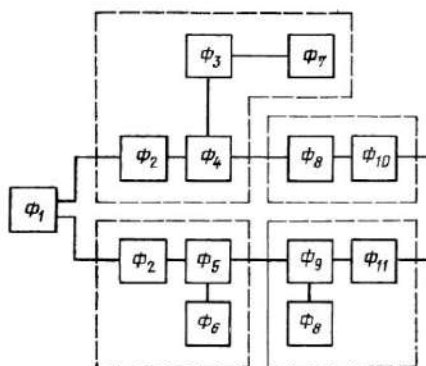


Рис. 1.8. Условная функциональная схема устройства:

$\Phi_1, \dots, \Phi_{11}$ — совокупность функциональных параметров (характеристик) элементов. Штриховой линией обведены границы предполагаемых МСБ при разбиении схемы на МСБ; $\Phi_i \equiv K_i$

ную структурную схему следует рассматривать как ее первый вариант (первое приближение), который может корректироваться по результатам последующих этапов. Условная функциональная схема представлена на рис. 1.8. Далее, функциональную схему разбивают на микросборки и на другие части устройства, как показано на рис. 1.1 (система S_2). Зная состояние элементной базы (система S_1), ее функциональные и материальные параметры, определяют связи между функциональными и материальными параметрами: $M_i = k_{0i} \Phi_i$; здесь Φ_i — функциональный параметр; k_{0i} — удельный показатель качества (сокращенно — удельный коэффициент). Установив эти связи и выбрав критерий предпочтения, получим уравнение баланса материальных показателей качества:

$$K_{\text{предп}} = k_{01} \Phi_1 + k_{02} \Phi_2 + \dots + k_{0m} \Phi_m. \quad (1.36)$$

Для анализа распределения материальных показателей удобно записать их в форме относительных показателей [см. (1.1)]:

$$1 = (k_{01} \Phi_1 + k_{02} \Phi_2 + \dots + k_{0m} \Phi_m) / K_{\text{предп}}. \quad (1.37)$$

Если в качестве критерия предпочтения выбирают такие показатели, как масса или объем, в выражениях для баланса масс (объема) (1.36), (1.37) необходимо учитывать коэффициенты дезинтеграции масс и объемов, а также соответствующие издержки на теплоотвод. Заметим, что учет этих факторов может быть заранее включен в величины удельных коэффициентов.

Для отыскания наилучшего значения $K_{\text{предп}}$ бывает целесообразно решать эту задачу математическим синтезом. В этом случае уравнение (1.36) представляют как целевую функцию, а ограничениям служат данные групп O_s, O_k .

IV. В соответствии с порядком проектирования на этом этапе проводится проверка выполнения ограничений (допустимых значений).

Если в качестве $K_{\text{предп}}$ была выбрана, например, масса изделия, то проверке подлежат его объем

$$V = k_{v01} \Phi_1 + k_{v02} \Phi_2 + \dots + k_{v0m} \Phi_m \quad (1.38)$$

(при этом $V \leq V_{\text{доп}}$), а также стоимость, надежность и др. Из этих проверок нельзя исключить фактор тепловой напряженности изделия, т. е. мощность рассеивания (потерь) $P_{\text{рас}}$, отнесенную к объему изделия или его поверхности, т. е. $P_{\text{рас}}/V \leq P_{\text{уд рас доп}}$, где последняя есть допустимая удельная мощность рассеивания.

V. Если полученная величина $K_{\text{предп}}$ не удовлетворяет заданному значению или имеется возможность ее дальнейшего улучшения (минимизации), то обращаются к структурной схеме и модифицируют ее путем вариации ее структуры и (или) величин показателей качества $K_1, K_2, \dots, K_m$, не нарушая, однако, правой части уравнения модели (1.34). Другим путем является пересмотр элементной базы, с тем чтобы на критических параметрах Φ_i получить меньшие значения $k_{0i} \Phi_i$.

VI. Для принятия решения о выборе наилучшего варианта можно воспользоваться комплексным показателем качества [фор-

Воспользовавшись рассуждениями примера 1.11 и уравнением (1.24), получаем

$$\Delta F_{\text{п}} = (2f_0/c) \Delta v_{\text{ц}}. \quad (1.41)$$

где c — скорость света.

Полагая $\Delta t_{\text{п}}/\Delta t_{\text{к}}=1$, имеем

$$N_{\text{к}} = T_{\text{п}}/T_{\text{наб}} = \Delta F_{\text{п}}/\Delta F_{\text{к}}. \quad (1.42)$$

Обычно $\Delta F_{\text{к}}$ (т. е. ширина полосы фильтра доплеровских частот) фиксируется, чтобы иметь дополнительную возможность определить скорость цели в процессе обнаружения. Имея в виду это ограничение, одноканальную систему организуем в виде поисковой путем соответствующей периодической перестройки приемника в пределах $\Delta F_{\text{п}}$. Приняв эти ограничения, получим

$$Q = PN_{\text{к}} \left(\frac{S_{\text{А}}^2 L_{\text{пот}}}{P_{\text{ш0}} \Delta F_{\text{к}}} \frac{\sigma}{4\pi R^4 \lambda^2} \right).$$

Выделяем в левую часть уравнения функциональные показатели качества, а в правую — данные ОС:

$$PN_{\text{к}} = Q \left(\frac{S_{\text{А}}^2 L_{\text{пот}}}{P_{\text{ш0}} \Delta F_{\text{к}}} \frac{\sigma}{4\pi R^4 \lambda^2} \right). \quad (1.43)$$

Правая часть по условиям задачи неизменна; обозначая ее некоторой постоянной A , получаем

$$PN_{\text{к}} = A, \quad (1.44)$$

примем $A=100$.

III.6. Составляем структурную схему приемопередающего устройства. В качестве первого варианта принимаем одноканальную структуру с поиском по частоте, схема которой изображена на рис. 1.9.

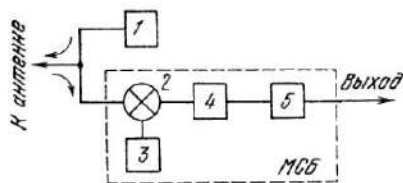


Рис. 1.9. Структурная схема одноканального ($N_{\text{к}}=1$) приемопередатчика с поиском:

1 — передатчик на ЭВП; 2 — смеситель; 3 — перестраиваемый гетеродин в пределах полосы частот $\Delta F_{\text{п}}$; 4 — усилитель приемника; 5 — фильтр с полосой частот $\Delta F_{\text{к}}$

из функциональных элементов 2, 3, 4, 5 (см. рис. 1.9), рассчитываем ее массу, с учетом q_m равную $m_{\text{МСБ}}=0,05$ кг/МСБ, что и будет в нашем случае величиной $k_{\text{опр}}$.

Выбрав в качестве критерия предпочтения ($K_{\text{предп}}$) массу всего устройства m_{Σ} , получаем уравнение баланса масс (1.36):

$$K_{\text{предп}} = m_{\Sigma} = k_{\text{опер}} P + k_{\text{опр}} N_{\text{к}} = 0,5 \cdot 100 + 0,05 \cdot 1 = 50,05 \text{ кг}. \quad (1.45)$$

Анализируем распределение масс по выражению (1.37): $1=50/50,05+0,05/50,05=0,99+0,01$.

IV.8. Проверяем выполнение допустимых значений $m_{\Sigma \text{ доп}}$ и $\Lambda_{\Sigma \text{ доп}}$. Проверка показывает, что они не выполняются при $m_{\Sigma \text{ доп}}=50$ кг, $m_{\Sigma}=50,05$ кг, при $\Lambda_{\Sigma \text{ доп}}=10^{-4}$ ч $^{-1}$; $\Lambda_{\Sigma}=\Lambda_{\text{пер}}+\Lambda_{\text{пр}}=10^{-4}+10^{-6}=1,01 \cdot 10^{-4}$ ч $^{-1}$, где $\Lambda_{\text{пер}}=10^{-4}$ ч $^{-1}$ — принятая в примере интенсивность отказов передатчика, а $\Lambda_{\text{пр}}=10^{-6}$ ч $^{-1}$ — интенсивность отказов МСБ (приемника).

IV.9. В связи с невыполнением ограничений (п. IV.8) ищем резервы в структурной схеме и балансе масс [уравнение (1.45)]. Уравнение математической модели этого нового варианта будет $P N_K = A$, где $A = 100 = \text{const}$, откуда отмечаем возможность существенно снизить массу передатчика, хотя и несколько увеличить приемную часть устройства за счет многоканальной структуры.

V.10. Составляем второй вариант структурной схемы с многоканальной приемной частью устройства (рис. 1.10).

V.11. Разобьем схему на МСБ в количестве $N_K > 1$. В этом варианте оставляем ЭБ, как в п. III.7. Составляем уравнение баланса масс:

$$m_{\Sigma} = k_{\text{опер}} P + k_{\text{опр}} N_K \quad (\text{при } N_K > 1). \quad (1.46)$$

Ищем наилучшее (минимальное) значение величины m_{Σ} , что в данном примере можно сделать простым подбором. Для большей общности и в целях демонстрации одного из методов математического синтеза решим эту задачу методом нелинейного программирования Лагранжа. Для этого (1.46) представляем в виде целевой функции Ц, а (1.44) в виде ограничений. Ход решения сведем в табл. 1.3.

Таким образом, при числе каналов, т. е. МСБ, равно $N_K = [(k_{\text{опер}}/k_{\text{опр}}) A]^{1/2}$, масса устройства m_{Σ} будет минимальна. Подставляя величины удельного коэффициента п. III.7 и округляя N_K до целого числа, получаем

$$N_K = [(0,5/0,05) 100]^{1/2} \approx 30.$$

Отсюда находим величину P :

$$P = A/N_K = 100/30 \approx 3,3 \text{ Вт.}$$

Составляем и рассчитываем уравнение баланса масс (1.36):

$$m_{\Sigma} = k_{\text{опер}} P + k_{\text{опр}} N_K = 0,5 \cdot 3,3 + 0,05 \cdot 30 = 3,15 \text{ кг.}$$

Баланс относительных масс (1.37) примет вид

$$I = (0,5 \cdot 3,3) / 3,15 + 1,5 / 3,15 = 0,53 + 0,47,$$

из которого видно, что массы передатчика и приемника разделились примерно поровну.

V.12. Проверяем выполнение ограничения на m_{Σ} и Λ_{Σ} . Проверка показывает, что условие ограничения по массе не только удовлетворяется, но и обеспечивается со значительным запасом ($m_{\Sigma} = 3,3$ кг при $m_{\Sigma \text{ доп}} = 50$ кг). По интенсивности отказов ограничение не выполняется: $\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_{\text{пер}} + \Lambda_{\text{пр}} = 10^{-4} + 30 \cdot 10^{-6} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1} > 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

V.13. Продолжаем поиск лучшего варианта структурной схемы устройства. Замечаем, что мощность передатчика достигла такого значения, что можно пересмотреть его элементную базу и перейти на СВЧ микросборки; на рис. 1.1 представлен такой вариант структурной схемы. Передатчик 1 разделен на N_K СВЧ микросборок, каждая из них отдает в антенну мощность, равную P/N_K .

Рис. 1.10. Структурная схема приемопередатчика с N_K -канальным приемником на МСБ (гетеродины 3 ведут поиск цели в каждом из N_K поддиапазонов доплеровских частот):

1 — передатчик на ЭВП; 2 — смеситель; 3 — гетеродин; 4 — усилитель приемника; 5 — фильтр

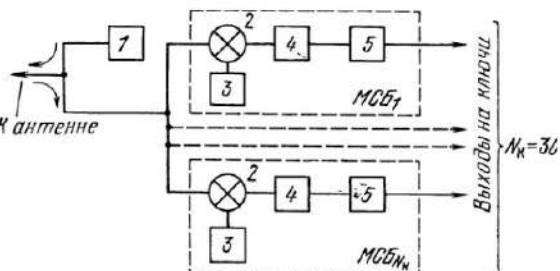


Таблица 1.3

Метод нелинейного программирования (Лагранжа)	Пример
Целевая функция $\Pi = \Pi(x_1, \dots, x_n) \quad (0)$	$\Pi = m_{\Sigma} = k_{\text{опер}} P + k_{\text{опр}} N_K$
Функциональные ограничения $\varphi_1 = \varphi_1(x_1, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$ $\varphi_m = \varphi_m(x_1, \dots, x_n) = 0$	$\varphi = P N_K - A = 0$
Дифференцируем каждое из уравнений системы: $d\varphi_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_i} dx_i = 0 \quad (2)$ $d\varphi_m = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_i} dx_i = 0$	$d\varphi = N_K dP + P dN_K = 0$
Умножаем (2) на λ (пока неизвестный множитель Лагранжа): $\lambda_1 d\varphi_1 = \sum_{i=1}^n \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_i} dx_i = 0 \quad (3)$ $\lambda_m d\varphi_m = \sum_{i=1}^n \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_i} dx_i = 0$	$\lambda d\varphi = \lambda N_K dP + \lambda P dN_K = 0$
Находим $d\Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial x_1} dx_1 + \dots + \frac{\partial \Pi}{\partial x_n} dx_n = 0 \quad (4)$	$d\Pi = k_{\text{опер}} dP + k_{\text{опр}} dN_K = 0$
Суммируем (3) и (4): $\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Pi}{\partial x_i} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_i} + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_i} \right) dx_i = 0 \quad (5)$	$k_{\text{опер}} + \lambda N_K = 0$ $k_{\text{опр}} + \lambda P = 0$ $P N_K - A = 0$
Имеется всего $m + n$ уравнений с $m + n$ неизвестными, т. е. x_i и λ_i Решение этих уравнений дает оптимальное значение Π	$N_K = \sqrt{\left(\frac{k_{\text{опер}}}{k_{\text{опр}}} \right) A}$

в более детальном виде подробная структурная схема представлена на рис. 1.5.

V.14. В качестве элементной базы для СВЧ микросборки выбираем микросборку типа СВЧ модуля МЕРА (см. пример 1.9). Его выходная мощность $P_M = 0,7$ Вт; $k_{пер} = 0,14$ кг/Вт; количество модулей $N_c = P/P_M = 3,3/0,7 = 4,8$ штук. Принимая во внимание, что схемы сложения данного типа (см. п. 1.2.2, пример 1.12) строятся попарным сложением при четном значении пар, окончательно принимаем $N_c = 8$ шт. Тогда уравнение баланса масс устройства и его расчет дадут следующий результат: $m_\Sigma = N_c k_{пер} P_M + k_{пр} N_K = 8 \cdot 0,14 \cdot 0,7 + 0,05 \cdot 30 = 0,8 + 1,5 = 0,95$ кг, откуда видно, что переход на СВЧ микросборки позволил получить дополнительный выигрыш в массе.

V.15. Проверяем выполнение ограничений. Ограничение по m_Σ и здесь заведомо выполняется с большим запасом. Проверяем ограничение по частоте отказов: $\Lambda_\Sigma = N_c \Lambda_M + N_K \Lambda_{пр}$ (Λ_M — интенсивность отказов СВЧ микросборок); принимая частоту отказов МСБ равной 10^{-6} ч $^{-1}$, получаем $\Lambda_\Sigma = 8 \cdot 10^{-6} + 30 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-5}$ ч $^{-1}$, что меньше заданного ограничения 10^{-4} ч $^{-1}$. Заметим, что фактическая надежность устройства выше полученного, так как выход из строя одного из модулей в приемнике и передатчике лишь на немного нарушает их работоспособность, на что указывалось выше.

VI.16. Оцениваем полученные три варианта конструкции, для чего воспользуемся комплексным показателем качества. Исходя из условий эксплуатации устройства установим коэффициенты значимости комплексного показателя. Поскольку масса являлась критерием предпочтения, присвоим ей $\varphi_m = 1,0$; для интенсивности отказов принимаем $\varphi_\Lambda = 0,8$; тогда совокупность комплексных показателей качества для трех вариантов примет вид

$$K^{(1)} = 1 \frac{m_\Sigma^{(1)}}{m_{\Sigma \text{ доп}}} + 0,8 \frac{\Lambda_\Sigma^{(1)}}{\Lambda_{\Sigma \text{ доп}}} = 1 \frac{50,05}{50} + 0,8 \frac{1,01 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 1,8;$$

$$K^{(2)} = 1 \frac{m_\Sigma^{(2)}}{m_{\Sigma \text{ доп}}} + 0,8 \frac{\Lambda_\Sigma^{(2)}}{\Lambda_{\Sigma \text{ доп}}} = 1 \frac{3,15}{50} + 0,8 \frac{1,3 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 1,16;$$

$$K^{(3)} = 1 \frac{m_\Sigma^{(3)}}{m_{\Sigma \text{ доп}}} + 0,8 \frac{\Lambda_\Sigma^{(3)}}{\Lambda_{\Sigma \text{ доп}}} = 1 \frac{0,95}{50} + 0,8 \frac{0,4 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 0,34.$$

Как видим, третий вариант является предпочтительным.

Покажем влияние фактора времени (срока) разработки $T_{ро}$ на принятие решения (см. п. 1.1.2). Допустим, что к моменту разработки этого устройства на разработку СВЧ микросборки понадобилось бы удвоенное $T_{ро}$. Тогда массив показателей п. VI.16 принял бы вид $K^{(1)} = 2,8$ (за счет добавки единицы нормализованного $T_{ро}$ при $\varphi_T = 1$); $K^{(2)} = 2,16$; $K^{(3)} = 2,34$ (удвоенное время). В этих условиях предпочтение пришлось бы отдать $K^{(2)}$, т. е. варианту на ЭВП.

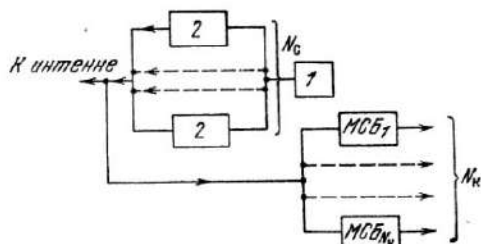


Рис. 1.11. Структурная схема приемопередатчика, полностью выполненная на МСБ:

1 — задающий генератор; 2 — СВЧ микросборка с выходной мощностью P/N_c ; МСБ $_1$, ..., МСБ $_{N_k}$ — микросборки N_k -канального приемника (см. рис. 1.10)

Задачу, изложенную в примере 1.14, можно решить на АРМ-Р, укомплектованной мини-ЭВМ М-400. Программа разработана К. Б. Охлопковым и написана на языке БЕЙСИК М-400, удобном для работы в диалоговом режиме. Фрагмент решения этой задачи приведен ниже (в русской транскрипции).

PRIEMNIK DOLGEN BIT MNOGOKANALNII
GELAETE SAMI VIBRAT CNISLO KANALOV?

ESLI «DA»——> «1», «RETURN»

ESLI «NET»——> «0», «RETURN»

?1

VIBIRAITE CHISLO KANALOV SAMI:

(KONETS VIBORA——> USLOVNO POLAGAEM N≠0)

UDELNII KOEFF. MOSNOSTI K OP [KG/W]:?5

UDELNII KOEFF. KANALOV K OK [KG/MSB]:?05

DOP.MASSA (KG)	MASSA (KG)	MOSHNOST (W)	OTKAZOV (1/H)	KANALOV (SHT.)
50	5.670157	11.24031	.000101	?2
50	2.910078	5.620157	.000102	?3
50	2.023386	3.746771	.000103	?2
50	2.910078	5.620157	.000102	?0

CHISLO PRIEMNIH KANALOV=2

CHISLO PRIEMNIH KANALOV DOPUSTIMO

CHISLO S—V—CHASTOTN MSB=1

CHISLO S—V—CHASTOTN. MSB DOPUSTIMO.

UDOVLETVORYAET LI VAS USTROISTVO S TAKIMI PARAMETRAMI?

ESLI «DA»——> «1», «RETURN»

ESLI «NET»——> «0», «RETURN»

?0

PRIEMOPEREDATCHIK DOLGEN BIT VIPOLNEN

POLNOSTYU NA MSB

1.3. Порядок внутреннего проектирования микросборок

1.3.1. Анализ исходных данных

Исходные данные для внутреннего проектирования микросборок выдаются в виде технического задания (ТЗ) на проектирование и функциональной электрической схемы. В ТЗ указывается совокупность внешних параметров МСБ, которые определяются на этапе внешнего проектирования. Далее, в соответствии с общими положениями инженерного синтеза внутреннее проектирование МСБ состоит в обосновании и выборе ее внутренних параметров, при которых удовлетворяются требования к внешним параметрам.

Рассмотрим более подробно основные этапы внутреннего проектирования МСБ.

Как уже отмечалось, исходные данные на проектирование МСБ оформляются в виде ТЗ, которое сопровождается функциональной электрической схемой. ТЗ устанавливает назначение и область применения МСБ, основные технические характеристики, условия эксплуатации, требования к конструкции, технико-экономические требования и организационно-производственные факторы. Перечисленные требования находят непосредственное отражение в по-

следующих схемотехнических решениях МСБ, т. е. в построении ее электрической принципиальной схемы. Электрическая принципиальная схема реализует функциональные параметры МСБ и является звеном, с помощью которого производится материализация функциональных параметров. Поэтому анализ исходных данных состоит в рассмотрении требований ТЗ и особенностей схемотехнического построения МСБ. После оценки степени важности множества взаимосвязанных факторов выделяется группа факторов, определяющих принятие решений. К ним относятся: функциональное назначение МСБ, частотные (временные) характеристики, энергетические характеристики, условия эксплуатации.

Первые три фактора оказывают влияние на компоновку (взаимное размещение на плате) элементов и компонентов МСБ. Так, например, размещение бескорпусных активных компонентов в МСБ приемно-усилительных устройств обусловлено спецификой их работы, которая заключается в последовательном изменении уровня и преобразовании входных сигналов. Поэтому в МСБ, предназначенных для усиления сигналов, как правило, порядок размещения компонентов соответствует последовательности прохождения сигнала, отображаемой принципиальной электрической схемой.

В цифровых МСБ компоновка компонентов во многом предопределяется требованиями быстродействия и обеспечения нормального теплового режима. Поэтому для цифровых МСБ характерно размещение компонентов вдоль проводников питания.

Знание частотных (временных) характеристик является необходимым условием обеспечения заданных электрических параметров конструкции МСБ и позволяет, исходя из требований электромагнитной совместимости, определить ограничения на взаимное расположение элементов линий связи и компонентов.

Дополнительные ограничения на размещение компонентов МСБ накладываются необходимостью обеспечения нормальных тепловых режимов элементов и компонентов МСБ и исключения влияния тепловых полей теплонагруженных элементов на компоненты, параметры которых критичны к воздействию тепла. В ряде случаев условие нормального теплового режима элементов и в целом МСБ выполняется лишь после применения специальных конструктивных способов. Поэтому конструктивные характеристики МСБ и, в частности, массо-объемные, непосредственно связаны с энергетическими характеристиками.

Условия эксплуатации МСБ, характеризующие меру воздействия внешней среды, определяются условиями эксплуатации устройства, частью которого является МСБ. Учет условий эксплуатации при проектировании МСБ выражается в установлении требований к электрическим (стабильность параметров) и эксплуатационным характеристикам компонентов и конструктивном оформлении МСБ. Так, например, решение вопроса о применении или неприменении корпусирования МСБ зависит не только от принятой идеологии конструирования устройства, но и в значительной степени от особенностей условий эксплуатации.

1.3.2. Схемотехническая обработка конструкции МСБ

Решение этой, одной из наиболее ответственных задач внутреннего проектирования состоит в выборе элементной базы и разработке электрической принципиальной схемы МСБ (см. рис. 1.1 система S_1). Заметим, что электрическая принципиальная схема микросборки может быть окончательно построена лишь с учетом особенностей выбранной элементной базы.

Выбор элементной базы МСБ. В состав элементной базы МСБ входят бескорпусные ИС, дискретные радиоэлементы (микрокомпоненты) и функциональные компоненты, совместимые с ИС. Разработанные и выпускаемые промышленностью ИС можно разделить на два класса: аналоговые и цифровые [1.5].

Среди аналоговых ИС особое место занимают полупроводниковые линейные интегральные микросхемы (ЛИС). В основу их схемотехнического решения положены новые принципы: широкое применение балансных методов, использование непосредственных межкаскадных связей, повышение функциональной сложности за счет увеличения числа активных элементов.

В разработке полупроводниковых ЛИС наметились два направления: создание универсальных и специализированных интегральных микросхем. Универсальные ЛИС относятся к схемам малой и средней степени интеграции (20... 40 элементов в кристалле). Их типичными представителями являются дифференциальные и операционные усилители, построенные на базовых схемах входных и выходных каскадов, источников тока, опорного напряжения и сдвига уровня постоянного напряжения. Операционные и дифференциальные усилители обладают высоким коэффициентом передачи (100 ... 10000), большим входным (сотни килоом) и малым выходным (десятки-сотни ом) сопротивлениями.

Широкое применение в приемно-усилительных трактах находят также схемы линейных перемножителей, широкополосных усилителей, усилителей с электронной регулировкой усиления, низкочастотные усилители. В настоящее время ведутся работы по улучшению показателей качества ИС в направлении расширения частотного диапазона, снижения уровня шумов, расширения функциональных возможностей, снижения потребляемой мощности и т. д.

Наметившийся в настоящее время процесс повышения степени интеграции полупроводниковых ЛИС (до 500 элементов на кристалле) позволил с успехом развивать направление разработки специализированных ЛИС, объединяющих две или более универсальных ЛИС и имеющих конкретное функциональное назначение. При создании специализированных ЛИС используются схемотехнические и конструктивные принципы построения универсальных ЛИС. К числу специализированных ЛИС относятся интегральные микросхемы, выполняющие функции ограничения и детектирования частотно-модулированных сигналов, детектирования амплитудно-модулированных сигналов, интегральные схемы активных RC-фильтров, фазовой автоподстройки частоты и т. д.

Совершенствование специализированных ЛИС ведется по пути дальнейшего повышения степени интеграции и расширения функциональных возможностей. Введение в схемы предварительных каскадов усиления, собственной системы АРУ, активных регулируемых фильтров и т. п. позволит получить ЛИС, реализующие функции приемно-усилительных трактов.

Элементная база МСБ цифровых устройств развивается в следующих двух направлениях:

- разработка и выпуск ИС и БИС «жесткой» логики, входящих в состав известных серий и расширяющих функциональные возможности этих серий;

- разработка и выпуск БИС «программируемой» логики — микропроцессорных комплектов (БИС МП), а также ИС, дополняющих микропроцессорные комплекты БИС МП.

В настоящее время относительно полный функциональный набор цифровых ИС «жесткой» логики, позволяющий реализовать любое цифровое устройство, содержит серии 133 и 155 (бескорпусный аналог — ИС серии 703).

Наиболее перспективна элементная база программируемой логики, представителями которой являются микропроцессорные комплекты (МПК) БИС. В настоящее время отечественной промышленностью освоены и широко применяются для построения микро-ЭВМ и специальных вычислительных устройств различного назначения МПК БИС серий 584, 587, 589. Быстрая динамика развития МПК БИС вызвала необходимость в разработке ИС и БИС, дополняющих МПК. Это относится к сериям 164 и 564, которые наряду с традиционными логическими ИС включают такие ИС, как буфер-преобразователь уровней, ПЗУ на 1 кбит и др.

Из числа дискретных радиоэлементов, конструктивно совместимых с ИС, в конструкциях МСБ используются керамические конденсаторы К10-17, стеклокерамические К22-4, оксидно-полупроводниковые К53-16, К53-18, К53-22.

В последнее время при конструировании МСБ все чаще применяются элементы функциональной микроэлектроники.

Функциональная микроэлектроника — научно-техническое направление электроники по созданию элементов и устройств для обработки, передачи и хранения информации на основе различных физических явлений, отличных от явлений в электрических цепях.

Физические явления, связанные с взаимодействием потока электронов, с акустическими волнами в твердом теле, обусловили развитие одного из направлений функциональной микроэлектроники — акустоэлектроники. В рамках этого направления разработаны интегральные пьезофильтры (ИПФ) на объемных и поверхностных акустических волнах (ПАВ).

ИПФ на объемных волнах основаны на использовании объемных колебаний сдвига пластины кварца или керамики по толщине при преобразовании электрической энергии в механическую и обратно. Конструктивно фильтр выполняется в виде пластины пьезокристалла, помещаемой в герметичный корпус, на которую с обе-

их сторон наносятся электроды с контактными площадками. Связь конструктивных и электрических параметров фильтра устанавливается с помощью соотношения $f_0 = k/h$, где f_0 — резонансная частота фильтра, Гц; h — толщина пластины, мм; k — физическая постоянная (для кварца $k = 1660$ Гц·мм, для керамики $k \approx 1000$ Гц·мм).

Поскольку размер пластины $l \geq 20h$, то нижний предел рабочей частоты ИПФ на объемных волнах определяется совместимостью его конструкции с ИС, верхний — минимальной толщиной пластины, приемлемой для производства. Вид амплитудно-частотной характеристики фильтров зависит от числа резонаторов на пластине и коэффициентов связи между резонаторами. В ИПФ на ПАВ активной средой является поверхностный слой пластины из пьезоэлектрика. Для возбуждения и приема ПАВ широкое применение нашли встречно-штыревые преобразователи гребенчатого типа, изготавливаемые методами тонкопленочной технологии. При равенстве длины волны ПАВ двум периодам решетки преобразователя происходит синфазное сложение упругих колебаний (резонанс). Резонансная частота преобразователя $f_0 = v/2d_p$, где v — скорость распространения ПАВ, м/с; d_p — период решетки преобразователя, м. Для пьезокварца и ниобата лития скорость ПАВ $v \approx (3 \dots 4) \times 10^3$ м/с. Таким образом, верхняя граничная частота ИПФ на ПАВ определяется выбранным материалом пьезокристалла и периодом решетки преобразователя, т. е. разрешающей способностью технологического процесса получения электродов преобразователей. В настоящее время пленочная технология позволяет изготавливать преобразователи на частоты до сотен мегагерц и выше. Нижняя частота фильтров ограничивается размерами площади пластины, занимаемой преобразователем.

Частотная характеристика ИПФ на ПАВ зависит от закона перекрытия электродов преобразователей, их расстановки, количества преобразователей и характеристик каждого преобразователя. При большом числе пар электродов преобразователя частотная характеристика равномерной решетки имеет вид $\sin x/x$. Если же перекрытие электродов соответствует усеченной функции $\sin x/x$, то частотная характеристика фильтра близка к прямоугольной. Ориентировочные значения основных электрических параметров ИПФ приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Параметр	Кварцевые ИПФ на объемных волнах	ИПФ на ПАВ
Диапазон рабочих частот, МГц	3...150	5...200
Относительная ширина полосы пропускания, %	0,005...0,25	0,5...40
Коэффициент прямоугольности АЧХ	1,5...3	2...3
Затухание вне полосы пропускания, дБ	30...80	20...30
Вносимые потери в полосе пропускания, дБ	1,5...6	6...20

В результате конструктивного объединения ИПФ с цепями развязки, согласования и компенсации потерь в последнее время созданы универсальные с точки зрения совместимости с другими цепями частотно-избирательные микросхемы (ЧИМ). Появление ИПФ и ЧИМ в значительной мере способствовало решению проблемы микроминиатюризации частотно-избирательных устройств МЭА.

На основе использования плазменных явлений в твердых телах разработаны и получили распространение приборы, использующие для генерации СВЧ колебаний эффект Ганна. В импульсном режиме генераторы Ганна по мощности и частоте превосходят туннельные диоды, ЛПД и другие твердотельные приборы. Зависимость выходного тока от формы рабочего тела генератора Ганна, а также влияние внешнего излучения на электрофизические свойства материала создают предпосылки для разработки новых типов приборов: функциональных генераторов, сверхбыстродействующих аналого-цифровых преобразователей, оптически перестраиваемых генераторов и др.

Оптические и электронные явления в веществах, их взаимные связи и преобразования послужили основой для развития когерентной и некогерентной оптоэлектроники.

Когерентная оптоэлектроника — область электронной техники, в которую входят приборы и устройства, работающие в диапазоне оптических частот и использующие такие параметры оптического сигнала, как частота, фаза, поляризация и амплитуда. Основу элементной базы приборов, работающих в диапазоне оптических частот, составляют генераторы электромагнитных колебаний оптических частот, устройства управления лазерным лучом, приемники световых сигналов, запоминающие среды, световоды, оптические элементы и оптические интегральные схемы.

В некогерентной оптоэлектронике оптические каналы используются для решения отдельных частных задач, таких, как гальваническая развязка цепей, дистанционное управление, повышение помехоустойчивости линий передачи сигналов, отображение световой информации. В ней нашли широкое применение оптроны, светодиоды, фотодиоды, фототранзисторы и другие оптоэлектронные элементы.

Использование магнитных явлений в твердом теле и свойства новых магнитных материалов положили начало новому направлению функциональной электроники — магнитоэлектронике. Разработаны устройства на цилиндрических магнитных доменах, которые находят применение при реализации запоминающих устройств. Уже в настоящее время созданы запоминающие устройства емкостью до $15 \cdot 10^6$ бит в физическом объеме около 5 см^3 с потребляемой мощностью 6 Вт. Ожидается, что в ближайшие годы плотность записи информации будет доведена до 10^7 бит/см³, причем емкость кристалла составит приблизительно 10^6 бит. Более подробное описание элементной базы МСБ аналоговых и цифровых устройств МЭА дано в гл. 2.

Электрическим и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к элементам проектируемой МСБ, как правило, отвечает значительное число типов ИС и дискретных радиоэлементов. Поэтому перед конструктором МСБ возникает достаточно сложная задача выбора элементов, параметры которых наилучшим образом удовлетворяют требованиям конкретного ТЗ.

Поскольку как ИС, так и микрокомпоненты характеризуются совокупностью функциональных и материальных параметров, то для сравнительной оценки качества компонентов целесообразно использовать комплексный показатель.

В соответствии с общими положениями, приведенными в п. 1. 1. 5, формирование комплексного показателя качества состоит в получении дифференциальных показателей качества компонента и выборе весовых коэффициентов.

Тип компонента выбирается по результатам расчета комплексных показателей качества для типов компонентов, которые по электрическим и эксплуатационным параметрам применимы в проектируемой МСБ. Предпочтение отдается типу элемента, для которого комплексный показатель в зависимости от принятой тенденции максимален или минимален.

Разработка электрической принципиальной схемы МСБ. Электрическая принципиальная схема МСБ определяет состав элементов и связей между ними, а также дает полное представление о принципе ее работы. Такую схему разрабатывают на основе функциональной схемы МСБ, получаемой в результате разбиения функциональной схемы устройства на конструктивно-технологические единицы. Разработка электрической принципиальной схемы предполагает схемную реализацию функциональных единиц МСБ на выбранной элементной базе и последующую отработку схемы, целью которой является:

- определение на основании конструкторско-технологических ограничений номинальных значений параметров элементов, при которых выполняются требования к внешним параметрам МСБ;

- оптимизация значений параметров элементов по критерию минимального влияния их отклонений на функциональные параметры МСБ;

- определение разброса функциональных параметров МСБ при известных или обеспечиваемых технологией отклонениях (допусках) и найденных номинальных значениях параметров элементов;

- оптимизация допусков на параметры элементов из условий обеспечения заданной точности функциональных параметров и электрической стыковки МСБ.

Для решения перечисленных задач используются экспериментальные и расчетные методы.

Экспериментальные методы состоят в макетировании МСБ и проведении на макете цикла экспериментальных исследований, таких, как граничные и матричные испытания, определение чувствительности функциональных параметров МСБ к изменению параметров элементов, статистическое исследование, климатические ис-

питания и т. д. Анализ результатов экспериментального исследования МСБ позволяет найти возможные пути улучшения их параметров. Существенным недостатком экспериментальных методов отработки электрической принципиальной схемы МСБ является их большая трудоемкость.

Сущность расчетных методов заключается в получении математической модели МСБ, которая устанавливает связь между ее внешними функциональными параметрами и параметрами элементов, и модели функциональной точности. Модель функциональной точности связывает отклонения функциональных параметров МСБ с отклонениями от номинальных значений параметров элементов и используется для решения допусковых задач.

При известной математической модели МСБ получение модели функциональной точности сводится к определению функций параметрической чувствительности или их точечных количественных оценок — коэффициентов влияния. Коэффициенты влияния характеризуют степень воздействия отклонений параметров элементов на погрешности внешних параметров МСБ. Определение функций параметрической чувствительности и расчет коэффициентов влияния состоят в следующем.

Если внешний параметр МСБ F_j и параметры элементов $q_1, q_2, \dots, q_n$ связаны соотношением вида $F_j = F_j(q_1, q_2, \dots, q_n)$, то при малых отклонениях параметров абсолютная (размерная) функция параметрической чувствительности по параметру q_i записывается в виде

$$A_{ij} = \partial F_j / \partial q_i, \quad (1.47)$$

относительная (безразмерная) — в виде

$$B_{ij} = \partial F_j q_i / F_j \partial q_i. \quad (1.48)$$

Подстановка в (1.47) и (1.48) номинальных значений параметров F_j и параметров элементов $q_1, q_2, \dots, q_n$ дает соответственно абсолютный и относительный коэффициенты влияния.

Высокая функциональная сложность МСБ практически исключает возможность использования «ручных» методов при выполнении расчетов, связанных с отработкой электрической принципиальной схемы. Поэтому математическое моделирование и расчет МСБ, как правило, производятся с помощью ЭВМ. Отечественная и зарубежная практика последних лет показала высокую эффективность применения машинных методов на этом этапе проектирования. Расчеты на ЭВМ позволяют резко сократить время проектирования и объем экспериментальных работ, а также существенно углубить анализ проектируемой МСБ [1.6].

Разработанные к настоящему времени программы машинного расчета электронных схем по назначению можно разделить на три группы: программы анализа и оптимизации линейных электронных схем, программы анализа нелинейных электронных схем, универсальные программы. Программы позволяют решать на ЭВМ задачи расчета статического режима, частотных характеристик,

переходных процессов и оптимизации как аналоговых, так и цифровых электронных схем. Одновременно в ряде программ предусмотрено решение допусковых задач расчетными методами или методами статистического моделирования. Наиболее распространенные отечественные программы расчета электронных схем включены в отраслевой стандарт ГОСТ 4ГО.091.082 «Анализ и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных схем. Алгоритмы и программы».

Примерами помещенных в стандарте программ, относящихся к названным группам, являются программы ПЛО6К2, ПНО4К3 и ПУО1КО.

Программа ПЛО6К2 (ПАЛАС) предназначена для анализа и оптимизации линейных активных схем и позволяет проводить номинальный анализ в заданном диапазоне частот, анализ параметрической чувствительности, расчет допусков выходных параметров схем на наихудший случай при заданных допусках на параметры элементов, статистическое моделирование и оптимизацию схем.

Программа ПНО4К3 (ПАИМ) дает возможность выполнить анализ статического режима и переходных процессов нелинейных электронных схем.

Программа ПУО1КО (КАПР-Э) относится к числу универсальных программ и позволяет: получать статические, временные и частотные характеристики электронных схем, работающих в линейном или нелинейном режимах; проводить статистический анализ влияния разброса параметров элементов схемы на выходные параметры; выполнять оптимизацию выходных параметров линейных электронных схем.

Эффективность применения программ анализа электронных схем для отработки электрических принципиальных схем МСБ в значительной степени зависит от наличия моделей активных навесных компонентов. В виду того, что практически во всех программах активные компоненты представлены библиотечными моделями диодов и транзисторов, то вследствие высокой функциональной сложности активных элементов МСБ (бескорпусных ИС) возможности программ для ее моделирования в ряде случаев оказываются недостаточными. Поэтому по мере роста степени интеграции бескорпусных микросхем возникает необходимость в разработке их макромоделей. Для получения макромоделей микросхем могут быть использованы ЭВМ или экспериментальные методы.

В заключение — несколько слов о разработке топологии микросборок (см. § 2.4). В задачу разработки топологии микросборок по заданной электрической схеме входят выбор формы пленочных элементов, расчет их геометрических размеров и такое размещение элементов и компонентов микросборки, которое удовлетворяло бы как допустимым конструктивным показателям, так и технологическим ограничениям для выбранного технологического процесса.

Технологические ограничения определяют минимально допустимые геометрические размеры пленочных элементов и расстояния между ними (разрешающая способность метода изготовления), минимально допустимые размеры проводников и контактных

площадок (в зависимости от метода их контактирования), шаг расположения контактных площадок (в зависимости от типа корпуса или разрешающей способности общей трассировочной платы). Оптимальное размещение элементов и компонентов микросборки на подложках заключается в том, что для выбранного типоразмера подложки одновременно должны обеспечиваться требования минимально допустимых паразитных связей, теплового режима и максимально возможного коэффициента заполнения площади подложки (или минимально возможной обратной величины — коэффициента дезинтеграции площади q_s).

Список литературы

- 1.1. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/ А. Г. Алексенко, С. С. Бадудин, Л. Г. Барулин и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977. — 352 с., гл. 1.
- 1.2. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. — М.: Сов. радио, 1975. — 368 с.
- 1.3. Болховитинов В. Ф. Пути развития летательных аппаратов. — М.: Оборонгиз, 1962. — 84 с.
- 1.4. Высоцкий Б. Ф., Войнич Б. А. Элементы инженерного расчета микроэлектронных радиолокационных устройств. Ч. II. — М.: МАИ, 1974. — 84 с.
- 1.5. Аналоговые и цифровые интегральные схемы/ С. В. Якубовский, Н. А. Барканов, Б. П. Кудряшов и др.; Под ред. С. В. Якубовского. — М.: Сов. радио, 1979.
- 1.6. Сигорский В. П., Петренко А. И. Алгоритмы анализа электронных схем. — М.: Сов. радио, 1976. — 607 с.

2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ БГИС И МИКРОСБОРОК

Типовые конструкторские решения и методы расчета РЭА на ИС применимы и при разработке разнообразной аппаратуры на БГИС и МСБ. Однако специфика конструирования БГИС и МСБ вносит определенные особенности в проектирование как аналоговых, так и цифровых устройств.

При проектировании аналоговой аппаратуры расчет и конструирование БГИС и МСБ включает:

- выбор элементной базы и разработку принципиальной схемы, электрический расчет схемы, определение номиналов пленочных и навесных элементов ИС;
- расчет устойчивости устройства на БГИС или МСБ к самовозбуждению и к воздействию внешних помех;
- расчет площади, занимаемой компонентами и элементами (ИС, конденсаторами, резисторами);
- выбор типоразмера подложки для изготовления БГИС или МСБ, размещение элементов, выбор трассировки;
- корректировка расчетов по устойчивости с учетом паразитных емкостей и индуктивностей при данном размещении и трассировке;
- тепловой расчет.

Последние три этапа относятся к разработке топологии МСБ (см. § 2.4).

Для цифровой аппаратуры основными задачами расчета и конструирования МСБ и БГИС являются выбор элементной базы, разработка принципиальной схемы, расчет тепловых режимов, обеспечение заданного уровня надежности и помехоустойчивости. При разработке «программируемой» логики необходимо решать ряд дополнительных задач, как, например, выбор длины разрядной сетки вычислительного устройства, выбор или расчет необходимого быстродействия, объема памяти запоминающего устройства и т. д.

Настоящая глава посвящена особенностям конструирования аналоговой и цифровой аппаратуры на БГИС и МСБ.

2.1. Особенности расчета и конструирования аналоговых БГИС и микросборок

2.1.1. Характеристика элементной базы аналоговых МСБ

Основой элементной базы для аналоговой микроэлектронной аппаратуры на МСБ на данном этапе являются полупроводниковые интегральные схемы. В качестве компонентов радиоустройств используются микрокомпоненты (электро- и радиоэлементы), совместимые с конструкцией МСБ. В конструкциях МЭА все чаще начинают находить применение компоненты новой элементной базы — функциональные приборы (оптроны, устройства на основе эффекта поверхностных акустических волн и т. п.). Конструкции этих узлов также совместимы с конструкциями МСБ.

В настоящее время созданы полупроводниковые аналоговые интегральные схемы, обеспечивающие построение практически всех узлов современной радиоприемной аппаратуры.

Особенности полупроводниковой интегральной технологии определили схемотехнические принципы построения интегральных аналоговых схем: широкое применение каскадов дифференциального усилителя, непосредственные связи между каскадами, использование схем источников постоянного тока и опорного напряжения, каскадов сдвига уровня. Соответственно изменяются и методы схемотехнического расчета и анализа МСБ. Математические модели ИС, используемые при анализе, являющиеся результатом объединения математических моделей компонентов схемы, таких, как транзисторы, *p-n*-переходы, резисторы, конденсаторы и т. п., с увеличением степени интеграции ИС становятся неприемлемыми из-за ограниченных ресурсов памяти современных ЭВМ [2.1]. Решением данной проблемы является моделирование внешних параметров ИС методами планирования эксперимента и использование наряду с моделями отдельных компонентов моделей целых ИС или их фрагментов. Такие модели называются макромоделями, а процесс их получения — макромоделированием [2.1]. Построение большинства линейных интегральных схем (ЛИС) на однотипных каскадах типа дифференциального усилителя и аналогового перемножителя делает расчеты с использованием макромоде-

Рис. 2.1. Схема дифференциального усилителя типа К775УС2

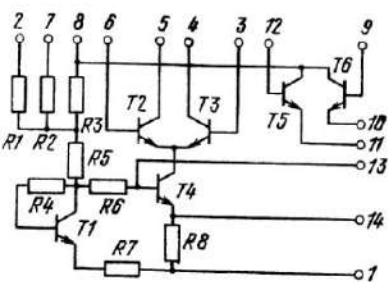
лей этих каскадов особенно удобными и перспективными, что и является одной из особенностей расчета.

Определенной трудностью при проектировании аналоговых МСБ является потребность в широкой номенклатуре бескорпусных ЛИС при сравнительно ограниченном количестве схем каждого типа. Поэтому во многих случаях целесообразно применение универсальных схем, способных выполнять различные функциональные преобразования сигналов. Универсальность достигается, как правило, усложнением принципиальных схем ЛИС, введением дополнительных выводов между отдельными каскадами и дополнительных активных элементов. Так, например, наличие отводов от токозадающих каскадов ЛИС аналогового перемножителя позволяет использовать его также в качестве гетеродина-смесителя. Широкие функциональные возможности дифференциального усилителя реализуются благодаря наличию эмиттерных повторителей и возможности подключения к базовому и эмиттерному выводам генератора тока и к общей точке эмиттеров. Реализация конкретных вариантов функциональных устройств на таких ЛИС осуществляется коммутацией их выводов пленочными проводниками МСБ и подсоединением дополнительных пленочных или миниатюрных навесных элементов, устанавливаемых на подложке.

Благодаря использованию универсальных ЛИС создаются благоприятные условия для обобщения структурных решений отдельных узлов аппаратуры, достигается высокая однородность структуры МСБ. В связи с этим представляется возможность широкой унификации и стандартизации аппаратуры на основе таких схем при одновременном сокращении сроков и уменьшении стоимости ее проектирования. Последнее связано с тем, что при использовании универсальных ЛИС обеспечивается преемственность новых модификаций аппаратуры, задерживается моральное старение МСБ и упрощается задача согласования отдельных аналоговых МСБ по электрическим и эксплуатационным характеристикам.

Наиболее широко распространенными универсальными бескорпусными ЛИС в настоящее время являются дифференциальные усилители К775УС2 (рис. 2.1) и аналоговые перемножители К740МА1 (рис. 2.2). Эти схемы могут использоваться практически во всех каскадах приемно-усилительных трактов, выполняя функции УВЧ, смесителей, УПЧ, гетеродинов и детекторов АМ, ЧМ и ФМ сигналов.

Микросборки, входящие в состав устройства РЭА, работающих в условиях изменения уровня информационного сигнала в широком динамическом диапазоне (80 ... 100 дБ), могут быть построены на универсальных ЛИС логарифмических усилителей. Ампли-



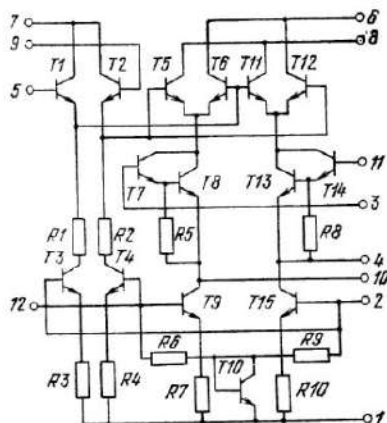


Рис. 2.2. Схема аналогового перемножителя (балансного модулятора-демодулятора) типа К740МА1

тудная характеристика такого усилителя описывается логарифмической функцией, а коэффициент усиления монотонно уменьшается с увеличением уровня сигнала. Наибольшее распространение логарифмические усилители получили при построении приемников импульсных сигналов. Отечественный аналог схемы SN56502 (рис. 2.3) содержит два независимых логарифмических усилителя с дифференциальными входами и выходами.

Каждый из усилителей построен на четырех дифференциальных каскадах. Логарифмическая характеристика формируется в результате параллельного соединения линейных усилителей с ограничением и последующим сложением выходных сигналов. Схема работает в диапазоне частот от 0 до 40 МГц.

Важным этапом разработки элементной базы аналоговых МСБ стало появление многофункциональных универсальных ЛИС. Подобные схемы наиболее полно реализуют возможности полупроводниковой интегральной технологии и особенно эффективно могут применяться при построении перспективных подсистем для связной аппаратуры.

Для построения МСБ аналоговых устройств ведется разработка следующих специализированных ЛИС:

- для усиления, ограничения и детектирования ЧМ сигналов;
- для усиления, преобразования и детектирования АМ сигналов;
- для селективных устройств.

Бескорпусный вариант схемы К174УР2 (рис. 2.4) является характерным примером ЛИС для преобразования ЧМ сигналов. Схема содержит УПЧ (I), квадратурный детектор (II), предварительный УНЧ (III), систему АРУ (IV), усилители системы АПЧ и индикатора настройки (V и VI). Порог ограничения входного сигнала 12 мкВ на частоте 10,7 МГц, подавление АМ — не менее 45 дБ. Большое число структурных вариантов построения АМ трактов не позволяет до настоящего времени выявить подход к проектированию серии специализированных ЛИС этого направления. В данном случае возможность массового спроса определила разработку ЛИС типа К774ХА2 (рис. 2.5), предназначенной для построения высококачественного автомобильного приемника с АМ модуляцией. ЛИС содержит регулируемый УВЧ, смеситель на основе балансного перемножителя, отдельный гетеродин и УПЧ со схемой АРУ. Диапазон рабочих частот схемы 0,15 ... 30 МГц, чув-

ствительность 7 мкВ (при отношении сигнал/шум, равном 26 дБ), диапазон регулировки системы АРУ 100 дБ.

Разработка ЛИС селективных устройств позволяет эффективно и экономически обосновано применить известные принципы построения активных RC -фильтров, гираторов и систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Наряду с наиболее распространенными способами реализации активных фильтров на операционных усилителях при отсутствии высоких требований по чувствительности и добротности селектирующего звена возможно применение универсальных ЛИС для построения активных фильтров. Примером такой схемы является ЛИС типа К529УП1 (рис. 2.6). Схема содержит три идентичных усилителя и позволяет реализовать типовое звено активного фильтра с добротностью 50 в диапазоне частот до 200 кГц при стабильности резонансной частоты 3% в диапазоне температур от -60 до $+60^\circ\text{C}$. В настоящее время разработаны ЛИС для построения другого класса активных фильтров — гираторов. ЛИС, подобная схеме полупроводникового интегрального гиратора ТСА580, является эквивалентом катушки индуктивности с добротностью 500 в диапазоне частот до 1 кГц.

При создании ЛИС для высокочастотных селективных устройств широкое распространение получили схемы, построенные по принципу ФАПЧ. Отечественный аналог ЛИС типа NE561В построен

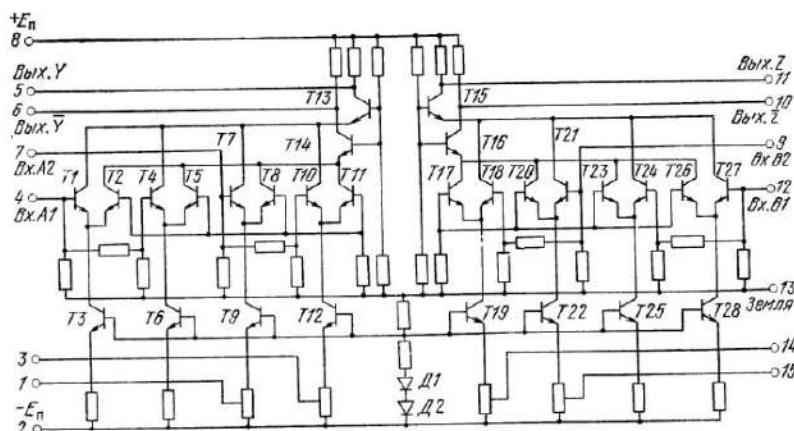


Рис. 2.3. ЛИС сдвоенного логарифмического усилителя — аналог SN56502

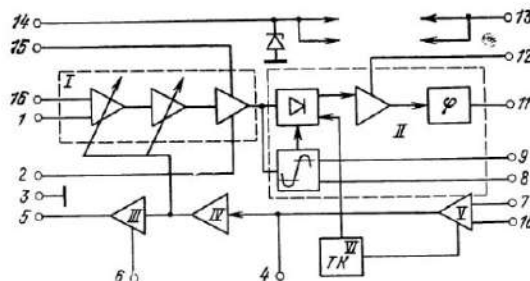


Рис. 2.4. ЛИС усилительно-преобразовательного тракта ЧМ сигналов типа К174УР2 (бескорпусный вариант К774УР2)

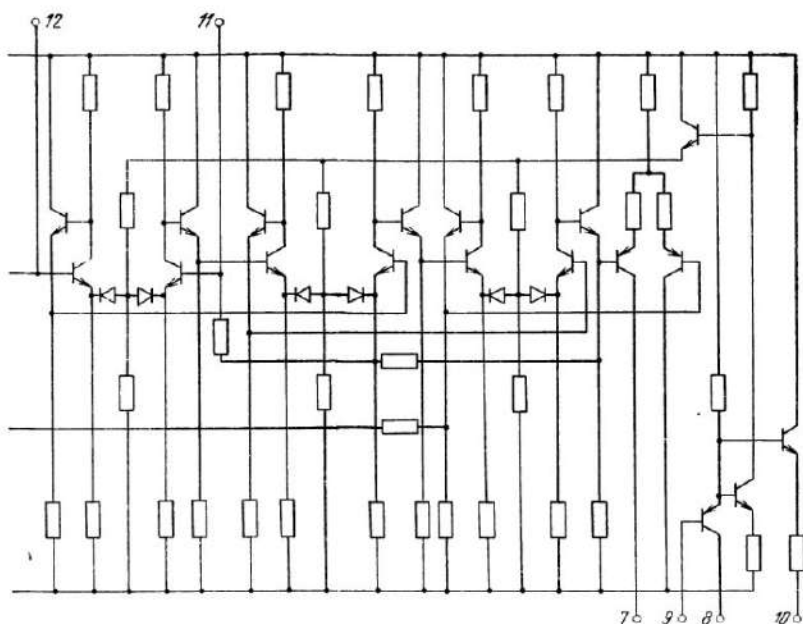


Рис. 2.5. ЛИС усилительно-преобразовательного тракта АМ сигналов типа

по типовой схеме системы ФАПЧ, содержащей генератор, управляемый напряжением, фазовый детектор и фильтр низких частот (рис. 2.7). Схема является достаточно универсальной и может использоваться в качестве нелинейного управляемого фильтра, демодулятора ФМ и ЧМ сигналов, синхронного АМ демодулятора.

Разработка полупроводниковых ЛИС, использующих принцип ФАПЧ, является в настоящее время одним из перспективных направлений создания элементной базы аналоговых МСБ. Дальней-

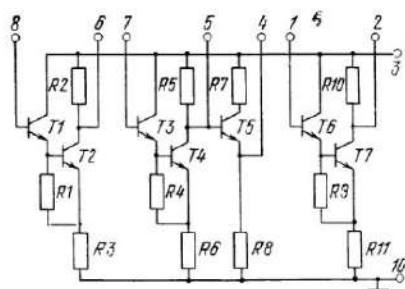


Рис. 2.6. Универсальная ЛИС типа К529УП1 для построения активных фильтров (бескорпусный вариант К729УП1)

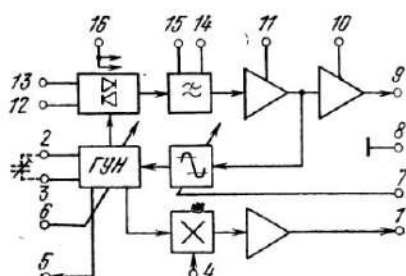
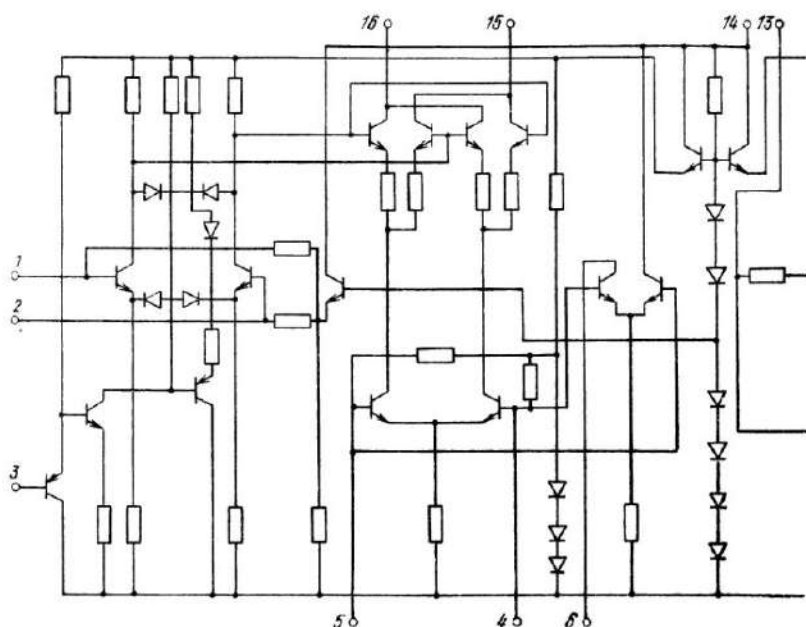


Рис. 2.7. ЛИС фазовой автоматической подстройки частоты — аналог NE561B



К174ХА2 (бескорпусный вариант К774ХА2)

шее развитие полупроводниковых ЛИС предполагает создание микросхем, сочетающих функции усиления и детектирования с селективированием аналоговых сигналов. Успешная разработка таких устройств открывает перспективы изготовления в едином технологическом процессе всех основных элементов трактов аналоговой обработки.

2.1.2. Обеспечение помехоустойчивости и электромагнитной совместимости аналоговых МСБ

Аналоговые МСБ представляют собой, как правило, полностью функционально законченные устройства (например, каналы усиления, фильтрации и оптимальной обработки сигнала). Требуемое весьма значительное (порядка 80 ... 120 дБ) общее усиление сигнала на промежуточных частотах делает проблему обеспечения устойчивости достаточно сложной.

Для обеспечения такого усиления в аппаратуре на корпусированных ЛИС требуется несколько широкополосных ИС в сочетании с фильтрующими устройствами. Усиление каждой ИС при этом относительно невелико (20 ... 40 дБ), поэтому проблема обеспечения устойчивости решается рациональным размещением элементов на печатной плате и соединением корпусов и проводников нулевого потенциала [2.2].

При создании блока на МСБ проблема устойчивости усложняется. На практике постановка каких-либо перегородок или экранов внутри общего корпуса, а тем более на подложке МСБ затруднительна. Поэтому основным методом обеспечения устойчивости становится аналитический расчет амплитудно-частотной характеристики (АХЧ) усилительной микросборки, расчет паразитных обратных связей в зависимости от конструктивных элементов и выбор компромиссного схемотехнического и конструкторского решения.

Как правило, устойчивость работы аналоговых МСБ обеспечивается подключением к выводам ЛИС специальных компенсирующих цепей, изменяющих форму частотно-фазовых характеристик. Расчет параметров компенсирующих цепей ведется на основании имеющихся диаграмм частотно-фазовых характеристик применяемых ЛИС и рассчитанных параметров паразитной обратной связи. Если в руководстве по применению данной ЛИС указанные диаграммы отсутствуют, они могут быть построены на основании аналитического выражения характеристики ЛИС. Методика построения основана на аппроксимации модуля частотно-фазовой характеристики, приведенной к виду $A(j\omega) = A_1 e^{j\varphi}$, где A_1 (в дБ) — алгебраическая сумма, каждое из слагаемых которой в виде асимптотических выражений представлено в полулогарифмическом масштабе отрезком прямой. Изменение наклона асимптотических диаграмм происходит в точках излома, соответствующих полюсам функции A_1 .

Наиболее вероятные, трудно устранимые каналы обратной связи в МСБ — это емкостная связь выходных и входных цепей, а также индуктивная связь по току за счет выводов цепей нулевого потенциала от подложек на внешние выводы. В обоих случаях справедливо следующее выражение для коэффициента передачи цепи общей паразитной обратной связи $K_{oc}(x)$ в зависимости от нормированной частоты x :

$$K_{oc}^I(x) = K_{oc_0} [jx / (1 + jx\tau_0)], \quad (2.1)$$

где x — частота, нормированная к типовому значению $2\pi f_T$ применяемых в микросборке ЛИС; τ_0 — постоянная времени обратной связи.

Эквивалентные схемы двух видов паразитной обратной связи, описываемых выражением (2.1), приведены на рис. 2.8. Предпо-

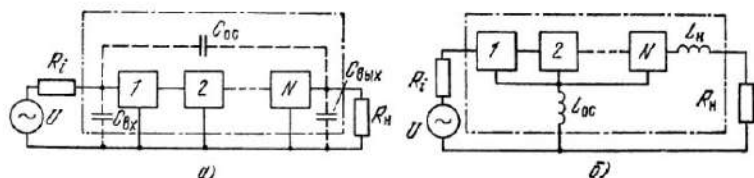


Рис. 2.8. Эквивалентные схемы паразитной связи:

а — через емкость корпуса; б — через индуктивность проводника нулевого потенциала

лагается, что МСБ состоит из N каскадно соединенных «абсолютно» устойчивых секций на ЛИС. При параллельной обратной связи через емкость C_{oc} и чисто активном внутреннем сопротивлении источника сигнала R_i $K_{oc_0} = 2\pi f_T C_{oc} R_i$, $\tau_0 = 2\pi f_T C_{вх} R_i$. При простейшем виде индуктивной последовательной обратной связи $K_{oc_0} = 2\pi f_T L_{oc} / R_n$, $\tau_0 = 2\pi f_T L_{вых} / R_n$ (R_n — сопротивление нагрузки).

Величина допустимого значения $K_{oc_{доп}}$ оценивается по аналитическому выражению для АЧХ и ФЧХ усилителя, полученному любым известным методом.

Важными показателями устройства с обратной связью являются коэффициент петлевого усиления, равный коэффициенту передачи напряжения (или тока) через усилитель и цепь связи, т. е. $K_{п} = K_{oc_0} K$, и фаза петли обратной связи, представляющая собой аргумент комплексного коэффициента петлевого усиления $\varphi_{п} = \arg(K_{oc_0} K)$. При охвате обратной связью сравнительно большого числа каскадов (3 и более) фаза петли обратной связи изменяется в широких пределах, перекрывая $\pm\pi$. В результате на отдельных участках частотного диапазона обратная связь (ОС) становится положительной. Согласно известному критерию усилитель с ОС стабилен в том случае, если контур $K_{п}$ на диаграмме Найквиста не охватывает точку $+1$. Следовательно, $K_{oc_{доп}}$ определяется как

$$K_{oc_{доп}} \leq 1/K, \quad (2.2)$$

где K — коэффициент передачи по напряжению (или току) усилителя. По этой величине определяются допустимые значения емкости и индуктивности обратной связи. Если доминирующей является емкостная обратная связь, то

$$C_{oc} \leq \frac{K_{oc_{доп}}}{2\pi f_T R_i}, \quad L_{oc} \leq \frac{K_{oc_{доп}} R_n}{2\pi f_T}. \quad (2.3)$$

Если преобладает индуктивная обратная связь, то

$$C_{oc} \leq \frac{K_{oc_{доп}}}{2\pi f_T R_i}, \quad L_{oc} \leq \frac{K_{oc_{доп}} R_n}{2\pi f_T}. \quad (2.4)$$

Из выражений (2.3) и (2.4) видно, что с уменьшением сопротивления нагрузки до 50 ... 75 Ом роль индуктивной обратной связи по току резко возрастает. В микросборках, которые работают на достаточно большое (единицы килоом) входное сопротивление последующих каскадов, устойчивость определяется в основном емкостной обратной связью. Таким образом, при известных R_n и конфигурации выходной цепи проверка неравенств (2.3) и (2.4) не представляет затруднения. После определения допустимых значений C_{oc} и L_{oc} можно провести сравнение вариантов топологии микросборок и различных конструктивных решений микроблока с точки зрения устойчивости.

Расчет матрицы собственных и взаимных емкостей элементов пленочной микросборки при известной ее топологии может быть

проведен, однако с увеличением размеров МСБ и усложнением их топологии он становится все более трудоемким и менее точным. Поэтому целесообразно использовать приближенную оценку влияния высоты корпуса МСБ или общего корпуса нескольких МСБ в микроблоке планарной конструкции, предложенной в работе [2.2]. При этом C_{oc} вычисляется по следующей формуле:

$$C_{oc} = \frac{4C_{вх}C_{вых}}{\varepsilon} \sin \frac{2\pi h}{h'} \exp\left(-\frac{\pi l}{h'}\right), \quad (2.5)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость однородного диэлектрика, которым заполнено пространство внутри корпуса; h — толщина подложки; h' — высота корпуса МСБ или микроблока; l — расстояние между входной и выходной цепями усилителя; $C_{вх}$, $C_{вых}$ — входная и выходная емкости, зависящие от площади входной и выходной цепи, диэлектрической проницаемости и толщины подложки.

Для высокочастотных микросборок характерна паразитная обратная связь по току. Чаще всего топология усилительных микросборок содержит вдоль всей подложки прямой пленочный проводник нулевого потенциала, который как бы соединяет входную и выходную цепи. В нескольких равноотстоящих друг от друга точках этот проводник подключается к общему корпусу микросборки или микроблока с помощью коротких проволочных перемычек длиной l , причем первая из них расположена в непосредственной близости от входной цепи, а последняя — около выходной.

При подобной конструкции усилительная микросборка может быть представлена цепной схемой, состоящей из симметричных четырехполюсников и нагруженной с обоих концов на одинаковые сопротивления. Выражение для коэффициента передачи такой цепи в зависимости от числа N однотипных ЛИС, на которых построен усилитель, и в зависимости от ширины пленочного проводника нулевого потенциала приведено в работе [2.2]. Из него следует, что с уменьшением ширины земляного проводника глубина рассматриваемой обратной связи уменьшается. Однако чрезмерное (менее 50 мкм) сужение проводника приведет к резкому усилению не учитываемых здесь видов паразитной обратной связи по току. Выбор компромиссного решения удобно производить при использовании графика зависимостей коэффициента обратной связи и индуктивности пленочного проводника нулевого потенциала от ширины проводника b при различном числе проволочных перемычек m . Очевидно, что m равно числу каскадов $N+1$.

Пример 2.1. Требуется определить устойчивость МСБ усилителя со следующими параметрами: $K=1000$, $R_i=R_n=1$ кОм, $f_T=25$ МГц. Микроблок, в состав которого входит МСБ, заполнен инертным газом ($\varepsilon=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м). Толщина подложки МСБ $h=0,6$ мм, высота корпуса $h'=7$ мм, расстояние между входной и выходной цепями $l=15$ мм, $C_{вх}=C_{вых}=2$ пФ.

Так как $R_i=R_n \gg 1$ кОм, устойчивость определяется в основном величиной C_{oc} . По формуле (2.5) находим

$$C_{oc} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^{-12}}{8,85 \cdot 10^{-12}} \sin^2 \frac{\pi \cdot 0,6}{7} \exp\left(-\frac{\pi \cdot 15}{7}\right) = 1,5 \cdot 10^{-16} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ пФ.}$$

Далее, из (2.2) и (2.3) определяем

$$K_{ос\text{ доп}} = \frac{1}{1000} = 10^{-3}, \quad C_{ос\text{ доп}} \leq \frac{10^{-3}}{2\pi \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^3} = 6,37 \cdot 10^{-15} = 6,37 \cdot 10^{-3} \text{ пФ}.$$

Так как $C_{ос} < C_{ос\text{ доп}}$, МСБ усилителя устойчива.

Важно отметить, что при увеличении длины входных и выходных проводников МСБ в 2 раза, что соответственно увеличит $C_{вх}$ и $C_{вых}$, и при уменьшении расстояния между входной и выходной цепями в 3 раза величина $C_{ос}$ увеличивается в 356 раз и усилитель перестает быть устойчивым ($C_{ос} = 5,34 \cdot 10^{-2} \text{ пФ} > C_{ос\text{ доп}}$).

2.1.3. Особенности схемотехнической отработки конструкций аналоговых БГИС и МСБ

Микросборки УВЧ. Основными требованиями к УВЧ являются следующие: широкий частотный диапазон (до 200 ... 500 МГц), небольшой коэффициент шума (менее 4 дБ), коэффициент усиления до 15 ... 18 дБ и возможность регулировки усиления в пределах 10 дБ.

Разработанные до настоящего времени линейные полупроводниковые интегральные схемы имеют граничную частоту усиления до 150 МГц и коэффициент шума 6 ... 10 дБ у лучших образцов. Поэтому микросборки усилителей высоких частот (УВЧ) целесообразно строить на бескорпусных ВЧ транзисторах с граничной частотой до единиц гигагерц и коэффициентом шума 1,5 ... 2 дБ и менее. Как правило, каскады усиления строятся по распространенной схеме с общим эмиттером (ОЭ), позволяющей получить на умеренно высоких (до 300 МГц) частотах максимальное усиление при небольшом уровне шумов. На достаточно высоких для применяемого типа транзистора частотах падает входное сопротивление усилителя с ОЭ. Это вызывает уменьшение коэффициента и делает выгодным переход к схеме с общей базой (ОБ).

Применение полевых транзисторов с граничной частотой 350 ... 400 МГц в схеме с общим затвором (ОЗ) позволяет уменьшить коэффициент шума и расширить динамический диапазон приемника. При использовании двухзатворных полевых транзисторов усиление регулируется достаточно просто и весьма эффективно подачей управляющего напряжения на второй затвор.

Среди каскодных УВЧ лучшими по своим показателям являются усилители, реализованные по схемам с ОЭ—ОБ и ОИ—ОЗ [2.3].

Возможно также использование смешанных каскодных схем с ОИ—ОБ и ОИ—ОЭ. Это обусловлено тем, что сочетание полевых и биполярных транзисторов обеспечивает высокое усиление по мощности [2.3]. Схемы с ОИ—ОЭ характеризуются высоким усилением и большим входным сопротивлением. Они наиболее пригодны для узкополосных УВЧ. Схемы с ОИ—ОБ, имеющие меньшее входное сопротивление, позволяют реализовать широкополосные УВЧ. На частотах 100 МГц и менее УВЧ могут быть реализованы на бескорпусных ЛИС.

Недостатком подобных ЛИС является ограничение частотного диапазона снизу из-за отсутствия выводов для подключения дополнительных конденсаторов и малая универсальность.

Значительно более распространены в настоящее время ЛИС для построения УВЧ, содержащие один или несколько дифференциальных каскадов (ДК). Их схемотехническое построение определяет особенности электрического расчета подобных схем. Дифференциальный каскад с генератором тока I_0 (рис. 2.9) характеризуется следующими выражениями для передаточных характеристик [2.4]:

$$I_{K1} = \alpha I_0 [1 + \exp(-U_{\text{диф}}/\varphi_T)]^{-1},$$

$$I_{K2} = \alpha I_0 [1 + \exp(U_{\text{диф}}/\varphi_T)]^{-1},$$

где $U_{\text{диф}} = U_{\text{бэ1}} - U_{\text{бэ2}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}$; $\varphi_T \approx 25$ мВ; $U_{\text{бэ}}$ — напряжение на переходах база — эмиттер.

Наклон передаточных характеристик определяет крутизну характеристик ДК

$$S_1 = \frac{dI_{K1}}{dU_{\text{диф}}} = \frac{\alpha I_0 \exp(-U_{\text{диф}}/\varphi_T)}{\varphi_T [1 + \exp(-U_{\text{диф}}/\varphi_T)]^2}, \quad (2.6)$$

$$S_2 = \frac{dI_{K2}}{dU_{\text{диф}}} = -S_1.$$

Максимальная крутизна характеристики $S_{1\text{max}} = \alpha I_0 / 4\varphi_T$ получается при $U_{\text{диф}} = 0$.

Для транзисторного генератора тока (рис. 2.10) величина I_0 вычисляется как [2.5]

$$I_0 = E_{\text{см}} R_0 / R_{\text{см}} R_{\text{э}}. \quad (2.7)$$

Сопротивление переменному току транзисторного генератора тока не отличается от выходного сопротивления каскада с общей базой и определяется как

$$R_{\text{экв}} \approx (1 + y_{21} R_{\text{э}}) / y_{22}. \quad (2.8)$$

Изменяя смещение на базе транзисторного генератора тока, можно управлять током I_0 . Формула (2.7) принимает вид

$$I_0 = \left(\frac{E_{\text{см}}}{R_{\text{см}}} + \frac{E_{\text{упр}}}{R_{\text{упр}}} \right) \frac{R_0}{R_{\text{э}}}. \quad (2.9)$$

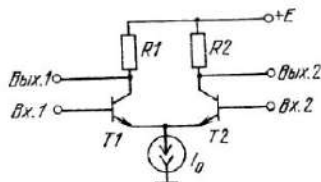


Рис. 2.9. Дифференциальный каскад

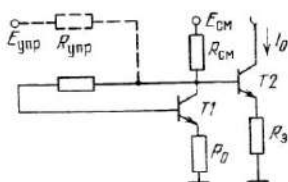


Рис. 2.10. Транзисторный генератор тока

Из (2.6) видно, что, изменяя I_0 , можно управлять крутизной характеристики ДК. Зависимость $S_1(E_{\text{упр}})$ нетрудно найти из (2.6) и (2.9):

$$\frac{S_1}{S_1(E_{\text{упр}}=0)} = 1 + \frac{E_{\text{упр}} R_{\text{см}}}{E_{\text{см}} R_{\text{упр}}}. \quad (2.10)$$

Крутизна характеристики дифференциального каскада линейно зависит от управляющего напряжения, приложенного к базе транзисторного генератора тока. Это свойство ДК широко используется в различных схемах усилителей с АРУ.

В справочных данных на интегральные схемы, подобные схемам ДК, обычно приводится значение крутизны S [мА/В]. Для определения типового коэффициента усиления достаточно умножить S на рекомендованное сопротивление коллекторной нагрузки R_k [кОм] (что соответствует сопротивлению резисторов $R1$ и $R2$ на рис. 2.9): $K = SR_k$. Если требуемый коэффициент усиления ниже типового, часть коллекторной нагрузки шунтируется по частоте сигнала внешним конденсатором. Емкость шунтирующего конденсатора выбирается из условия

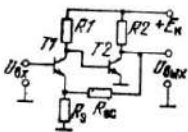
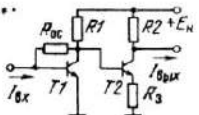
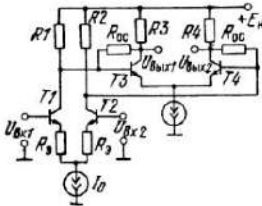
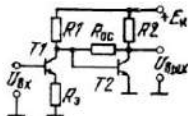
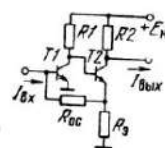
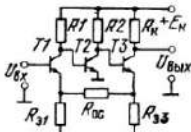
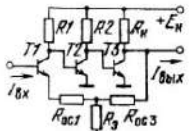
$$C \geq (10 R_{\text{ш}} / 2\pi f_c),$$

где $R_{\text{ш}}$ — шунтируемая часть R_k ; f_c — частота усиливаемого сигнала. Например, если требуется от ИС типа К775УВ2 (типичные значения $S = 10$ мА/В, $R_k = 2$ кОм) получить усиление $K = 7$ на частоте 10 МГц, резистор R_k составляется из двух последовательно соединенных резисторов с номиналами 700 Ом и 1,3 кОм. Емкость шунтирующего конденсатора равна 220 пФ.

При разработке микросборок УВЧ применение обратной связи для оптимизации их характеристик на высоких частотах является определяющим условием. Если требуемый коэффициент усиления не обеспечивается одной ЛИС и микросборка содержит несколько каскадов усиления, имеется возможность выбора обратной связи, т. е. возможность охватывать местной обратной связью каждую ЛИС в отдельности или целиком всю МСБ. Местная обратная связь с точки зрения устойчивости всей МСБ в некоторых случаях более удобна, так как позволяет рассчитать каждую ЛИС независимо от других. Коэффициент усиления ЛИС, охваченной обратной связью, определяется соотношением сопротивлений обратной связи и мало зависит от других параметров. Применение в качестве резистора обратной связи управляемого элемента (например, полевого транзистора) позволяет ввести электронную регулировку усиления. Основные схемы с обратной связью и соответствующие им расчетные формулы для определения коэффициентов усиления приведены в табл. 2.1.

Цепь обратной связи, охватывающая полностью всю микросборку УВЧ, обеспечивает более высокую стабильность уровня сигнала и меньшую чувствительность к отклонениям коэффициента усиления отдельных ЛИС. Однако, поскольку при этом обратной

Таблица 2.1

Схема	Расчетная формула
	$K_U \approx -\frac{R_{oc}}{R_3} \quad (1)$
	$K_I \approx -\frac{R_{oc}}{R_3} \quad (2)$
	$K_U \approx \frac{R_{oc}}{R_3 + R_T / I_0} \quad (3)$
	$K_U \approx -\frac{R_3 + R_{oc}}{R_3} \quad (4)$
	$K_I \approx -\frac{R_3 + R_{oc}}{R_3} \quad (5)$
	$K_U \approx \frac{R_K (R_{31} + R_{33} + R_{0e})}{R_{31} R_{33}} \quad (6)$
	$K_I \approx \frac{R_{oc1} R_{oc3} + R_3 (R_{oc1} + R_{oc3})}{R_3 R_K} \quad (7)$

связью охватывается большое число активных элементов, необходимо тщательнее анализировать устойчивость усилителя.

Построение микросборки УВЧ. В МСБ использованы две широкополосные ЛИС типа $\mu A733$. Усиление по напряжению порядка 40 дБ. Полоса пропускания 10...120 МГц. Коммутацией внешних выводов можно изменять коэффициент усиления дискретно от 25 до 80 дБ. Принципиальная схема МСБ приведена на рис. 2.11, а.

Коэффициент усиления каждой ЛИС вычисляется по формуле (3) табл. 2.1:

$$K_U = \frac{R_{oc}}{R_3 + r_T/I_0} = \frac{7 \cdot 10^3}{R_3 + (25 \cdot 10^{-3}) / (2,8 \cdot 10^{-3})}.$$

При этом R_3 может принимать значения 0; 50 или 640 Ом в зависимости от того, какие из выводов «Рег. ус.» соединяются между собой. Общий коэффициент усиления МСБ складывается из усиления по каскадам:

$$K_{U_{общ}} [\text{дБ}] = \Sigma K_U [\text{дБ}].$$

Амплитудно-частотные характеристики усилителя приведены на рис. 2.11, б. МСБ имеет размеры 16×20 мм, масса ее 3 г. Резисторы тонкопленочные, кон-

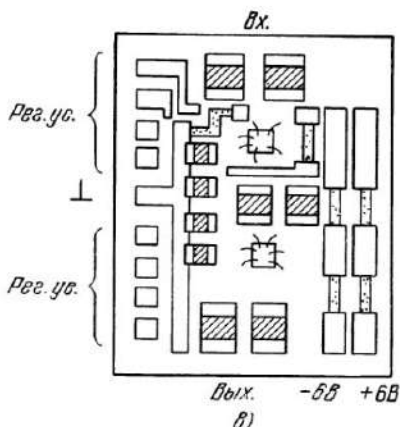
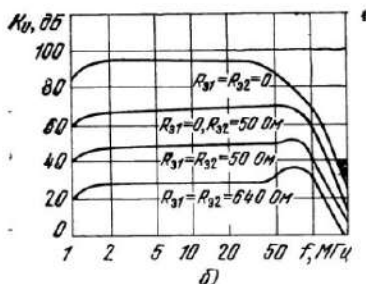
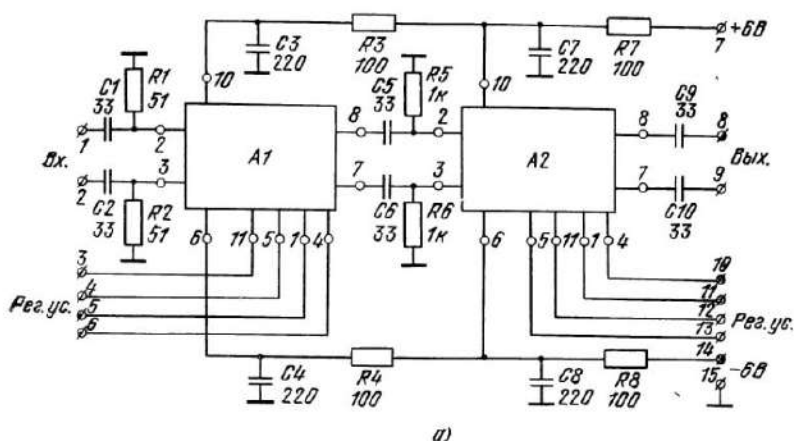


Рис. 2.11. Микросборка УВЧ:

а — принципиальная электрическая схема; б — амплитудно-частотные характеристики; в — рисунок внешнего вида

денсаторы навесные микроминиатюрные типа К10-17в. Расположение ЭРЭ и внешних контактных площадок МСБ показано на рис. 2.11,в.

Микросборки УПЧ. В настоящее время можно выделить два основных направления разработки специализированных ЛИС:

- 1) для усиления, ограничения и детектирования ЧМ сигналов,
- 2) для усиления, преобразования и детектирования АМ сигналов.

В одном кристалле реализуются следующие части ЧМ тракта: широкополосный усилитель-ограничитель, квадратурная цепь, фазовый детектор на основе балансного перемножителя и предварительный УНЧ. В качестве примера можно привести ИС типа К774УР2. Как правило, подобные схемы требуют внешних конденсаторов фазосдвигающей цепи и фильтров питания. Для ориентировочных расчетов можно принять, что на каждую из выполняемых схемой функций (усиление, преобразование, детектирование) требуется по два внешних конденсатора. Однако это число может уменьшаться за счет дальнейшего развития интегральной схемотехники (широкого применения каскадов сдвига уровня и фазосдвигающих цепей на основе полупроводниковых структур).

Типичными являются следующие характеристики ЛИС для ЧМ тракта: входное напряжение для начала ограничения 50 мкВ; коэффициент подавления амплитудной модуляции 50 дБ; напряжение на выходе детектора 0,1 ... 0,5 В.

Большое число структурных вариантов построения АМ трактов, а также недостаточно выявленная перспективность и экономическая целесообразность массового выпуска ЛИС определенного типа АМ тракта не позволяют четко выработать единый подход к проектированию серии специализированных ЛИС этого типа. Поэтому если реально достижимая степень интеграции в настоящее время — несколько сотен элементов на кристалл, то количество элементов в кристалле АМ ЛИС обычно не превышает 100. Следовательно, определение функциональной полноты и отработка схемотехники высококачественных ЛИС достаточно большой степени интеграции для АМ приемных трактов является одной из основных задач создания ЛИС этого направления.

Существующие ЛИС помимо многокаскадного УПЧ со схемой обеспечения АРУ могут содержать преобразователи частоты на базе балансного перемножителя и отдельный гетеродин. Однако такое объединение не позволяет реализовать широкие функциональные возможности перемножителя аналоговых сигналов, который может функционировать как фазовый детектор при ЧМ работе схемы, синхронный детектор, квадратичный детектор и т. д. Следствием является малая универсальность схемы и отсутствие преимуществ при новых модификациях аппаратуры.

Большие коэффициенты усиления при достаточно высоких граничных частотах предъявляют особенно жесткие требования к разработке топологии МСБ УПЧ. При каскадировании отдельных ЛИС необходимо применение развязывающих RC-фильтров по питанию, а в ряде случаев и миниатюрных дросселей, устанавливаемых на подложку МСБ.

В большинстве случаев в УПЧ требуется регулировать усиление с помощью замкнутой схемы АРУ. Такая регулировка достигается смещением рабочей точки одного или нескольких каскадов ЛИС, применением диодных аттенуаторов, изменением режима токозадающего транзистора дифференциального каскада, применением управляемого резистивного элемента в цепи обратной связи. Эффективную регулировку можно обеспечить, применив в качестве управляемого напряжением элемента связи между каскадами сопротивление $R_{сн}$ между стоком и истоком полевого транзистора. Наиболее удобно включение полевого транзистора между эмиттерами транзисторов дифференциального каскада (выводы «Рег. ус.» на рис. 2.11,а). При расчетах можно воспользоваться зависимостью сопротивления $R_{сн}(U_{упр})$:

$$R_{сн} \approx R_{сн(0)} / \sqrt{1 - U_{упр}/U_0}, \quad (2.11)$$

где $R_{сн(0)}$ — сопротивление между стоком и истоком при нулевом управляющем напряжении; U_0 — напряжение отсечки полевого транзистора.

Для выработки напряжения АРУ используются как внутренние каскады отдельных ЛИС (например, ЛИС типа К174УП2), так и специализированные ИС детекторов АРУ. Имеющиеся внешние выводы позволяют управлять коэффициентом передачи по цепи АРУ и выбирать порог срабатывания (напряжение задержки). Некоторые ЛИС УПЧ содержат как управляемые каскады, так и детекторы АРУ с усилителями постоянного тока. Они обеспечивают весьма широкий диапазон АРУ (60 дБ по промежуточной частоте у ЛИС типа ТСА440).

Приведем несколько примеров построения микросборок УПЧ.

Двухкаскадный усилитель с RC-связями и цепью обратной связи. Микросборка обеспечивает усиление 52 дБ по напряжению при разомкнутой цепи ОС в середине полосы пропускания. Принципиальная схема МСБ приведена на рис. 2.12,а.

Конденсатор C_4 емкостью 50 пФ шунтирует дифференциальную составляющую напряжения на выходе первого каскада. Этот конденсатор подавляет возбуждение по ВЧ, повышая устойчивость усилителя. Амплитудно-частотная характеристика усилителя представлена на рис. 2.12,б для случая $R_{ос} = \infty$. Завал усиления на НЧ вызван межкаскадными емкостями C_5 и C_6 . Благодаря возможности подключения напряжения АРУ к первому каскаду МСБ может быть использована в качестве видеоусилителя с АРУ при разорванной цепи ОС. Действие АРУ сохраняется и при использовании $R_{ос}$ для регулировки усиления.

На рис. 2.12,в приведены регулировочные характеристики усилителя для замкнутой и разомкнутой цепи ОС на частоте 1 кГц. Как видно из рис. 2.12,б, полоса пропускания усилителя при разомкнутой цепи ОС составляет 13 Гц ... 135 кГц. В случае замкнутой цепи ОС полоса расширяется до 1,3 ... 2 МГц при усилении 30 дБ и до 0,5 Гц ... 5,5 МГц при усилении 20 дБ.

Отрицательная ОС достаточно эффективно расширяет полосу пропускания в области НЧ, благодаря чему возможно использование конденсаторов $C5, C6$ относительно небольшой емкости. При каскадировании трех и более ЛИС типа К775УВ2 для предотвращения генерации ВЧ и НЧ края АЧХ усилителя должны быть более пологими. Трехкаскадный усилитель обеспечивает усиление порядка 78 дБ в середине полосы пропускания. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчета. Коэффициент усиления каждого каскада определяется как $K = SR_K = 10 \text{ мА/В} \times 2 \text{ кОм} = 20 = 26 \text{ дБ}$.

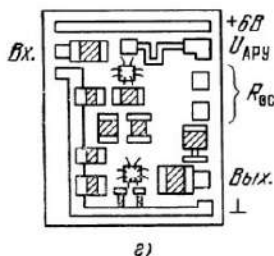
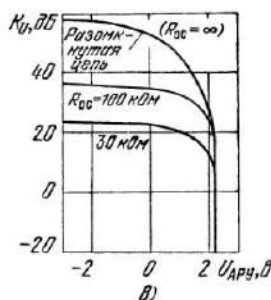
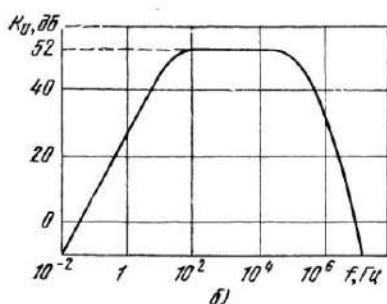
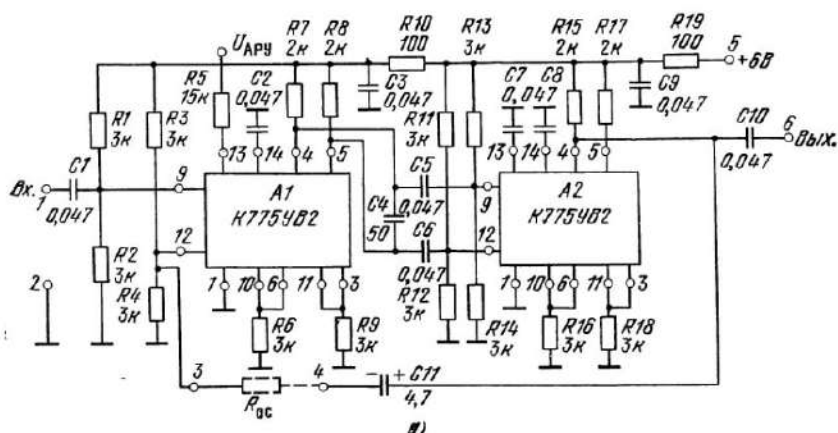
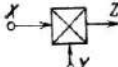
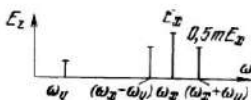
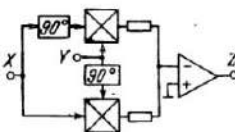
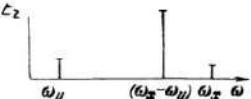
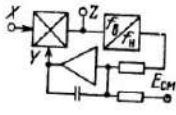
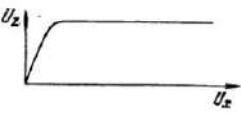


Рис. 2.12. Микросборка УПЧ:
а — принципиальная электрическая схема; б — амплитудно-частотная характеристика; в — регулировочные характеристики; г — рисунок внешнего вида

Таблица 2.2

Функция, выполняемая ЛИС	Функциональная схема	Эпюры сигнала
Балансный модулятор-демодулятор		
Бифазный модулятор		
Линейный детектор		
Квадратичный детектор		
ЧМ детектор		
Делитель частоты		
Удвоитель частоты		
Фазовый детектор		

Функция, выполняемая ЛИС	Функциональная схема	Эпюры сигнала
Амплитудный модулятор		
Однополосный модулятор		
Усилитель с АРУ		

Микросборка выполнена на ситалловой подложке размерами 16×20 мм. Масса микросборки 3г. Резисторы изготовлены по тонкопленочной технологии, конденсаторы навесные микроминиатюрные типа К10-17В и К53-15 (конденсатор С11 электролитический). Расположение внешних контактных площадок показано на рис. 2.12,г. Резистор R_{oc} требуемого номинала может быть выполнен в виде мозаики с последующей наклейкой на подложку, бескорпусным ниточным или микроминиатюрным, устанавливаемым на печатной вставке.

Микросборки радиотехнических преобразователей. Радиотехнические преобразования могут выполняться специализированными ЛИС, например ЛИС типа К174УР1 и К174УР2, осуществляющими детектирование ЧМ сигналов, отечественной ЛИС — аналогом ТСА440, содержащей гетеродин и смеситель АМ сигналов, или ЛИС типа LM273. Последняя, в зависимости от схемы включения, может детектировать ЧМ, ФМ сигналы или гетеродинировать сигнал АМ. Функции преобразования в большинстве подобных схем выполняет каскад с конфигурацией балансного перемножителя. Широкие функциональные возможности аналогового перемножителя, позволяющие использовать его в качестве балансного смесителя, детектора АМ, ЧМ, ФМ сигналов, квадратичного АМ демодулятора, смесителя-гетеродина и т. д., делают его наряду с дифференциальным усилителем основным активным элементом приемно-усилительных трактов.

Наряду со специализированными выпускаются универсальные ЛИС аналогового перемножителя, например ЛИС типа К726ПС1

и К740МА1. Функции, выполняемые подобными ЛИС, приведены в табл. 2.2.

В зависимости от вида и уровня опорного напряжения $U_{оп}$, подаваемого на вход Y аналогового перемножителя К726ПС1, его выходное напряжение описывается следующими выражениями:

1. Большой уровень $U_{оп}$, величина $U_{оп}$ постоянна, U_c изменяется во времени: $U_{оп} = U_{оп0}$, $U_c = U_{c \max} \cos \omega_c t$. При этом

$$U_{вых} = R_H U_c / (2r_э + R_p).$$

2. Большой уровень $U_{оп}$, величины $U_{оп}$ и U_c изменяются во времени: $U_{оп} = U_{оп \max} \cos \omega_{оп} t$, $U_c = U_{c \max} \cos \omega_c t$. При этом

$$U_{вых} = R_H u(t) U_c / (2r_э + R_p),$$

где $U_{оп \max}$ — максимальная амплитуда синусоидального напряжения $U_{оп}$; $u(t)$ — меандр, изменяющийся от $+1$ до -1 с разложением в ряд Фурье: $u(t) = (4/\pi) (\cos \omega_{оп} t - 1/3 \cos 3\omega_{оп} t + \dots)$. Частота выходного напряжения в этом случае преобразуется в $\omega_{оп} \pm \omega_c$, $3\omega_{оп} \pm \omega_c$, ... и в то же время усиливается.

3. Малый уровень $U_{оп}$, величина $U_{оп}$ постоянна, U_c изменяется во времени: $U_{оп} = U_{оп0}$, $U_c = U_{c \max} \cos \omega_c t$. При этом

$$U_{вых} = - \frac{R_H}{2(2r_э + R_p) (kT/q)} U_{оп0} U_c.$$

4. Малый уровень $U_{оп}$, величины $U_{оп}$ и U_c изменяются во времени: $U_{оп} = U_{оп \max} \cos \omega_{оп} t$, $U_c = U_{c \max} \cos \omega_c t$. При этом

$$U_{вых} = - \frac{R_H}{4(2r_э + R_p) (kT/q)} U_{оп \max} U_{c \max} \cos(\omega_{оп} \pm \omega_c) t.$$

Входной сигнал с частотой ω_c преобразуется в сигнал с частотами $\omega_{оп} \pm \omega_c$ без каких-либо дополнительных частотных составляющих.

МСБ синхронного детектора. Устройство предназначено для синхронного и амплитудного детектирования. По сравнению с детектором на диодах данная

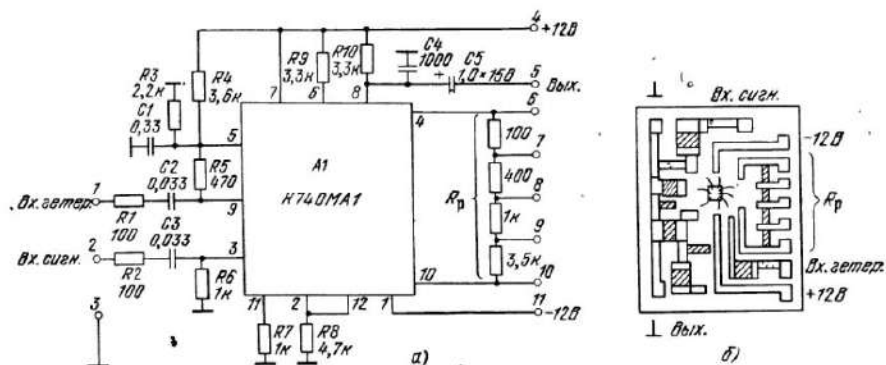


Рис. 2.13. Микросборка синхронного детектора.

а — принципиальная электрическая схема; б — рисунок внешнего вида

МСБ обладает высокой линейностью и стабильностью электрических характеристик в широком (от -60 до $+60^{\circ}\text{C}$) диапазоне температур, имеет простое схемное решение и универсальное применение. Принципиальная схема МСБ приведена на рис. 2.13,а. Входной непрерывный сигнал с частотой $\omega_{\text{вх}} \pm \Omega$ поступает на контактную площадку (КП) 2, сигнал гетеродина с частотой $\omega_{\text{гг}}$ на КП 1. В выходном токе можно выделить составляющую с частотой Ω , амплитуда которой пропорциональна произведению амплитуд сигнала и гетеродина. Для исключения зависимости амплитуды выходного сигнала от напряжения гетеродина величина уровня последнего выбрана больше уровня ограничения (80 мВ).

Гармоники вида $n\omega_{\text{гг}} \pm m\Omega$ в выходном токе фильтруются конденсатором С4. Величина составляющих вида $m\Omega$ определяется уровнем входного сигнала и может регулироваться резистором R_p , от величины сопротивления которого зависит коэффициент передачи синхронного детектора. Этот резистор выполнен в виде гребенки с отводами на внешние КП.

При соответствующем выборе емкостей переходных и фильтрующих конденсаторов, а также подборе резистора R_p микросборка может работать в широком частотном (0,1...30 МГц) и динамическом (10^{-4} ...1,0 В) диапазонах входных сигналов. МСБ выполнена на ситалловой подложке размерами 20×16 мм, масса ее 1,6 г. Расположение ЭРЭ и внешних контактных площадок МСБ показано на рис. 2.13,б.

2.1.4. Расчет и оптимизация конструктивных характеристик аналоговых трактов на МСБ

Основные функциональные параметры, определяющие назначение аппаратуры на аналоговых МСБ, следующие:

- 1) область применения;
- 2) диапазон рабочих частот. Аппаратура может быть предназначена для работы на одной или нескольких фиксированных частотах или в некотором диапазоне частот. Выбор усилительно-преобразовательной элементной базы определяет верхнюю границу диапазона (250...300 МГц);
- 4) погрешность установки заданного номинала входной частоты и нестабильность настроек частотно-избирательных МСБ;
- 5) чувствительность;
- 6) избирательность;
- 7) характеристики частных (отдельных частей) трактов и выходов. К ним относятся вид оконечного устройства, АЧХ и ФЧХ тракта, допустимые искажения;
- 8) характеристики ручных и автоматических регулировок;
- 9) работоспособность при заданном изменении климатических условий, механических воздействий, питающих напряжений и изменении параметров во времени;
- 10) надежность;
- 11) электропитание (номиналы и допустимые изменения питающих напряжений, потребляемые токи).

В подгруппу ограничений на структуру аппаратуры на аналоговых МСБ входят ограничения по элементной базе, степени унификации схемных и конструктивных решений, степень преемственности данной разработки по отношению к предыдущим. В дальнейшем будем учитывать следующие ограничения: а) усилительно-преобразовательная элементная база — бескорпусные полупроводниковые аналоговые ИС; б) устройства частотной се-

лекции — интегральные пьезокварцевые, пьезокерамические фильтры, фильтры на основе эффекта ПАВ, активные RC -фильтры на бескорпусных аналоговых ИС, микроэлектронные LC -фильтры.

К материальным показателям качества аппаратуры на МСБ относятся масса, суммарная площадь, объем, коэффициент заполнения объема, стоимость, время, необходимое на разработку. Как указывалось в гл. 1, в зависимости от конкретных требований данные из подгруппы У могут переходить в подгруппу К и наоборот. Приведенное деление является типичным и наиболее часто встречаемым примером, соответствующим задаче разработчика оптимизировать материальные характеристики при заданных электрических параметрах, работоспособности и надежности.

Расчет конструктивных параметров аппаратуры на аналоговых МСБ производится на основе использования зависимостей материальных параметров (массы m , суммарной площади S , объема V и т. д.) от заданных функциональных параметров: $m=f_m(K)$, $S=f_S(K)$, $V=f_V(K)$, где K — функциональные параметры (диапазон частот, чувствительность, избирательность, коэффициент усиления и т. д.).

Поскольку непосредственно найти $f_m(K)$, $f_S(K)$, ... трудно, то определение конструктивных параметров целесообразно разделить на два этапа:

1. Составление по данным ТЗ электрической функциональной схемы устройства и «покрытие» ее элементной базой.

2. Определение материальных параметров на основании составленной схемы, известных удельных коэффициентов выбранной элементной базы и коэффициентов дезинтеграции.

При оценке суммарной площади и массы МСБ аналоговой аппаратуры можно считать, что занимаемые пленочными резисторами «обрамления» и коммутационными проводниками площадь и масса малы по сравнению с установочной площадью и массой аналоговых ИС и конденсаторов. Поэтому для расчетов достаточно выявить зависимости $n_a(Y, O_s, O_k)$ и $C_\Sigma — (n_a, Y, O_s, O_k)$, где n_a — число активных компонентов (кристаллов аналоговых ИС); C_Σ — суммарная емкость конденсаторов «обрамления», а также зависимости $m(n_a, C_\Sigma)$, $S(n_a, C_\Sigma)$, $\Lambda(n_a, C_\Sigma)$ суммарной массы и площади, занимаемой активными компонентами и конденсаторами, и интенсивности отказов этих компонентов.

Для полупроводниковых аналоговых ИС справедлива следующая зависимость:

$$K_1 = A(f) = a_0 - \frac{a_1 f^2 + a_2 f^2 + a_3 f + a_4}{b_1 f^2 + b_2 f^2 + b_3 f + b_4},$$

где K_1 — коэффициент передачи одной аналоговой ИС, дБ; f — рабочая частота, МГц; $a_0, a_1, \dots, b_1$ — некоторые (постоянные для данного этапа развития техники полупроводниковых ИС) коэффициенты. Для расчетов можно воспользоваться выражением для

K_1 в численном виде:

$$K_1 = 66 - \frac{63,9f^2 - 2857f^2 - 5530f + 3471}{f^2 - 24f^2 - 884f - 248}.$$

Тогда число ИС n_{ai} , нужных для обеспечения некоторого коэффициента усиления K_i (дБ) на частоте f_i , определяется как $n_{ai} = K_i/K_1 = K_i/A(f_i)$. Общее число усилительных ИС, входящих в устройство,

$$n_a = \sum_{i=1}^l n_{ai} = \sum_{i=1}^l K_i/A(f_i),$$

где l — число частот, на которых ведется усиление.

Современная схемотехника аналоговых полупроводниковых ИС позволяет свести к минимуму число элементов «обрамления». Использование непосредственных связей и каскадов сдвига уровня исключает необходимость в применении разделительных конденсаторов между каскадами одной ИС. Для большинства ИС в среднем необходимо пять конденсаторов «обрамления» на одну ИС: два блокировочных в цепях эмиттеров, два фильтрующих в цепях питания и один развязывающий между двумя ИС. Их емкости определяются из следующих условий: $C_{бл\ i} = 500/2\pi f_i R_э$, $C_{ф\ i} = 50/2\pi f_i R_ф$, $C_{р\ i} = 10/2\pi f_i (R_{в\ых\ i} \| R_{в\х\ i+1})$, где $C_{бл\ i}$ — емкость блокировочного конденсатора ИС, работающей на частоте f_i ; $C_{ф\ i}$, $C_{р\ i}$ — емкости фильтрующего и разделительного конденсаторов; $R_э$ и $R_ф$ — сопротивление резисторов в цепи эмиттера и в цепи фильтра питания ИС; $R_{в\ых\ i}$ и $R_{в\х\ i}$ — выходное и входное сопротивления i -й ИС.

Диапазон изменений $R_э$, $R_ф$, $(R_{в\ых\ i} \| R_{в\х\ i})$ для усилительных полупроводниковых ИС весьма невелик, и с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять $R_э = R_ф = 500$ Ом $(R_{в\ых\ i} \| R_{в\х\ i}) = 100$ Ом. Тогда суммарная емкость конденсаторов «обрамления» одной i -й ИС

$$C_{\Sigma i} = 2C_{бл\ i} + 2C_{ф\ i} + C_{р\ i} = 0,5/2\pi f_i \text{ [Ф]}.$$

В общем виде $C_{\Sigma i} = B/2\pi f_i$, где B — некоторая константа, зависящая от схемотехники.

Для получения зависимостей $m(n_a, C_{\Sigma})$ и $S(n_a, C_{\Sigma})$ воспользуемся понятиями удельная масса на емкость m_c , удельная площадь на емкость S_c , а также известными из опыта разработок и ОСТов на конструирование площадью S_a , занимаемой на МСБ одним кристаллом (чипом) и массой одного чипа m_a . Применяемые в настоящее время миниатюрные бескорпусные конденсаторы типа К10-17В наиболее часто используемой группы ТКЕ М750 имеют значения $m_c = 1,5 \cdot 10^8$ г/Ф, $S_c = 1 \cdot 10^{10}$ мм²/Ф. Масса одного чипа $m_a = 1 \cdot 10^{-2}$ г, установочная площадь $S_a = 10$ мм².

Суммарная площадь, занимаемая усилительными ИС и конденсаторами,

$$S_{\Sigma} = n_a S_a + \left(\sum_{i=1}^l n_{ai} C_i \right) S_c = \sum_{i=1}^l \frac{K_i (S_a + S_c B / 2\pi f_i)}{A(f_i)}. \quad (2.12)$$

Суммарная масса ИС и конденсаторов

$$m_{\Sigma} = n_a m_a + \sum_{i=1}^l n_{ai} C_i m_c = \sum_{i=1}^l \frac{K_i (m_a + m_c B / 2\pi f_i)}{A(f_i)}. \quad (2.13)$$

Суммарная интенсивность отказов ИС и конденсаторов

$$\Lambda = n_a \lambda_a + n_c \lambda_c \approx (\lambda_a + 5\lambda_c) n_a = (\lambda_a + 5\lambda_c) \sum_{i=1}^l K_i / A(f_i), \quad (2.14)$$

где λ_a и λ_c — интенсивности отказов ИС и конденсаторов.

Если коэффициенты усиления K_i (в дБ) на частотах f_i не заданы, а известен общий коэффициент усиления тракта

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^l K_i, \quad (2.15)$$

то значения K_i могут быть определены из условия обеспечения минимальной площади или массы МСБ тракта, минимальной интенсивности отказов усилительных ИС и конденсаторов или обеспечения минимума комплексного показателя качества. Оптимизация может быть проведена методами линейного программирования, причем целевыми функциями могут быть выражения (2.12) — (2.14), а ограничениями — выражение (2.15) и другие зависимости, определяющие выбор K_i из соображений устойчивости, динамического диапазона, чувствительности и т. д.

При проведении оптимизации по комплексному показателю качества получаются весьма громоздкие выражения для конструктивных параметров. В этом случае для расчетов целесообразно использовать ЭВМ. В качестве примера можно привести образец распечатки исходных данных и результата расчета общей площади МСБ аналогового тракта, соответствующей оптимальному распределению коэффициентов усиления по частотам. Расчет выполнен на мини-ЭВМ «Электроника-15ВСМ5».

Пример распечатки исходных данных и результата расчета площади микросборок аналогового тракта.

Расчет площади аналоговых МСБ

L=3.0

F1=66.00000 МГц

F2=10.70000 МГц

F3=.46500 МГц

F4=.00000 МГц

F5=.00000 МГц

K=1000000.0

A=66.0

S(A)=10.0 мм²

S(C)=.1000000000000 Е 11 мм²/Ф

B=.000000500 Ф·МГц

ПЛОЩАДЬ МСБ S=2643.09 мм²

При распечатке использованы следующие обозначения: L — число частот, на которых ведется усиление (l); $F_1, F_2, \dots$ — соответственно первая, вторая и т. д. частоты ($f_1, f_2, \dots$); поскольку программа рассчитана на пять частот, а в данном примере число частот равно трем, на печать выведено $F_4=0, F_5=0$; K — общий коэффициент усиления; $S(A)$ — площадь, занимаемая одной усилительной ИС ($S_a=10 \text{ мм}^2$); $S(C)$ — удельная площадь конденсаторов ($S_c=1 \cdot 10^{10} \text{ мм}^2/\Phi$); B — коэффициент, зависящий от схемотехники ($B=5 \cdot 10^{-7} \Phi \cdot \text{МГц}$); A — параметр, характеризующий усилительные свойства ИС.

На печать выведена общая площадь усилительных микросборок. При ее расчете полагалось, что площадь пленочных резисторов мала по сравнению с установочной площадью ИС и конденсаторов. Коэффициент дезинтеграции по площади (отношение общей площади микросборок к площади, занимаемой схемными элементами) принят равным 4.

Для дальнейших расчетов значение площади округляется до ближайшего, соответствующего одной или нескольким микросборкам стандартного типоразмера.

Окончательный расчет площади микросборок проводится на этапе разработки топологии (см. § 2.4).

2.2. Конструирование микросборок цифровых устройств

2.2.1. Краткая характеристика элементной базы

Цифровые БГИС и МСБ играют важную роль в МЭА. Обеспечение их высокого качества возможно лишь при условии применения современной элементной базы и прогрессивных принципов конструирования этих изделий. Элементной базой таких устройств являются цифровые интегральные схемы, которые могут быть потенциальными, импульсными и импульсно-потенциальными. Наибольшее распространение в настоящее время получили логические ИС потенциального типа. Это объясняется тем, что построение таких ИС не требует реактивных компонентов (индуктивностей, емкостей).

По типу основной логической ячейки ИС подразделяются на ИС: транзисторной логики с непосредственной связью (НСТЛ), транзисторной логики с непосредственной связью на МДП-транзисторах (НСТЛМ), транзисторной логики с резистивной связью (РТЛ), диодно-транзисторной логики (ДТЛ), транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), диодно-транзисторной логики с дополнительной симметрией (ДСДТЛ), модифицированной диодно-транзисторной логики (МДТЛ), транзисторной логики с переменным порогом (ППТЛ), эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ), эмиттерно-связанной логики с эмиттерным повторителем на входе (ЭСЛ), эмиттерно-связанной логики с дополнительной симметрией (ДСЭСЛ), логические схемы на МДП-транзисторах p -типа (p МДП), логические схемы на МДП-транзисторах n -типа

(нМДП), логические ИС на дополняющих МДП-транзисторах (КМДП), логические схемы с интегрально-инжекционной логикой (И²Л) и др. [2.5].

Отдельные ИС, объединенные по типу технологии изготовления, конструктивному оформлению и электрическим характеристикам, образуют серию ИС, способных выполнить необходимый набор логических операций.

Сравнительная оценка логических ИС осуществляется по следующим параметрам: реализуемая логическая функция, коэффициент объединения по входу, коэффициент разветвления по выходу, средняя задержка сигнала, потребляемая мощность, помехоустойчивость, напряжение лог. 0 (U^0) и лог. 1 (U^1), номиналы питающих напряжений.

По виду реализуемой функции логические ИС подразделяются на одноступенчатые (И, ИЛИ, НЕ), двухступенчатые (И—НЕ, ИЛИ—НЕ, и т. п.), трехступенчатые (И—ИЛИ—НЕ; НЕ—И—ИЛИ и т. д.), многофункциональные и многоступенчатые ИС, реализующие сложные логические функции (счетчики, регистры, дешифраторы и т. п.) [2.8].

Коэффициент объединения по входу показывает максимальное число логических входов ИС. Коэффициент разветвления по выходу характеризует максимальное число входов идентичных элементов, которое может быть подключено к выходу ИС.

Среднее время задержки ($t_{зд\text{ ср}}$) сигнала определяется как полусумма задержек переключения из состояния лог. 0 в лог. 1 и из состояния лог. 1 в лог. 0: $t_{зд\text{ ср}} = (t_{зд01} + t_{зд10})/2$.

Потребляемая мощность P_0 — мощность потребления ИС при работе в устройстве. Она связана с мощностью, рассеиваемой ИС в виде тепла (рассеиваемой мощностью $P_{\text{рас}}$), соотношением $P_{\text{рас}} = P_0 k_P$, где $k_P = 0,8 \dots 0,9$ — коэффициент потерь мощности. Рассеиваемая мощность является важным параметром, так как определяет тепловую напряженность ИС. Различают статическую и динамическую потребляемую мощности. Мощность, потребляемая в статическом режиме ($P_{\text{ост}}$), может быть определена как полусумма мощностей, потребляемых ИС в состояниях лог. 0 (P^0) и лог. 1 (P^1): $P_{\text{ост}} = (P^0 + P^1)/2$. Динамическая потребляемая мощность определяется мощностью, потребляемой при переключениях логических состояний ИС, и зависит от частоты этих переключений (рис. 2.14). Точки пересечения кривых с осью ординат определяют величину статической потребляемой мощности. Как следует из рисунка, статическая потребляемая мощность для ТТЛ ИС с диодами Шоттки составляет около 2 мВт/вентиль, а для КМДП.

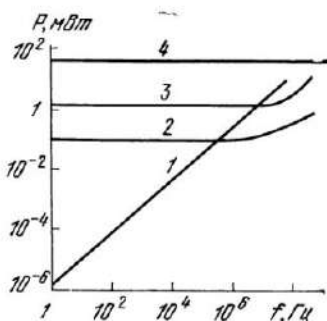


Рис. 2.14. Зависимость потребляемой мощности ИС от частоты переключений: 1 — КМДП; 2 — И²Л; 3 — ТТЛ с диодами Шоттки; 4 — ЭСЛ

ИС около 2 мВт/вентиль. Однако при конструировании цифровых МСБ расчет тепловых режимов, выбор мощностей источников питания и т. п. необходимо проводить не по этим данным, а по значениям полной потребляемой мощности (статическая + динамическая). Например, на частоте 2 МГц полные потребляемые мощности для ТТЛ и КМДП ИС примерно равны. Однако при рабочей частоте 2 МГц только часть ИС, входящих в цифровую МСБ, изменяет свое логическое состояние в каждом такте. Обычно доля таких ИС составляет примерно 20% от общего числа ИС, расположенных на МСБ. Таким образом, средняя потребляемая мощность на частоте 2 МГц для ТТЛ ИС с диодами Шоттки около 2 мВт/вентиль, а для КМДП ИС примерно 0,5 мВт/вентиль [2.9].

Различают статическую и динамическую помехоустойчивость: статическая определяется как предельно допустимое, неограниченное по длительности отклонение от номинальной величины входного сигнала, при котором уровень выходного сигнала остается неизменным; динамическая зависит от длительности, амплитуды и формы сигнала помехи, от уровня статической помехоустойчивости и скорости переключения элементов ИС. Динамическая помехоустойчивость характеризуется критической длительностью импульса помехи, при которой амплитуда помехи соответствует уровню статической помехоустойчивости ИС.

Разность напряжений между лог. 0 и лог. 1 характеризует перепад выходного напряжения при переключении ИС.

Величина номиналов питающих напряжений является важным параметром логических ИС. Увеличение числа источников и уменьшение величины допуска на питающие напряжения затрудняет использование ИС в цифровых МСБ и ведет к увеличению сложности вторичных источников питания.

Перечисленные выше параметры служат основой для выбора серии ИС. Исходя из требований на цифровую МСБ, конструктор выделяет основные параметры, по которым проводит сравнительный анализ различных серий логических ИС. Обычно этим параметрам приписываются определенные весовые коэффициенты, назначаемые либо методом экспертных оценок, либо из личного опыта конструктора. Сравнение различных серий ИС по отдельным параметрам не учитывает всю совокупность параметров в их взаимосвязи. Поэтому при выборе серии ИС используют также обобщенные параметры, например работу переключения $A = P_{\text{оср}} t_{\text{зд ср.}}$

При выборе серии ИС с помощью методов, изложенных в гл. 1, необходимо учитывать ограничения, обусловленные местом установки МЭА и условиями эксплуатации; требование по электромагнитной совместимости с другими МСБ, входящими в состав функциональной ячейки или блока; конструктивное оформление серии и т. д. [2.6].

Логические ИС выбранной серии являются активными компонентами цифровых МСБ. Выводы активных и навесных пассивных компонентов пайкой или сваркой присоединяются к контакт-

ным площадкам диэлектрической подложки. Межсоединения и пассивную часть МСБ наносят обычно на поверхность подложки испарением материала в вакууме или методом катодного распыления.

2.2.2. Обеспечение помехоустойчивости МСБ

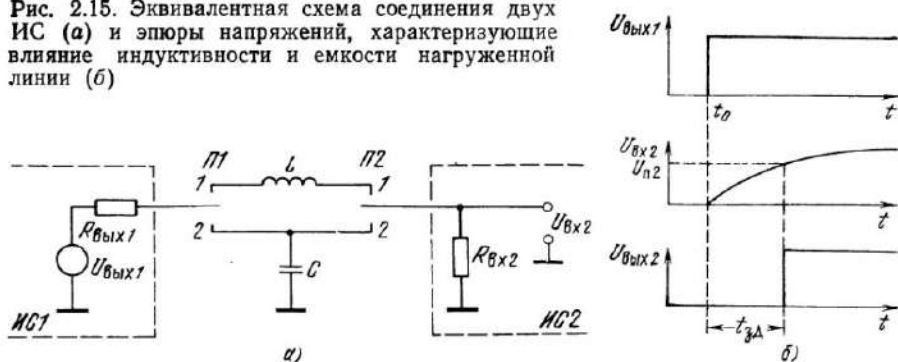
Особенностью цифровых МСБ является высокая плотность межсоединений (расстояние между соседними проводниками до 50 мкм). Наряду с этим активные компоненты МСБ могут функционировать на высоких частотах (десятки-сотни мегагерц). В этих условиях возрастают уровни помех, наводимых в соседних проводниках. Поэтому и для цифровых МСБ вопрос обеспечения помехоустойчивости является актуальным.

Электрические связи, возникающие между проводниками, можно разделить на «электрически короткие» и «электрически длинные» [2.7]. Электрически короткой называют линию связи, время распространения в которой много меньше длительности фронта импульса, передаваемого по линии. В электрически длинной линии связи время распространения сигнала больше длительности фронта импульса. В цифровых МСБ длительности фронтов передаваемых импульсов составляют обычно единицы-десятки наносекунд. Время распространения сигнала измеряется величинами порядка десятых-сотых долей наносекунды и менее. Поэтому связи в пределах МСБ, как правило, электрически короткие.

Анализ передачи сигналов в электрически коротких линиях основывается на том, что линию связи представляют в виде эквивалентной схемы, содержащей сосредоточенные индуктивность и емкость. Паразитную связь между двумя «короткими» линиями также представляют как связь через сосредоточенную взаимную емкость и взаимоиндуктивность. В случае преобладания той или иной составляющей сигнальная линия принимает индуктивный или емкостной характер.

Влияние индуктивности и емкости сигнальной линии выражается в задержке срабатывания нагруженных схем (рис. 2.15,б). Эквивалентная схема соединения двух ИС приведена на рис. 2.15,а.

Рис. 2.15. Эквивалентная схема соединения двух ИС (а) и эюры напряжений, характеризующие влияние индуктивности и емкости нагруженной линии (б)



При подаче скачка напряжения $U_{\text{вх1}}$ на вход ИС2 на ее выходе напряжение $U_{\text{вых2}}$ появится через время задержки $t_{\text{зд}}$, которое равно времени достижения напряжением $U_{\text{вх2}}$ порога срабатывания ($U_{\text{п2}}$). Аналитически время задержки можно определить следующим образом:

при индуктивном характере сигнальной связи

$$t_{\text{зд}} \approx L/R_{\text{вх2}}^*), \quad (2.16)$$

при емкостном характере сигнальной связи

$$t_{\text{зд}} \approx R_{\text{вх1}} C^*). \quad (2.17)$$

Для устойчивой работы цифровых МСБ необходимо, чтобы на максимальных рабочих частотах время переключения ИС было меньше $t_{\text{зд}}$. Исходя из рабочих частот и серии ИС определяют допустимое $t_{\text{зд}}$, затем из формул (2.16) и (2.17) находят допустимые значения L и C , которые зависят от типа проводников, их сечения, длины и материала подложки. Зная допустимые L и C , выбирают длину и сечение проводников, материал подложки.

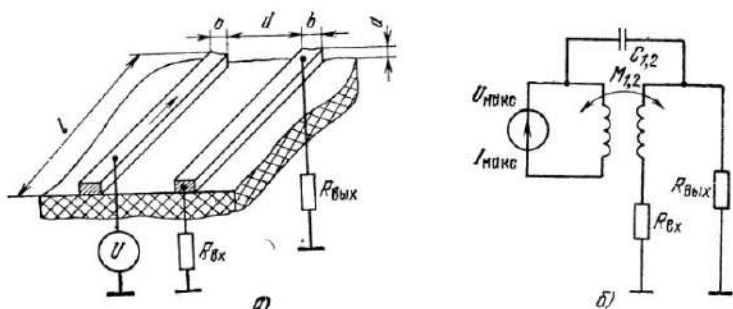


Рис. 2.16. К расчету паразитных индуктивной и емкостной связей между сигнальными проводниками (а) и эквивалентная схема сигнальных проводников (б)

В условиях высокой плотности размещения элементов на МСБ между сигнальными проводниками возникают емкостная и индуктивная паразитные связи, в результате чего при переключениях логических элементов на соседних проводниках наводятся помехи, которые могут вызвать ложное срабатывание ИС. Во избежание этого необходимо, чтобы величина помех не превышала допустимого предела. Анализ участка паразитных связей двух соседних проводников (рис. 2.16) позволяет определить допустимую длину этого участка:

при емкостной связи

$$l_c < \frac{\tau_{\text{ф}} k_{\text{пом}} \lg [2d/(a+b)]}{0,12 \epsilon_r R_{\text{вх}}} \cdot 10^{12}; \quad (2.18)$$

*) Аналитические выражения для $t_{\text{зд}}$ приведены при условии $R_{\text{вх1}} \ll R_{\text{вх}}$.

при взаимноиндуктивной связи

$$2l_M \left[2,3 \lg \left(\frac{2l_M}{d+b} \right) + \frac{d+b}{l_M+1} \right] \cdot 10^{-8} < \frac{U_{п\tau\phi}}{I}, \quad (2.19)$$

где l_C и l_M — допустимые длины общего участка проводников при емкостной и взаимноиндуктивной связях; τ_ϕ — длительность фронта импульса источника помехи; $k_{\text{пом}}$ — коэффициент помехоустойчивости ($k_{\text{пом}} = U_{\text{пом доп}}/U$); ϵ_r — диэлектрическая проницаемость среды; I — величина импульса тока, протекающего по цепи — источнику помех.

Неравенства (2.18) и (2.19) определяют условия устойчивой работы логических ИС. Неравенство (2.19) трансцендентное, его решают методом итераций.

В общем случае в цепи присутствуют емкостная и индуктивная составляющие помехи. Прямой способ нахождения суммарной помехи сложен. Полагая, что амплитуда помехи пропорциональна длине проводника, определим допустимую длину общего участка двух сигнальных цепей связи по формуле $l_{\text{доп}} = l_C l_M (l_C + l_M)$. Если полученное значение $l_{\text{доп}} > l$, значит помехи не могут вызвать ложного срабатывания ИС; в противном случае необходимо изменить топологию МСБ, например, увеличить d , чтобы получить $l_{\text{доп}} > l$.

2.3. Особенности конструирования цифровых МСБ и устройств на базе БИС микропроцессора [2.13]

2.3.1. БИС микропроцессора — элементная база цифровых вычислительных устройств с программируемой логикой

Недалеко то время, когда цифровые устройства на БИС и микро-ЭВМ будут воплощены в одну МСБ или, более того, в один кристалл БИС.

Прогресс технологии изготовления ИС и жесткие требования к характеристикам цифровых устройств явились главными причинами перехода к конструированию цифровых устройств на БИС. Однако увеличение степени интеграции БИС приводит к проблеме их малой тиражности. Следствием этого является увеличение номенклатуры БИС и стоимости цифровых устройств. Практическим решением проблемы малой тиражности БИС стал микропроцессор, который представляет собой универсальный электронный цифровой блок с программируемыми функциями.

В основу построения микропроцессора положен структурный принцип ЭВМ с запоминаемой программой. Функции, выполняемые микропроцессором, определяются программой, хранимой в запоминающем устройстве (ЗУ). Конструктивно микропроцессор выполняется в виде одной (однокристалльный микропроцессор) или нескольких БИС*).

* Здесь и далее имеются в виду БИС со степенью интеграции более 10^3 логических вентилей в кристалле.

В структуре однокристалльного микропроцессора (рис. 2.17) можно выделить следующие основные функциональные части: устройство управления (датчик управляющих импульсов, дешифратор команд), собственно процессор (арифметико-логическое устройство (АЛУ)), мультиплексор ввода — вывода, регистр состояний, регистры общего назначения (РОНы), адресный регистр, регистр результата.

Устройство управления принимает код команды из постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), дешифрует его и формирует последовательность кодов, управляющую собственно процессором.

Мультиплексор ввода — вывода служит для коммутации информации, поступающей в процессор. Регистр состояний сигнализирует о внутреннем состоянии процессора после выполнения команды. РОНы предназначены для временного хранения операндов и результатов операции. АЛУ осуществляет все арифметические и логические действия. В регистре адреса хранится адрес следующей команды. Регистр результата служит для временного хранения результата операции.

Если некоторые функциональные части микропроцессора конструктивно выполнены в виде отдельных БИС, то такой микропроцессор называют многокристалльным.

В 1975—1979 гг. на смену одно- двухкристалльным микропроцессорам пришли так называемые микропроцессорные комплекты БИС (МПК БИС К587, К589 и др.). Микропроцессорные комплекты включают в свой состав несколько БИС (5 ... 10) и позволяют реализовать различные цифровые устройства (контроллеры, управляющие блоки, микро-ЭВМ).

МПК БИС строятся на основе следующих принципов:

- микропрограммное управление;
- расширяемая разрядность;

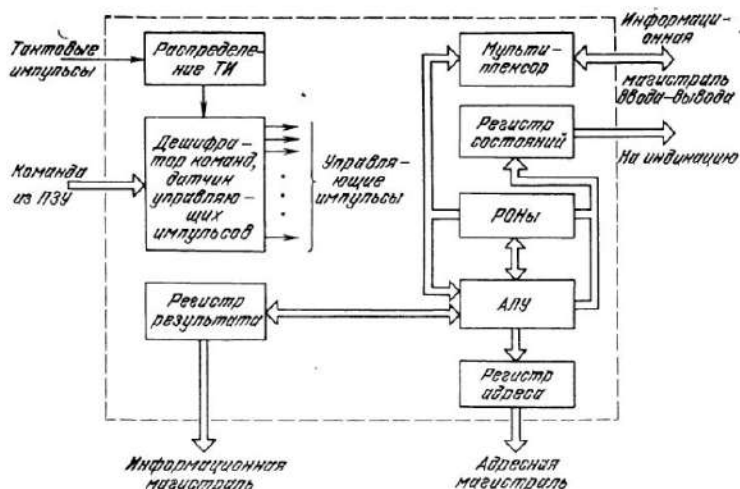


Рис. 2.17. Структурная схема однокристалльного микропроцессора

— специализация БИС по основному назначению (обрабатывающая, управляющая, памяти, ввода — вывода и т. д.);

— магистральная организация обмена информацией.

Основной принцип микропрограммного управления заключается в замене логических схем, образующих устройство управления, специальной программой, хранящейся в ЗУ, которое называют управляющей памятью (УП). УП предназначена для хранения последовательностей управляющих сигналов, организованных в слова, называемые микрокомандами. В составе МПК управляющая память реализуется в виде БИС, которая обычно состоит из программируемой логической матрицы (ПЛМ) и схем управления ею. Согласно ее функциональному назначению назовем БИС для хранения микрокоманд управляющей БИС. Микрокоманды, считанные из управляющей памяти, поступают на вход обрабатывающей БИС, которая предназначена для выполнения математических и логических действий над операндами. Обработывающая БИС включает в свой состав АЛУ, РОНЫ, дешифратор микрокоманд, регистр результата, регистр состояний и магистрали, связывающие обрабатывающую БИС с другими БИС МПК. Операнды, над которыми производится действие, хранятся либо на внутренних регистрах обрабатывающей БИС (РОНах), либо в ЗУ. БИС оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) предназначена для хранения, записи и чтения цифровой информации; она включает матрицу запоминающих ячеек, дешифраторы адреса и блок управления. БИС ПЗУ предназначена только для хранения и чтения цифровой информации. Запись информации в ПЗУ обычно производится в процессе ее изготовления.

В последнее время появились БИС репрограммируемого ПЗУ (РПЗУ), основное отличие которых от БИС ПЗУ заключается в том, что они допускают многократную перезапись содержимого памяти электрическим или иным путем.

Кроме перечисленных выше, в состав МПК входит БИС ввода — вывода, предназначенная для коммутации входной и выходной информации, а также некоторые другие БИС.

Важным свойством МПК БИС, позволяющим увеличить гибкость их применений, является расширяемая разрядность. Это свойство МПК БИС заключается в возможности расширения объема и разрядности микропрограммного управления (объединением управляющих БИС) и в увеличении разрядности операционных устройств (объединением обрабатывающих БИС). Длина разрядной сетки вычислительного устройства, полученного объединением соответствующих БИС, может быть определена как произведение разрядности одной БИС на число «объединенных» БИС.

МПК БИС могут различаться разрядностью, числом регистров, доступных и недоступных пользователю, разрядностью магистралей для связи с другими БИС, составом микрокоманд.

Перечисленные выше параметры главным образом определяются структурой МПК, функционально-технологическая реали-

лизация которой позволяет получить БИС МПК, отличающиеся следующими параметрами:

— функциональной плотностью, которая может быть выражена через число логических вентилях на единицу площади кристалла или через удельный коэффициент, равный обратной величине этого отношения;

— быстродействием, понимаемым как время задержки на одном вентиле;

— статической мощностью рассеивания и т. п. (см. § 2.1).

Таблица 2.3

Параметр	Вид функционально-технологической реализации					
	рМДП	пМДП	КМДП	ТТЛ	ЭСЛ	ИЛ
Площадь под вентиль, $\times 10^{-3}$ мм ²	7,5	3,7...5	6,25...18,7	12,5...37,5	12,5...31	2,5...3,7
Задержка/вентиль, нс	400	40...100	50...100	15...25	3...6	15...30
Статическая мощность рассеивания, мВт/вентиль	2...3	0,2...0,5	0,001...0,01	1...3	5...15	0,1
Мощность быстрого действия, пДж	200	10...50	3	10	10	1
Число этапов маскирования	5	6	7	7	8...9	5...7
Число процессов диффузий и ионного легирования	2	3	4	4	4...5	3...4
Быстродействие микропроцессора, $\times 10^8$ операций/с	50...80	250...300	250...300	1000...2000	3000...5000	1000...2000

В табл. 2.3 приведены основные параметры БИС, реализованных различными функционально-технологическими принципами, а также быстродействие микропроцессоров на этих БИС для операций типа «регистр — регистр».

Приведенные в табл. 2.3 [2.6, 2.9] виды функционально-технологической реализации БИС могут быть разбиты на следующие группы:

МДП БИС (n , p , КМДП), обладающие большой функциональной плотностью и невысоким быстродействием. Кроме того,

КМДП технология характеризуется наименьшей потребляемой мощностью в статическом режиме (в 10^3 раз меньше, чем ρ МДП, ТТЛ). В силу этого КМДП БИС применяются в автономных регуляторах, в устройствах обработки данных на борту летательных аппаратов, при обслуживании контрольно-измерительных систем. Наряду с ними n и ρ МДП БИС находят применение в калькуляторах, аналого-цифровом преобразовании, обработке данных при среднем быстродействии и в устройствах бытового назначения.

ТТЛ, ЭСЛ БИС, имеющие меньшую функциональную плотность и обладающие большим быстродействием. Основные области применения этой группы БИС — быстродействующие контроллеры, оперативное управление производственными процессами, обработка сигналов в «реальном» масштабе времени, аппаратура общего применения для обработки данных.

И²Л БИС характеризуются тем, что объединяют преимущества первых двух групп, т. е. обладают высоким быстродействием и наивысшей функциональной плотностью. И²Л БИС могут использоваться для всего спектра применения, кроме схем с повышенным быстродействием (ЭСЛ), схем с малым потреблением в статическом режиме (КМДП) и предельно дешевых схем с невысоким быстродействием (ρ МДП) для калькуляторов.

Как следует из данных, приведенных в табл. 2.3, микропроцессоры, реализованные на БИС, позволяют строить микро-ЭВМ с производительностью, отличающейся на два порядка друг от друга.

2.3.2. Программируемая логика и особенности конструирования микро-ЭВМ

Микропроцессор вместе с оперативной и постоянной памятью, набором входных — выходных и периферийных устройств образует микро-ЭВМ. Главной отличительной особенностью микро-ЭВМ является реализация ее функциональных частей на БИС (обычно МПК БИС). В микро-ЭВМ можно выделить пять главных функциональных частей (рис. 2.18).

Микропроцессор является управляющей и обрабатывающей частью микро-ЭВМ. Он состоит из управляющей памяти, реализованной на управляющих БИС, и собственно процессора, выпол-

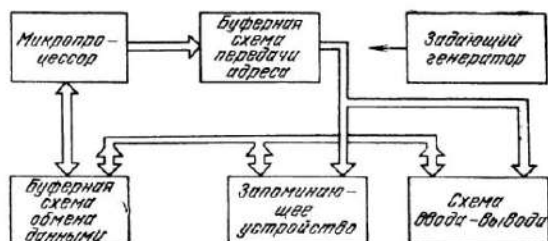


Рис. 2.18. Обобщенная структурная схема микро-ЭВМ.

ненного на обрабатывающих БИС. Микропроцессор инициирует обращение к ЗУ для считывания операндов и команд, производит запись результатов операции в ОЗУ. Команда, хранящаяся в ЗУ микро-ЭВМ, представляет собой упорядоченную последовательность микрокоманд (микропрограмму). Например, команда вида «Сложить число по адресу *A* с числом по адресу *B* и результат поместить по адресу *B*» может состоять из такой последовательности микрокоманд:

- число по адресу *A* записать в сумматор;
- содержимое сумматора сложить с числом по адресу *B*;
- содержимое сумматора записать по адресу *B*;
- сформировать адрес следующей команды (обычно путем увеличения содержимого счетчика команд на единицу).

ЗУ микро-ЭВМ, как правило, состоит из ОЗУ и ПЗУ, выполненных на БИС. Иногда в микро-ЭВМ, требующих частой смены программы или ее частей, предусматривается РПЗУ.

Буферная схема данных предназначена для коммутации информационных слов (данных), соответственно буферная схема адреса — для коммутации адресных слов.

Устройство ввода — вывода служит для коммутации входной и выходной информации микро-ЭВМ. Задающий генератор определяет длительности циклов работы всем устройствам микро-ЭВМ при синхронном режиме работы. При асинхронном режиме работы необходимость в задающем генераторе отпадает.

Функционирование микро-ЭВМ осуществляется следующим образом. По адресу, сформированному микропроцессором при выполнении текущей команды, происходит чтение командного слова в ЗУ. Командное слово через буферную схему обмена данными принимается управляющей памятью микропроцессора. УП дешифрует код команды и формирует на выходе последовательность микрокоманд (микропрограмму), управляющую работой собственно процессора. Под действием управляющей микропрограммы процессор производит выборки операндов из памяти, выполняет действие над ними и записывает результат операции в ЗУ. В конце выполнения микропрограммы формируется адрес следующей команды, если текущая не «Конец работы», иначе происходит останов работы микро-ЭВМ. На этом цикл выполнения команды заканчивается.

Функции, реализуемые микро-ЭВМ и представляющие собой упорядоченные последовательности команд, которые в виде программ хранятся в ЗУ, можно определить как программно-реализуемые.

Микро-ЭВМ или другие вычислительные устройства, программно реализующие функции, часто в литературе называют цифровыми устройствами с программируемой логикой или просто «программируемой» логикой. С другой стороны, цифровые устройства, реализующие функции аппаратно, обычно называют цифровыми устройствами с жесткой логикой или просто «жесткой» логикой. Под термином жесткий понимается возможность изме-

нения реализуемой функции только изменением принципиальной схемы цифрового устройства, т. е. цифровое устройство жестко связано с реализуемой функцией.

Анализ разработки цифровой МЭА с программируемой и жесткой логикой показал, что каждый этап разработки жесткой логики имеет свой аналог в программировании микро-ЭВМ (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Этапы разработки	Программируемая логика	Жесткая логика
1	Логическая схема алгоритма	Функциональная схема
2	Программа (подпрограмма)	Принципиальная схема, монтажная схема
3	Репрограммируемое ПЗУ (РПЗУ)	Технический макет
4	Программатор РПЗУ	Паяльник
5	Пульт настройки	Осциллограф
6	ПЗУ	Опытный образец

Аналогом функциональной схемы устройства жесткой логики, служащей для расчленения устройства на отдельные функциональные части, является логическая схема алгоритма программируемой логики, необходимая для разделения исходной задачи на отдельные последовательные части.

Язык схем с условными обозначениями, принятыми графическими знаками, несущими определенное функциональное назначение (резисторы, логические ИС и т. д.), эквивалентен командам микро-ЭВМ. Причем каждый из схемных элементов имеет свой аналог в программе микро-ЭВМ.

Программная реализация некоторых более сложных функций (например, задержка на определенное время) осуществляется в виде специальных подпрограмм микро-ЭВМ. Соединяя в определенной закономерности схемные элементы, инженер-разработчик получает принципиальную схему, реализующую определенную логическую функцию. Аналогично в программируемой логике реализация логической функции достигается составлением программы, представляющей собой упорядоченную последовательность команд.

Технический макет или прототип устройства эквивалентен репрограммируемому ПЗУ; каждый из них является аппаратурной реализацией разработки, используемой для проверки корректности заложенных в ней принципов и конструкторской документации. Паяльник или монтажный пистолет эквивалентен программатору РПЗУ; каждый из них является средством, используемым разработчиком для оформления аппаратуры на основе ее документации. Осциллограф эквивалентен пульту настройки и контроля; оба они подключаются к аппаратуре с целью контроля и наблюдения за происходящими в ней процессами. После отладки

макета и выпуска необходимой конструкторской документации изготавливается опытный образец и на этом проектирование МЭА с жесткой логикой заканчивается. Опытный образец аналогичен ПЗУ, куда записывается программа микро-ЭВМ после ее отладки в РПЗУ.

Результатом разработки аппаратуры с жесткой логикой являются МСБ, собираемые в функциональные ячейки (ФЯ), либо ФЯ, собираемые в блоки. Итогом разработки программируемой логики является программа, хранимая в ПЗУ микро-ЭВМ. Причем при проектировании цифровых устройств, реализующих другие логические функции, в случае жесткой логики меняется монтажная схема, элементная база, а следовательно, объем, потребляемая мощность, надежность и другие характеристики цифровых устройств. В случае же программируемой логики реализация различных логических функций достигается заменой содержимого ПЗУ либо РПЗУ.

Рассмотренная выше последовательность составления и отладки программ микро-ЭВМ является вторым и завершающим этапом разработки программируемой логики. Первый этап разработки заключается в выборе микро-ЭВМ, реализующей исходную функцию. Выбор микро-ЭВМ является основной задачей разработки, поскольку такие ее характеристики, как быстродействие, разрядность, объем ЗУ и другие, определяют качество разрабатываемой программируемой логики.

2.3.3. Оптимизация выбора и пример конструкторского расчета ЭВМ на МСБ

Для повышения эффективности конструирования и улучшения качества разрабатываемой программируемой логики необходимо оптимизировать выбор микро-ЭВМ. Взяв за основу общую процедуру оптимизации, отметим некоторые ее особенности применительно к поставленной задаче.

Процедура оптимизации микро-ЭВМ включает три этапа:

1. Определение подгруппы микро-ЭВМ, быстродействие и система команд которых позволяет реализовать исходную функцию.
2. Определение массогабаритных характеристик таких микро-ЭВМ.
3. Выбор оптимальной микро-ЭВМ.

С одной стороны, каждая реализуемая исходная функция содержит ряд требований, которым должна удовлетворять программируемая логика. С другой стороны, имеется некоторая группа микро-ЭВМ, отличающихся электрическими, конструктивными и другими характеристиками.

На первом этапе оптимизации из этой группы необходимо выделить такую подгруппу, каждая микро-ЭВМ которой обеспечивает реализацию исходной функции в рамках заданных ограничений. Для бортовой МЭА ими являются время выполнения и точность вычисления исходной функции.

Точность на выходе микро-ЭВМ определяется выражением

$$\sigma^2 = \sigma_m^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{\Pi}^2, \quad (2.20)$$

где σ^2 — среднееквадратическое значение результирующей ошибки на выходе микро-ЭВМ; σ_T , σ_m , σ_{Π} — соответственно среднееквадратические значения трансформируемой, методической и инструментальной ошибок.

Трансформируемые ошибки порождаются ошибками задания исходных величин. Эти ошибки в процессе выполнения операций алгоритма трансформируются в результирующую ошибку вычислений. Среднееквадратическое значение трансформируемой ошибки для случая, если параметры исходной функции независимы, может быть определено как

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_i \left[\sigma_i \frac{dF(x_1, x_2, \dots, x_n)}{dx_i} \right]^2}, \quad (2.21)$$

где $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — вид реализуемой функции; σ_i — среднееквадратическое значение i -го аргумента.

Методические ошибки обусловлены тем, что при необходимости входная функция заменяется близкой аппроксимирующей функцией. Поскольку блок-схема алгоритма исходной функции задана, то будем считать, что численный метод аппроксимации определен и поэтому значение σ_m известно.

Значение σ_T рассчитывается по формуле (2.21), σ задана в требованиях реализуемой функции, следовательно, из (2.20) получаем

$$\sigma_{\Pi}^2 = \sigma^2 - \sigma_T^2 - \sigma_m^2. \quad (2.22)$$

Инструментальные ошибки (σ_{Π}) обусловлены конечным числом разрядов, предназначенных для представления величин, и необходимостью округления результатов некоторых элементарных операций. Результирующая инструментальная ошибка представляет в общем случае сумму накопившихся ошибок при последовательных округлениях элементарных операций. Таким образом, инструментальная ошибка зависит от длины разрядной сетки и от вида аппроксимирующей функции.

Предположим, что вид функции σ_{Π} известен:

$$\sigma_{\Pi} = \varphi(R, N_0), \quad (2.23)$$

где R — длина разрядной сетки; N_0 — длина цепочки последовательных элементарных операций; зависит как от исходной, так и от аппроксимирующей функций. Алгоритм реализации исходной функции однозначно определяет величину N_0 . Определив σ_{Π} из формул (2.20) — (2.22), решаем уравнение (2.23) относительно R : $R = f(\sigma_{\Pi}, N_0)$.

Следующим шагом является определение производительности микро-ЭВМ.

Под производительностью (W) микро-ЭВМ понимается количество циклов прохода программы за некоторое время T_{Π} , называе-

мое шагом вычислений: $W = T_{\text{ш}}/T_{\text{ц}}$. Под шагом вычислений понимается минимально допустимый отрезок времени между вычислениями двух соседних значений реализуемой функции. В разных устройствах шаг вычислений определяется различными величинами: в РЛС, например, шаг вычислений зависит от периода между двумя отраженными от цели импульсами, в вычислителе СВС *) шаг вычислений определяется скоростью изменения давления, режимом полета и другими величинами.

Под временем цикла ($T_{\text{ц}}$) понимается отрезок времени, необходимый для однократного прохода программы:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{вв}}(1 - \varepsilon_1) + T_{\text{с}} + T'_{\text{к}} + T_{\text{выв}}(1 - \varepsilon_2), \quad (2.24)$$

где $T_{\text{вв}}$ и $T_{\text{выв}}$ — времена ввода исходного числового материала и вывода результатов соответственно; $T_{\text{с}}$ — время счета задачи; $T'_{\text{к}}$ — время контроля функционирования микро-ЭВМ (в случае тестового контроля); $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — коэффициенты совмещения ввода и вывода информации с процессом решения задачи.

С учетом (2.24) получим

$$W = \frac{T_{\text{ш}}}{T_{\text{вв}}(1 - \varepsilon_1) + T_{\text{с}} + T'_{\text{к}} + T_{\text{выв}}(1 - \varepsilon_2)}. \quad (2.25)$$

Входными данными являются параметры реализуемого алгоритма, его ограничения ($T_{\text{ш}}$) и характеристики каждой j -й микро-ЭВМ, принадлежащей исходной группе.

Выразим неизвестные в формуле (2.25) величины через исходные: $T_{\text{вв}j} = N_{\text{вх}}/v_{\text{вв}j}$ ($v_{\text{вв}j}$ — скорость ввода j -й микро-ЭВМ), $N_{\text{вх}}$ — количество входных чисел, определяемое из схемы алгоритма

$$T_{\text{с}j} = \sum_{i=1}^n \tau_{ij} \bar{S}_i \text{ при } j = \overline{1, l}, (j \text{ — номер ЭВМ}),$$

где n — число операторов алгоритма, τ_{ij} — время цикла реализации i -го оператора j -й микро-ЭВМ, $\bar{S}_i$ — средняя частота повторения i -го блока за один проход программы, l — общее число микро-ЭВМ; $T_{\text{выв}j} = N_{\text{вых}}/v_{\text{выв}j}$ ($v_{\text{выв}j}$ — скорость вывода информации j -й микро-ЭВМ), $N_{\text{вых}}$ — количество выходных информационных слов; $T'_{\text{к}} = T_{\text{к}}\varepsilon_3$ (ε_3 — коэффициент, учитывающий долю $T_{\text{к}}$ в каждом цикле прохода программы).

Подставляя в формулу (2.25) значения параметров, выраженных через известные исходные или расчетные величины, получаем

$$W_j = \frac{T_{\text{ш}}}{\frac{N_{\text{вх}}}{v_{\text{вв}j}}(1 - \varepsilon_1) + \sum_{i=1}^n \tau_{ij} \bar{S}_i + T_{\text{к}}\varepsilon_3 + \frac{N_{\text{вых}}}{v_{\text{выв}j}}(1 - \varepsilon_2)}. \quad (2.26)$$

Формула (2.26) объединяет следующие параметры: — характеристики микро-ЭВМ ($v_{\text{вв}}, v_{\text{выв}}, \varepsilon_1, \varepsilon_2$);

*) СВС — система воздушных сигналов.

- ограничения, накладываемые системой ($T_{\text{ш}}$);
- надежность ($T_{\text{квз}}$);
- характеристики задачи ($T_{\text{с}}, N_{\text{вх}}, N_{\text{вых}}$).

Как видно из формулы (2.26), W_j может принимать следующие значения: $0 < W_j \leq 1$ либо $W_j \geq 1$. Если $W_j \geq 1$, то быстродействие микро-ЭВМ позволяет реализовать исходную функцию. Если $0 < W_j < 1$, то для реализации исходной функции на данной микро-ЭВМ необходимо провести либо распараллеливание алгоритма, либо «конвейерную» организацию вычислений. Полагая, что распараллеливание и конвейерная организация вычислений приводят к увеличению массы и объема микро-ЭВМ, ограничимся рассмотрением случая $W_j \geq 1$. Таким образом, анализ производительности позволяет выделить подгруппу микро-ЭВМ (P'), которая допускает реализацию исходной функции.

На следующем этапе оптимизации проводится определение массо-габаритных характеристик микро-ЭВМ этой подгруппы. Определим емкость ЗУ. В простейшем случае запоминающее устройство включает ПЗУ и ОЗУ. В ПЗУ обычно размещаются: программа, реализующая заданный алгоритм, программа ввода, программа тестового контроля, стандартные подпрограммы и константы.

Полагая, что длины стандартных подпрограмм и теста определены, а алгоритм обработки ввода вошел в состав алгоритма реализуемой функции, информационная длина которого ($M_{\text{и}}$) известна, получаем

$$L_{\text{пр}} = \alpha M_{\text{и}} (P^{\alpha_0} + \beta_1 P^{\alpha_1} + \beta_2 P^{\alpha_2} + \beta_3 P^{\alpha_3}), \quad (2.27)$$

где $L_{\text{пр}}$ — объем ПЗУ для хранения программы; α — коэффициент, учитывающий увеличение программы за счет операций по обслуживанию структуры (3 ... 5%); масштабирования (5 ... 10%); помехозащиты (10 ... 15%) и т. п.; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — коэффициенты, определяющие правила записи одно-, двух- и трехадресных команд в программе конкретной микро-ЭВМ; $P^{\alpha_0}, P^{\alpha_1}, P^{\alpha_2}, P^{\alpha_3}$ — распределение числа операндов, используемых в одной операции, по информационной длине алгоритма.

Значения $P^{\alpha_0}, P^{\alpha_1}, P^{\alpha_2}, P^{\alpha_3}$ могут быть определены из исходного алгоритма. Подставляя значения параметров в формулу (2.27), получаем объем ПЗУ для хранения программ. Объем ПЗУ для хранения констант определяется из выражения

$$L_{\text{к}} = \sum_{k=1}^p C_k,$$

где p — количество констант; C_k — разрядность k -й константы.

Общий объем ПЗУ равен

$$L_{\text{ПЗУ}} = L_{\text{пр}} + L_{\text{к}} + L_{\text{сп}} + L_{\text{т}},$$

где $L_{\text{т}}$ — длина программы тестового контроля; $L_{\text{сп}}$ — общая длина стандартных подпрограмм.

Объем ОЗУ может быть оценен следующим образом:

$$L^{\circ}_{\text{ОЗУ}} = \alpha [\max \{q\} + N_{\text{вх}} + N_{\text{вых}}],$$

где $L^{\circ}_{\text{ОЗУ}}$ — объем ОЗУ, необходимый для хранения операндов; q — число промежуточных величин заданного алгоритма.

Полагая, что стандартные подпрограммы и тесты полностью располагаются в ПЗУ, получаем $L_{\text{ОЗУ}} = L^{\circ}_{\text{ОЗУ}}$.

После определения необходимого объема ЗУ (ПЗУ и ОЗУ) переходим к выбору оптимальной микро-ЭВМ с точки зрения массо-габаритных характеристик. При этом рассматриваются только те микро-ЭВМ, для которых $W_j \geq 1$. Кроме того, при определении массы и объема микро-ЭВМ необходимо учитывать емкость ПЗУ и ОЗУ. Поскольку, как правило, для каждого процессора микро-ЭВМ используются электрически совместимые с ним ЗУ, следовательно, для каждой *) микро-ЭВМ определяем количество БИС ЗУ:

$$N_{\text{ПЗУ } j} = L_{\text{ПЗУ}} l_{\text{к}} / L_{\text{БИС } j}, \quad (2.28)$$

где $N_{\text{ПЗУ } j}$ — число кристаллов ПЗУ j -й микро-ЭВМ; $L_{\text{БИС } j}$ — наибольшая емкость одной БИС ПЗУ для j -й микро-ЭВМ; $L_{\text{ПЗУ}}$ — емкость ПЗУ (слов); $l_{\text{к}}$ — длина командного слова.

Число БИС ОЗУ определяется по формуле, аналогичной (2.28). После определения числа БИС ОЗУ и ПЗУ определяем число монтажных плат, необходимых для размещения ЗУ:

$$П_{\text{ПЗУ } ij} = N_{\text{ПЗУ } j} / \bar{\gamma}_i,$$

где $П_{\text{ПЗУ } ij}$ — число монтажных плат ПЗУ i -го типоразмера j -й микро-ЭВМ; $\bar{\gamma}_i$ — среднестатистическое число БИС ПЗУ, которые могут быть расположены на i -й монтажной плате.

Число монтажных плат, необходимое для размещения ОЗУ, оценивается аналогично: $П_{\text{ОЗУ } ij} = N_{\text{ОЗУ } j} / \bar{\gamma}_i$. Масса одной типовой монтажной платы с расположенными на ней БИС и ИС известна (например, для подложки 24×30 мм это примерно 1,3 г).

Масса ЗУ ($\text{ОЗУ} + \text{ПЗУ}$) может быть определена из выражения

$$m_{\text{ЗУ } j} = m_{\text{пл}} (П_{\text{ПЗУ } ij} + П_{\text{ОЗУ } ij}) q_m,$$

где $m_{\text{пл}}$ — масса i -й монтажной платы; q_m — коэффициент дезинтеграции массы. Найдем массу каждой микро-ЭВМ: $m_j = m'_j + m_{\text{ЗУ } j}$. Здесь m'_j — масса j -й микро-ЭВМ (без собственного ЗУ); $m_{\text{ЗУ } j}$ — масса ЗУ j -й микро-ЭВМ. Рассуждая в аналогичной последовательности, определяем V_j — объемы j -х микро-ЭВМ и другие характеристики.

*) Предполагается, что все рассматриваемые микро-ЭВМ выполнены на различной элементной базе.

Определив конструктивные параметры для каждой микро-ЭВМ из множества P' , мы получим l возможных альтернатив. (l равно числу микро-ЭВМ). Выбор оптимальной микро-ЭВМ может быть осуществлен по методике, изложенной в гл. 1. Задача сводится к определению минимального значения комплексного показателя качества: $K_j = \varphi_m(m_j/M) + \varphi_v(V_j/V)$, при ограничениях $\lambda_j \leq \lambda_{\text{доп}}$; $C_j \leq C_{\text{доп}}$ и т. д., где φ_m , φ_v — весовые коэффициенты, зависящие от назначения устройства; M , V — нормирующие делители, например масса и объем устройства (системы) высшего ранга (§ 1.1).

Данная задача может быть решена известными методами линейного программирования.

Пример 2.2. Рассмотрим конструирование вычислителя фаз АФАР [2.10] в виде цифрового устройства с «жесткой» логикой — первый вариант и в виде «программируемой» логики — второй вариант.

Функциональная схема вычислителя приведена на рис. 2.19. Вычисление фаз ведется в соответствии с формулой

$$\varphi_{ij} = [(sd/\lambda)(i \cos \alpha + j \cos \beta)] \bmod s,$$

где s — число состояний фазовращателя ($s = 2\pi/\Delta\varphi$); $\Delta\varphi$ — дискрет по фазе;

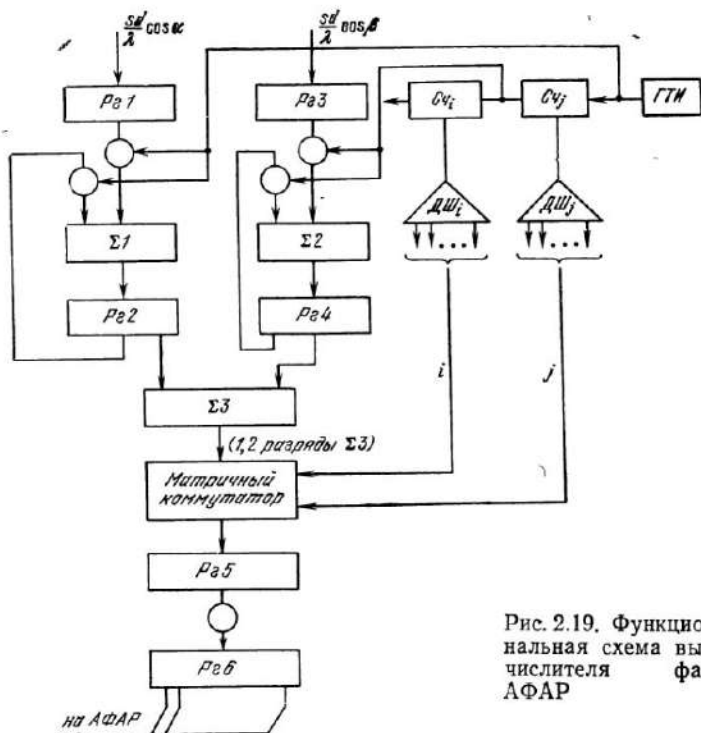


Рис. 2.19. Функциональная схема вычислителя фаз АФАР

d — шаг решетки; i и j — номера столба и строки; $[a]_{\text{mod } s}$ — символ операции взятия целой части числа по модулю s .

На входные регистры Pr1 и Pr3 поступают коды, пропорциональные направляющим косинусам $(sd/\lambda)\cos\alpha$ и $(sd/\lambda)\cos\beta$. На накапливающем сумматоре ($\Sigma 1 - \text{Pr2}$) производится умножение величины $(sd/\lambda)\cos\alpha$ на последовательные значения целого числа i ($i=1, 2, \dots$), задаваемого шагом импульсов генератора тактовых импульсов (ГТИ) и равного количеству излучателей, расположенных по горизонтали. Умножение на $j=1, 2, 3, \dots$ входной величины $(sd/\lambda)\cos\beta$ производится аналогичным образом на накапливающем сумматоре ($\Sigma 2 - \text{Pr4}$). Накопившиеся в Pr2 и Pr4 значения произведений $i(sd/\lambda)\cos\alpha$ и $j(sd/\lambda)\cos\beta$ складываются в сумматоре $\Sigma 3$ по модулю s .

Целая часть суммы берется при выдаче из сумматора $\Sigma 3$ старших разрядов; младшие разряды (дробная часть числа) отбрасываются. Код числа Φ_{ij} (старшие разряды $\Sigma 3$) поступают в нужную ij -ю ячейку АФАР через матричный коммутатор. Функциональная схема коммутатора приведена на рис. 2.20.

Проведем согласно методике, изложенной в [2.10], ориентировочную оценку аппаратурно-временных затрат в вычислителе фаз.

Вариант жесткой логики. В качестве элементной базы предполагается использовать ИС серий 133, 155.

1. Выбираем разрядность регистров $\text{Pr1} \dots \text{Pr4}$, сумматоров $\Sigma 1 \dots \Sigma 3$ $l = 8$ разрядов.

2. Разрядность счетчиков Сч_i , Сч_j : $l_{\text{Сч}_i} = \log_2 i_{\text{max}}$, $l_{\text{Сч}_j} = \log_2 j_{\text{max}}$, где i_{max} (j_{max}) — количество столбцов (строк) АФАР. Принимаем $i_{\text{max}} = j_{\text{max}} = 20$, тогда $l_{\text{Сч}_i, j} = \log_2 20 \approx 5$.

3. Разрядность Pr5 , Pr6 равна

$$l_{\text{Pr5}, \text{Pr6}} = N_p \log_2 s,$$

где N_p — число элементов АФАР ($N \leq i_{\text{max}} j_{\text{max}} \approx 400$); s — число состояний фазовращателя.

Считая, что дискрет по фазе $\Delta\phi = 20^\circ$, получаем $s = 18$; следовательно,

$$l_{\text{Pr5}, \text{Pr6}} = 400 \log_2 18 \approx 1700.$$

4. Время цикла вычислений $T_{\text{ц}} = \tau_{\Sigma} i_{\text{max}} j_{\text{max}} / \eta$, где η — коэффициент использования сумматоров по времени; $\tau_{\Sigma} = 9\tau_{\Sigma \text{дэ}}$ — время сложения в сумматоре (время сложения одного разряда, состоящее из $6\tau_{\Sigma \text{дэ}}$ — времени, необходимого для осуществления операции сложения, и $3\tau_{\Sigma \text{дэ}}$ — времени, необходимого для запоминания результатов); $\tau_{\Sigma \text{дэ}}$ — время задержки логического вентиля. Для ТТЛ ИС принимаем $\tau_{\Sigma \text{дэ}} = 15 - 20$ нс, значит, $\tau_{\Sigma} = 135 - 180$ нс. Принимаем последовательную схему сумматора $\eta = 0.5$. Тогда $T_{\text{ц}} \approx 1,15$ мс.

5. Коммутатор реализуется на 530 чипах типа 3×3 И—НЕ (см. рис. 2.20). Принимая во внимание, что в составе 133, 155 серий максимальная разрядность регистров 4 бита/корпус, счетчика — 4 разряда/корпус, сумматора — 1 разряд/корпус, дешифратора — 4/16 в корпусе, получаем количество корпусов, необходимых для реализации вычислителя фаз АФАР (табл. 2.5).

Считаем, что при монтаже используется бескорпусный полный аналог ИС 133, 155 серий.

Если предположить, что в среднем на типовой МСБ ($24 \times 30 \times 0,5$ мм) может быть размещено 14...16 кристаллов, то для размещения всего вычислителя фаз потребуется около 90 МСБ ($24 \times 30 \times 0,5$ мм). Типовая МСБ имеет массу 1,3 г и установочный объем 1,08 см³. Вычислитель фаз будет иметь массу $m_{\text{вф}} \approx 1,3 \cdot 90 \cdot q_m \approx 117 q_m$ и объем $V_{\text{вф}} \approx 1,08 \cdot 90 \cdot q_v \approx 97,2 q_v$.

Вариант программируемой логики. Согласно методике, изложенной выше, на первом этапе проводится выбор длины разрядной сетки. Поскольку разрядность сумматоров была выбрана выше и мы считаем, что этот вариант должен обеспечивать точность вычислений не хуже, чем вариант жесткой логики, то, следовательно, принимаем длину разрядной сетки равной 8 битам.

Следующим этапом является определение значения производительности микро-ЭВМ (W). Для количественной оценки этого параметра необходимо задаться следующими величинами: скоростью ввода $v_{\text{вв}}$; скоростью вывода $v_{\text{выв}}$ (пусть $v_{\text{вв}} = v_{\text{выв}} = 5 \cdot 10^6$ слов/с); длительностью программы тестового контроля

(пусть $T_k=40$ мкс); коэффициентом ε_3 , учитывающим долю T_k в каждом цикле прогона программы ($\varepsilon_3=0,1$); коэффициентами совмещения ввода и вывода информации с процессом решения задачи (ε_1 и ε_2); считаем $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0$.

Работа вычислителя фаз АФАР представляет собой ввод двух операндов $[(sd/\lambda)\cos\alpha$ и $(sd/\lambda)\cos\beta]$, вычисление значений φ_{ij} (что для АФАР с числом строк и столбцов 20×20 равно 440 сложениям) и вывод значений φ_{ij} к излучателям.

Из описания алгоритма работы вычислителя фаз следует:

— количество входных чисел $N_{вх}=2$;

— количество чисел-результатов $N_{вых}=400$;

— время решения задачи $T_{ср}=400\tau_{срj}$ ($j=1, 2, \dots, l$), где $\tau_{срj}$ — длительность операции сложения для j -й микро-ЭВМ.

Таблица 2.5

Наименование устройства	Разрядность	Разрядность на корпус	Число корпусов
Регистры			
Pr1	8	4	2
Pr2	8	4	2
Pr3	8	4	2
Pr4	8	4	2
Pr5	1700	4	425
Pr6	1700	4	425
Счетчики			
Сч _i	5	4	2
Сч _j	5	4	2
Сумматоры			
Σ1	8	1	8
Σ2	8	1	8
Σ3	8	1	8
Матричный коммутатор			
МК	1700	3	530
Дешифраторы			
Дш _i	20	16	2
Дш _j	20	16	2
Итого			1420 кристаллов

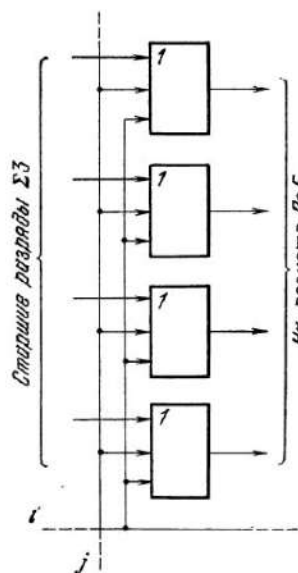


Рис. 2.20. Функциональная схема ij -й ячейки матричного коммутатора

Времена выполнения программы для различных микро-ЭВМ приведены в табл. 2.6.

Шаг вычислений фаз должен быть не больше, чем время цикла вычислений в случае жесткой логики: $T_m \leq T_k = 1,15$ мс. Подставляя исходные значения в формулу (2.26), определяем W для различных микро-ЭВМ *).

При определении объема ПЗУ необходимо сделать ряд допущений:

- коэффициент, учитывающий увеличение программы, $\alpha=1,4$;
- $P^0_0=P^0_2=P^0_3=0$, $P^0_1=1$, так как весь алгоритм в основном состоит из сложений, причем один из операторов находится на внутренних регистрах;
- в случае одноадресной микро-ЭВМ [2.13] можно считать $\beta_1=1$, $\beta_2=2$, $\beta_3=3$;
- информационная длина алгоритма (M_n) состоит из 440 команд сложения и 400 команд вывода информации, т. е. $M_n=840$ команд.

* При определении W было сделано следующее допущение: параметры устройства ввода — вывода, а также T_k и ε_3 для всех микро-ЭВМ постоянны.

Согласно (2.27) получим $L_{пр}=1,4 \cdot 840 \approx 1176$ команд. Полагаем, что стандартные подпрограммы и константы отсутствуют ($L_{сд}=L_k=0$), а длина контролирующего теста $L_t=50$ команд. Тогда общий объем ПЗУ $L_{ПЗУ} = 1226$ команд. Для определения объема ОЗУ необходимо по алгоритму определить величины q_i , $N_{вх}$, $N_{вых}$. Из описания алгоритма следует, что $N_{вх}=2$, $N_{вых}=40$, $q_i \approx 400$. По аналогии с ПЗУ принимаем $\alpha=1,4$, $L_{сд}=0$, тогда общий объем ОЗУ $L_{ОЗУ} \approx 620$ слов.

Объем ОЗУ и ПЗУ (в кбит) с учетом формата команд и длины информационных слов различных микро-ЭВМ приведен в табл. 2.6. Как следует из таблицы, для всех микро-ЭВМ объем собственного ЗУ больше объема ЗУ, необходимого для реализации исходного алгоритма. Поэтому в данном случае нет не-

Таблица 2.6

Номер микро-ЭВМ	Формат команд, байт	Быстродействие в операциях сложения τ , мкс	Объем собственного ЗУ, кбит		Рассеиваемая мощность, Вт	Разрядность информации, бит	Время выполнения программы, мкс	Производительность	Требуемый объем ЗУ, кбит		Число ИС и БИС, шт.
			ОЗУ	ПЗУ					ОЗУ	ПЗУ	
1	1	1,8...2,6	32	32	0,1	12	792	1,31	7,6	1,0	145
2	1	1,8	32	32	0,1	16	792	1,31	10,0	1,0	140
3	1	10,8	4	0	1	4	—	—	—	—	—
4	1	10,8	6	0	1	4	—	—	—	—	—
5	1	20	8	8	1	8	880	0,13	—	—	—
6	1	2...2,5	8	12	1	8	880	1,19	5,0	10	2...16
7	7 бит	0,1	256	256	0,75	2	49,8	8,52	5,0	8,8	25...40
8	7 бит	4,2	16	48	1	8	1850	0,6	—	—	—
9	23 бита	4,2	16	48	1,4	16	1850	0,6	—	—	—
10	1	4	4	0	0,225	4	—	—	—	—	—
11	1	1,8	32	32	1	8,16	792	1,31	5,0	10	35...50

обходимости в определении массы ЗУ. Критерием массогабаритных характеристик микро-ЭВМ для рассматриваемого случая является число ИС и БИС, на которых выполняется микро-ЭВМ. На основании этого из табл. 2.6 выбираем микро-ЭВМ с минимальным числом ИС и БИС (№ 6).

Вся микро-ЭВМ реализуется на 16 корпусах. Предположим, что данная микро-ЭВМ, реализующая программу вычислений фаз АФАР, входит конструктивно в цифровой блок, объединяющий функциональные ячейки, компонентами которых являются микросборки. При оценке количества микросборок варианта жесткой логики вычислителя фаз предполагалось, что на одной типовой микросборке ($24 \times 30 \times 0,5$ мм) размещается 14...16 бескорпусных ИС и СИС. Отсутствие опыта разработок МСБ с бескорпусными БИС МПК не позволяет ответить на вопрос, сколько БИС разместится на типовой подложке. Очевидно, что это число будет определяться рядом параметров: разрешающей способностью нанесения пленочного межсоединения; величиной помех в соседних напыленных проводниках; функциональным назначением узла (процессор, ЗУ и т. д.); разрядностью информационных и адресных магистралей; числом выводов БИС и др.

В данном случае, учитывая, что ИС и СИС серий 133, 155 имеют 16 выводов, а БИС МПК имеют 42...48 выводов, в качестве приближенной оценки можно считать, что на типовой подложке размещаются 4...5 БИС МПК. Тогда микро-ЭВМ в бескорпусном исполнении ориентировочно разместится на четырех подложках $24 \times 30 \times 0,5$ мм. При этом ее масса будет равна $m_{вф}=5,2q_m$, а объем $V_{вф}=4,32q_v$. Эти данные условны и служат иллюстрацией метода.

Сравнивая массогабаритные характеристики вычислителя фаз, реализованного в виде жесткой логики и программируемой логики, можно сделать вывод, что вариант «программируемой» логики позволит получить выигрыш по массе и объему примерно в 20 раз.

2.4. Разработка конструкции и топологии БГИС и МСБ

2.4.1. Разработка схемы соединений

В соответствии с этапами внутреннего проектирования МСБ (§ 1.3) после схемотехнической отработки принципиальной электрической схемы, ее поверочного расчета и с учетом рекомендаций, изложенных в § 2.1, 2.2 и 2.3, приступают к разработке топологии и конструкции МСБ [2.11].

Сущность разработки топологии состоит в определении взаимного расположения пленочных элементов, выборе их формы, расчете геометрических размеров, компоновке навесных компонентов и пленочных элементов и размещении их на подложке в увеличенном масштабе. Разработка топологии проводится в три этапа: разработка схемы соединений на подложке; расчет геометрических размеров пленочных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивностей и т. д.); разработка эскиза топологии.

Основной задачей разработки схемы соединений является выбор такого расположения активных компонентов и пленочных элементов, при котором обеспечивается минимум длины соединительных проводников и числа пересечений между ними. Исходными данными являются принципиальная электрическая схема с перечнем элементов, общие конструктивные требования и конструктивные данные навесных компонентов. Рекомендуется следующий порядок разработки схемы соединений:

- на принципиальной электрической схеме выделяют пленочные элементы и навесные компоненты;

- намечают порядок расположения навесных компонентов и пленочных элементов;

- вычерчивают на ватмане условные изображения пленочных элементов, навесных компонентов и соединительных проводников.

После составления схемы соединений необходимо еще раз рассмотреть возможности уменьшения длины проводников и числа их пересечений за счет перестановок навесных компонентов и пленочных элементов, изменения их ориентации, а также перестановок идентичных выводов у навесных компонентов.

1.2

2.4.2. Расчет геометрических размеров пленочных элементов

Исходными данными для расчета геометрических размеров пассивных элементов МСБ являются перечень элементов принципиальной электрической схемы и технологические требования и ограничения, которые задаются технологическими методами их изготовления. 1.2.1.

Расчет геометрических размеров пленочных резисторов. Пленочные резисторы выполняются на подложках в виде полосок прямоугольной или специальной формы из металла, специальных сплавов (напыленных) или резистивных паст (вожженных). Концы полосок перекрываются контактными площадками, выполненными из металлов или паст с высокой электрической проводимостью.

Основной характеристикой резистора является его электрическое сопротивление $R = \rho l / S$ [Ом], где ρ — удельное объемное сопротивление материала, (Ом·мм²)/м; l — длина резистора, м; S — площадь поперечного сечения, мм². Выражая R через параметры резистивной пленки, получаем $R = \rho_{\text{п}} l / bd$, где $\rho_{\text{п}}$ — удельное сопротивление пленки, (Ом/мм²)/м; b и d — ширина и толщина пленочного резистора, мм. Толщина резистивной пленки выбирается с учетом требуемого значения $\rho_{\text{п}}$, температурной стабильности, условий эксплуатации и технологических методов изготовления. Для каждого резистивного материала можно указать такие пределы изменения толщины, которым соответствуют малые изменения удельного поверхностного сопротивления, и отношение $\rho_{\text{п}}/d = \rho_0$ [Ом/□] (удельное сопротивление пленки, отнесенное к квадрату ее поверхности), используемое при расчете геометрических размеров пленочных резисторов, остается достаточно постоянным и стабильным.

Исходным выражением для расчета резисторов является про-изведение удельного сопротивления пленки ρ_0 на коэффициент формы k

$$R = \rho_0 k, \quad 1.2.1 \quad (2.29)$$

где $k = l/b = R/\rho_0$ показывает, из какого числа квадратов со стороной, равной ширине полоски b , состоит данный резистор, и определяет конфигурацию резистора.

Наиболее часто применяются резисторы в виде прямоугольной полоски, меандра с контактными площадками (составной резистор), регулярного меандра (рис. 2.21). При $1 \leq k \leq 10$ изготавливают резисторы в виде прямоугольной полоски (рис. 2.21, а, г); при $10 < k \leq 50$ — в виде меандра с контактными площадками или регулярного меандра (рис. 2.21, б, в); при $k < 1$ ширина резистора становится больше его длины (рис. 2.21, д), в результате чего возрастает площадь контактных переходов и ширина коммутационных

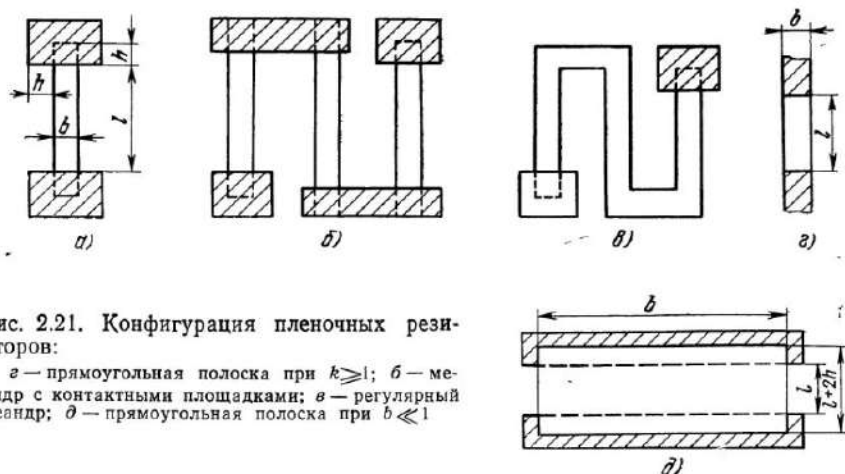


Рис. 2.21. Конфигурация пленочных резисторов:

а, г — прямоугольная полоска при $k \geq 1$; б — меандр с контактными площадками; в — регулярный меандр; д — прямоугольная полоска при $b \ll 1$

проводников; при $k > 50$ площадь, занимаемая резистором, оказывается настолько большой, что рекомендуется использовать навесные дискретные резисторы, совместимые с МСБ.

Чтобы уменьшить влияние неравномерности распределения сопротивления квадрата резистивной пленки, низкоомные резисторы изготавливают в виде замкнутого контура (рис. 2.22), а для рассеивания повышенной мощности применяют резисторы с расщепленной структурой.

Для расчета геометрических размеров резистора необходимы следующие данные: R — номинальное значение сопротивления резистора, Ом; γ_R — относительная погрешность его изготовления, %; ρ_0 — сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/□; $P_{\text{рас}}$ — мощность, рассеиваемая резистором, Вт; P_0 — максимально допустимая удельная мощность рассеивания резистивной пленкой, Вт/см².

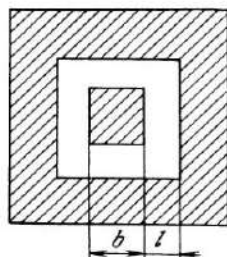


Рис. 2.22. Низкоомный резистор

Материал, из которого изготавливается резистор, должен быть стабильным во времени и иметь удельное сопротивление, позволяющее изготавливать пленочные резисторы (желательно в виде прямоугольной полоски) с номиналами, указанными в перечне эле-

Таблица 2.7

Резистивный материал	Сопротивление квадрата резистивной пленки ρ_0 , Ом/□	ТКС, 10 ⁻⁴ /°C в интервале температур		Допустимая удельная мощность рассеивания резистивной пленки Вт/см ²
		от -60 до +25°	от +25 до +125°	
Нихром ГОСТ 12766—67	300	±1,0	±1,0	1
Сплав МЛТ-3М 6K0.028.005 ТУ	500	±2,0	±2,0	2
Кермет К-50С	3 000	3,0	3,0	2
ЕТО.021.013 ТУ	5 000	-4,0	-4,0	2
	10 000	-5,0	-5,0	2
Сплав РС-3001	1 000	-0,2	-0,2	2
ЕТО.021.019 ТУ	2 000	-0,2	-0,2	2
Сплав РС-3710				
ЕТО.021.034 ТУ	3 000	-3,0	-3,0	2
Тантал ТВ4	100	-2	-2	3
РЭТУ 1244—67				

ментов принципиальной электрической схемы. Справочные данные о материалах, используемых для расчета тонкопленочных резисторов, приведены в табл. 2.7, толстопленочных — в табл. 2.8.

При требуемой точности изготовления резистора $\gamma_R \leq \delta_R$ и известных величинах погрешностей γ_{ρ_0} и γ_{R_K} из выражения (2.30)

Таблица 2.8

Обозначение паст	Сопротивление квадрата резистивной пленки ρ_0 , Ом/□	ТКС, $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ в интервале температур		Максимальная мощность рассеивания, Вт/см ²
		от -60 до $+25^{\circ}$	от $+25$ до $+125^{\circ}$	
ПР-50	50	-2,0	3,0...3,5	3,0
ПР-100	100	1,0...2,0	2,0...3,5	3,0
ПР-500	500	0,0...1,0	2,0...3,0	3,0
ПР-1к	1 000	1,0...1,5	1,0...2,5	3,0
ПР-3к	3 000	1,5...3,0	1,0...2,0	3,0
ПР-6к	6 000	2,0...3,5	0...1,0	3,0
ПР-50к	20 000...50 000	3,5...7,5	-1,0...4,0	3,0

находят допустимую относительную погрешность коэффициента формы

$$\gamma_k \text{ доп} = \sqrt{\gamma_R^2 - \gamma_{\rho_0}^2 - \gamma_{R_K}^2} \quad 1.2.2 \quad (2.30)$$

Геометрические размеры пленочных резисторов определяют, исходя из заданного допуска δ_R на величину его сопротивления. Суммарная относительная погрешность сопротивления γ_R пленочного резистора не должна превышать заданного допуска ($\gamma_R \leq \delta_R$) и определяется по формуле

$$\gamma_R = \sqrt{\gamma_{\rho_0}^2 + \gamma_k^2 + \gamma_{R_K}^2} \quad 1.2.3 \quad (2.31)$$

где $\gamma_{\rho_0} = \Delta\rho_0/\rho_0$ — относительная погрешность сопротивления квадрата резистивной пленки; γ_k — относительная погрешность коэффициента формы;

$$\gamma_k = \gamma_l + \gamma_b; \quad 1.2.4 \quad (2.32)$$

$\gamma_l = \Delta l/l$ — относительная погрешность длины; $\gamma_b = \Delta b/b$ — относительная погрешность ширины; γ_{R_K} — относительная погрешность сопротивления контактного перехода, равная

$$\gamma_{R_K} = 2R_K/R, \quad 1.2.5 \quad (2.33)$$

где R_K — сопротивление контактного перехода. Обычно величина γ_{R_K} составляет 1...3%.

Тонкопленочные резисторы изготавливаются методами катодного или ионно-плазменного распыления резистивного материала, а также осаждением пленок из паровой и газовой фазы. Для изготовления толстопленочных резисторов используется нанесение резистивных паст на керамическую подложку с последующей термообработкой.

Порядок расчета пленочных резисторов. Исходными данными для расчета геометрических размеров резистора являются γ_R , Δl , Δb , R , γ_R , $P_{\text{рас}}$, ρ_0 , γ_{ρ_0} , P_0 .

Расчет резистора прямоугольной формы ($1 \leq k \leq 10$). По известным значениям номинала сопротивления резистора R и сопротивления квадрата резистивной пленки ρ_0 определяют коэффициент формы

$$k = R / \rho_0. \quad 1.2.6 \quad (2.34)$$

Определяют минимальную ширину резистора исходя из требований к его точности:

$$b_{\min \text{ точн}} = (\Delta b + \Delta l / k) / \gamma_{\text{кдоп}}. \quad 1.2.7 \quad (2.35)$$

Рассчитывают минимальную ширину резистора с учетом рассеиваемой на нем мощности:

$$b_{\min P} = \sqrt{P_{\text{рас}} / k P_0}. \quad 1.2.8 \quad (2.36)$$

Находят расчетное значение ширины резистора:

$$b = \max\{b_{\min \text{ точн}}, b_{\min P}, b_{\min \text{ техн}}\}, \quad 1.2.9 \quad (2.37)$$

где $b_{\min \text{ техн}}$ — минимальная ширина резистора, определяемая технологией его изготовления.

Определяют расчетное значение длины резистора:

$$l = kb. \quad 1.2.10 \quad (2.38)$$

Находят площадь резистора:

$$S = b / l. \quad 1.2.11 \quad (2.39)$$

Рассчитывают величину рассеиваемой резистором удельной мощности:

$$P'_0 = P_{\text{рас}} / S \quad 1.2.12 \quad (2.40)$$

и сравнивают ее с заданной; при этом должно выполняться условие $P'_0 \leq P_0$. Если это условие не выполняется, то увеличивают b .

Рассчитывают действительную погрешность коэффициента формы по формуле (2.31).

Определяют суммарную погрешность сопротивления γ_R по формуле (2.30) и сравнивают ее с заданным допуском. Должно выполняться условие $\gamma_R \leq \delta_R$.

Расчет резистора прямоугольной формы ($k < 1$) проводят по той же методике, что и для резистора с $k > 1$, с той лишь разницей, что после определения по формулам (2.34) и (2.30) k и $\gamma_{\text{кдоп}}$ находят по формуле (2.38) длину резистора $l = \max\{l_{\min \text{ точн}}, l_{\min P}, l_{\min \text{ техн}}\}$, где $l_{\min \text{ точн}} = (\Delta l + \Delta b k) / \gamma_{\text{кдоп}}$; $l_{\min P} = \sqrt{P_{\text{рас}} k / P_0}$, а затем его ширину $b = l / k$.

Дальнейший расчет проводится по формулам (2.39), (2.40), (2.32), (2.30) аналогично рассмотренному ранее.

Расчет резистора типа «меандр» ($k > 10$) проводится по формулам (2.34) — (2.38).

После определения b и l , задавшись расстоянием между резистивными полосками a ($a = b$, $a = 2b$), определяют оптимальное число звеньев меандра:

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{a^2 / 4t^2 + l/t} - a / 2t, \text{ где } t = a + b.$$

Далее находят размеры контура резистора B и L , где $B = (l - an)/n$; $L = n(a + b)$, после чего проверяют правильность выбора величины a из условия $[(B - b)/a] \leq 10$. Если это условие не выполняется, то величину a изменяют и вновь вычисляют n_{opt} , B и L . Площадь резистора определится как $S = n(B + a)b$, а затем по формулам (2.40), (2.32), (2.31) рассчитывают P'_0 , γ'_k , γ_R и проверяют выполнение условий $P'_0 \leq P_0$, $\gamma'_k \leq \gamma_{k\text{доп}}$ и $\gamma_R \leq \delta_R$.

Расчет длины пленочных резисторов по формуле $l = kb$ правилен при постоянной плотности тока, равномерной по всему объему резистора. Однако в резисторах сложной формы, например типа «меандр», плотность тока неравномерна и достигает наибольшего значения в местах излома резистивной полоски. Эта неравномерность приводит к сокращению электрической длины пленочного резистора и тем самым уменьшает его сопротивление. Для более точных расчетов вводят поправку в формулу для коэффициента формы: $k = l/b - \xi$. Чтобы найти эту поправку, каждое звено меандра расчленяют на последовательно включенные резисторы простейшей конфигурации: параллелограмм и две прямоугольные трапеции. Определив значения коэффициентов формы этих конфигураций с учетом поправок ($\xi_{\text{пар}}$, $\xi_{\text{тр}}$ [2.12]), находят точное значение коэффициента формы звена меандра. Затем проводят коррекцию размеров резистора, полученных в предварительном расчете.

Расчет сопротивления контактного перехода. В пленочных МСБ встречаются два типа контактных переходов: контактная пара «резистивная пленка — низкоомная пленка» и контактная пара из двух низкоомных пленок. В месте контакта имеется сопротивление контактного перехода R_K . Величина его зависит от формы площади контакта, материалов пары и технологии их изготовления. Расчет этого сопротивления заключается в определении, во-первых, максимально допустимого значения сопротивления контакта $R_{K\text{доп}} = \gamma_{R_K} R/2$, во-вторых, минимального значения пере-

ходного сопротивления $R_{K\text{min}} = \sqrt{\rho_0 \rho_K / b}$, где ρ_K — удельное сопротивление единицы площади взаимно перекрывающейся части контактной пары [$\rho_K = (0,05 \dots 0,25) \cdot 10^{-2}$ Ом·см²], и сравнении их для обеспечения условия $R_{K\text{min}} \leq R_{K\text{доп}}$. При невыполнении этого условия необходимо увеличить ширину резистора и определить его новую длину, так как уменьшение ρ_0 влечет за собой перерасчет размеров резисторов, а уменьшение ρ_K связано с заменой оборудования технологического процесса.

Расчет геометрических размеров пленочных конденсаторов. Пленочные конденсаторы представляют собой многослойные структуры из проводящих и диэлектрической пленок. Конструирование таких конденсаторов состоит в выборе исходных материалов пленок, в расчете площади перекрытия обкладок, в выборе их формы и расположения на подложке. Нижние обкладки конденсаторов должны выступать за края верхних на величину, обеспечивающую перекрытие обкладок в случае ошибок совмещения масок (фото-

шаблонов). Величина перекрытия определяется технологией изготовления конденсаторов. Диэлектрическая пленка должна выступать за края нижних обкладок на величину, при которой можно избежать замыкания обкладок при наличии ошибок совмещения. Форма обкладок выбирается в процессе разработки топологии.

Емкость пленочного конденсатора рассчитывают по формуле

$$C=0,0885\varepsilon S(n-1)/d \text{ [пФ]}, \quad 1.2.13 \quad (2.41)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость пленки; S — рабочая площадь конденсатора, см²; d — толщина диэлектрического слоя, см; n — число обкладок.

Таблица 2.9

Материал для напыления		Удельная емкость C_0 , $\times 10^6$ пФ/см ²	Рабочее напряжение U_p , В	Относительная диэлектрическая проницаемость пленки ε	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность $E_{пр}$, $\times 10^6$ В/см	Рабочая частота f , МГц
диэлектрика	обкладок						
Монокись кремния БК0.028.004ТУ	Алюминий А99 ГОСТ 11069—64	5	60	5...6	0,01...0,02	2...3	500
		10	30	5...6			
Монокись германия* ЕТ0.021.014 ТУ	То же	5	10	11...12	0,005...0,007	1	—
		10	7	11...12		1	—
		15	5	11...12		1	—
Боросиликатное стекло* ЕТ0.035.015 ТУ	.	2,5	24	4	0,001...0,0015	3...4	300
		5	15	4		3...4	300
		10	10	4		3...4	300
Стекло электровакуумное С41* НПО.027.600	.	1,5	12,6	5,2	0,02...0,003	3...4	300
		20	10...12,6	5,2		3...4	300
		30	6,3...10	5,2		3...4	300
		40	6,3	5,2		3...4	300
Пятиокись тантала	Тантал ТВ4 РЭТУ 1244—67	60	15	23	0,02	2	0,1
		100	10	23		2	0,1
		200	3	23		2	0,1

* Материалы, имеющие ограниченное применение.

Расчет пленочных конденсаторов сводится к определению рабочей площади S , под которой понимают площадь перекрытия нижней обкладки конденсатора верхней обкладкой:

$$S=C/C_0, \quad 1.2.14 \quad (2.42)$$

где C — номинальное значение емкости конденсатора, пФ; C_0 — удельная емкость, пФ/см². Величина C_0 определяется выбранным материалом диэлектрика. Электрофизические свойства материалов, используемых для изготовления пленочных конденсаторов, и их характеристики приведены в табл. 2.9.

Расчеты геометрических размеров пленочных конденсаторов проводят исходя из заданного допуска δ_c . Суммарная относительная погрешность емкости конденсатора может быть вычислена

по формуле

$$\gamma_c = \sqrt{\gamma_{c_0}^2 + \gamma_s^2}, \quad 1.2.15 \quad (2.43)$$

где γ_{c_0} — относительная погрешность удельной емкости;

$$\gamma_s = \Delta L/L_2 + \Delta B/B_2 \quad 1.2.16 \quad (2.44)$$

— относительная погрешность рабочей площади конденсатора; L_2 , B_2 — длина и ширина верхней обкладки конденсатора, см; ΔL , ΔB — погрешности линейных размеров обкладок конденсатора, см.

Исходными данными для расчета геометрических размеров конденсатора являются известные C , γ_c , γ_{c_0} , ΔL , ΔB , а также U_p — приложенное рабочее напряжение, которое определяется при поверочном расчете принципиальной электрической схемы, B ; $E_{пр}$ — электрическая прочность диэлектрической пленки, В/см; Δl — погрешность установки и совмещения масок, см; $k_3 = 2 \dots 4$ — коэффициент запаса электрической прочности конденсатора (определяется материалом и условиями работы).

Расчет пленочного конденсатора производят в следующем порядке;

— определяют возможную толщину диэлектрического слоя конденсатора

$$d \geq U_p k_3 / E_{пр}; \quad 1.7 \quad (2.45)$$

— пользуясь формулой (2.43), рассчитывают максимально допустимую погрешность площади конденсатора

$$\gamma_{s\text{ доп}} = \sqrt{\gamma_c^2 - \gamma_{c_0}^2}; \quad 1.8 \quad (2.46)$$

— находят максимальное значение $C_{0\text{max}}$ исходя из электрической прочности диэлектрической пленки

$$C_{0\text{max}} = 0,0885 \varepsilon / d; \quad 1.9 \quad (2.47)$$

— вычисляют максимальное значение удельной емкости с учетом заданной точности изготовления конденсатора

$$C_{0\text{max точн}} = C (\gamma_{s\text{ доп}} / \Delta L)^2 [k_2 / (1 + k_2)^2], \quad 2.0$$

где k_2 — коэффициент формы (отношение сторон L_2/B_2) верхней обкладки конденсатора;

— выбирают $C_0 \leq \min\{C_{0\text{max}}, C_{0\text{max точн}}\}$;

— определяют толщину диэлектрика $d = 0,0885/C_0$ для выбранного C_0 ;

— рассчитывают рабочую площадь конденсатора $S = C/C_0$;

— определяют размеры верхней ($L_2 = \sqrt{k_2 S}$, $B_2 = \sqrt{S/k_2}$) и нижней [$L_1 = L_2 + 2(\Delta L + \Delta l)$, $B_1 = B_2 + 2(\Delta B + \Delta l)$] обкладок конденсатора, а также находят размеры диэлектрического слоя [$L_d = L_1 + 2(\Delta L + \Delta l)$, $B_d = B_1 + 2(\Delta B + \Delta l)$];

— по формуле (2.43) рассчитывают суммарную погрешность конденсатора, предварительно определив γ_s из выражения (2.44);

— проверяют выполнение требуемого условия $\gamma_c \leq \delta_c$.

2.2. Пленочные катушки индуктивности характеризуются номинальной величиной индуктивности, добротностью, собственной емкостью, а также стабильностью при воздействии нагрузки и внешней среды и надежностью. Выполняются они в виде спирали круглой, квадратной или прямоугольной формы. Основным недостаток пленочных катушек — относительно низкая добротность (не более 30 ... 50) и малая удельная индуктивность. Последнее обстоятельство не позволяет в приемлемых размерах изготавливать катушки с индуктивностью более 10 ... 15 мкГн.

Конструктивный расчет пленочных катушек индуктивности состоит в определении числа витков, зазора между витками, ширины проводника и его сопотривления. Взаимосвязь между индуктивностью L (в мкГн), числом витков N и другими параметрами конструкции для катушек соответственно круглой и квадратной форм устанавливается с помощью соотношений (2.13):

$$L = 24,75 D_{\text{ср}} \sqrt[3]{N^3} \lg \frac{4D_{\text{ср}}}{t} 10^{-3},$$

$$L = 55,5 \sqrt[3]{N^3} \lg (8a/t) 10^{-3},$$

где $D_{\text{ср}} = (D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})/2$ — средний диаметр спирали, см; $t = (D_{\text{н}} - D_{\text{вн}})/2$ — радиальная ширина спирали, см; $D_{\text{н}}$, $D_{\text{вн}}$ — соответственно наружный и внутренний диаметры спирали, см; a — длина средней линии спирали, см.

В инженерной практике расчет параметров конструкции пленочных катушек индуктивности, как правило, производится по номограммам и графикам.

3 2.4.3. Разработка эскиза топологии

После определения размеров пленочных элементов вычисляют площадь подложки $S_{\text{п}}$. Ориентировочно

$$S_{\text{п}} = q_s \left(\sum^n S_R + \sum^m S_C + \sum^k S_L + \sum^r S_a + N S_k \right),$$

где $q_s = 1,5 \dots 2,5$ — коэффициент дезинтеграции площади подложки; S_R , S_C , S_L и S_a — площади резистивного, емкостного, индуктивного и активного элементов и компонентов соответственно; N — число контактных площадок; S_k — площадь одной контактной площадки; n , m , k , r — соответственно число резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и активных элементов.

По полученной величине $S_{\text{п}}$ с учетом технологических ограничений выбирают типоразмер подложки из ряда стандартных размеров.

Исходные данные для размещения элементов: схема соединения элементов на подложке, размер подложки, геометрические размеры пленочных элементов, электрические данные и требования, основные технологические данные и ограничения.

Пленочные элементы изображают на миллиметровой бумаге или на другом материале с координатной сеткой в масштабе 10:1 или 20:1. При размещении элементов и компонентов на площади подложки используют последовательный метод, заключающийся в следующем. Схему соединений условно разбивают на несколько групп (обычно по числу активных навесных компонентов). Сначала рисуют все элементы и компоненты, принадлежащие одной группе, затем — элементы и компоненты, принадлежащие следующей, рядом расположенной группе и т. д. Этот метод позволяет более рационально и качественно разработать эскиз топологии.

При разработке эскиза топологии необходимо обеспечивать возможность проверки номинальных значений пленочных элементов, а также учитывать требования к монтажу применяемых дискретных компонентов.

После размещения всех элементов и компонентов необходимо проанализировать разработанную топологию, чтобы придать изображенным на топологическом чертеже элементам и компонентам более простые формы, получать равномерное размещение их на площади подложки.

Вопросы автоматизации размещения и трассировки рассмотрены в гл. 4.

2.4.4. Оценочный расчет паразитных распределенных параметров

В микросборках расстояния между элементами резко уменьшены, а сами элементы размещаются на подложке, проводимость и диэлектрическая проницаемость которой намного больше, чем у воздуха. Это приводит к усилению связей между элементами, в том числе и паразитных. Паразитные связи необходимо учитывать при разработке топологии линейных и логических МСБ.

Паразитными параметрами являются:

- для пленочных проводников — собственная индуктивность и емкость, взаимная индуктивность (взаимоиндукция) и емкость связи с соседними проводниками, а также емкость на пересечениях проводников;

- для резисторов — последовательная индуктивность, шунтирующая емкость, шунтирующее сопротивление и сопротивление контактов;

- для конденсаторов — сопротивление обкладок и диэлектрика;

- для катушек индуктивности — последовательное сопротивление и емкость.

Индуктивность проводника и резистора полностью определяется их конфигурацией, линейными размерами и магнитной проницаемостью среды. Величина индуктивности одиночного проводника (резистора) в виде прямоугольной полоски определяется по формуле

$$L \text{ [мкГн]} = 0,0002l [2,3 \lg(2l/b) + 0,2235b/l + 0,5],$$

где l и b — длина и ширина проводника или резистора, см. Взаимная индуктивность двух параллельных проводников одинаковой длины может быть найдена из соотношения

$$M[\text{мкГн}] = 0,002l[2,31g(2l/a) - 1 - a/l],$$

где a — расстояние между линиями соединений, см. Зная величину индуктивности каждой линии и величину взаимоиндукции, можно определить полную индуктивность этих линий.

Расчет шунтирующей емкости резистора, емкости между пленочными проводниками, а также между проводниками и металлическим корпусом проводится по формуле $C[\text{пФ}] = 0,0885\epsilon' C_{\text{геом}}$, где $\epsilon' = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$; ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость окружающей среды; ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость подложки; $C_{\text{геом}}$ — геометрическая, или относительная, емкость, зависящая от геометрических размеров и расположения проводников и элементов микросхем.

Величина шунтирующего сопротивления резистора и конденсатора определяется сопротивлением утечки через подложку или диэлектрик и зависит от параметров материала и рабочей температуры. Величина последовательного сопротивления резистора зависит от сопротивления контакта между резистивной и проводящей пленками.

Определив паразитные параметры элементов конструируемой МСБ, проводят поверочный расчет электрической принципиальной схемы и при необходимости корректируют топологию.

1.5 2.4.5. Методы защиты МСБ от внешних воздействий

Для предохранения микросборок от внешних воздействий применяют специальную защиту (бескорпусную и корпусированную). Бескорпусную защиту применяют при кратковременном пребывании МСБ в условиях производственной атмосферы. Для этого на критичные пленочные элементы термическим испарением в вакууме наносят диэлектрическую пленку. При транспортировке бескорпусных МСБ используют технологическую тару. Корпусирование МСБ применяют при длительной эксплуатации их в условиях повышенной влажности и механических нагрузок.

При выборе или разработке корпуса следует учитывать: степень герметичности; сопротивление изоляции; экранирование от электромагнитных и электростатических полей; возможное тепловое воздействие на элементы МСБ в процессе монтажа и герметизации; метод крепления МСБ на печатной плате; теплоотводящую способность.

Конструкция корпуса должна обеспечивать возможность механизации сборочных процессов. Герметизация корпуса в зависимости от используемых материалов его крышки и основания может быть выполнена: контактной, электронно-лучевой, аргоно-дуговой или лазерной сваркой, пайкой мягкими или твердыми припоями, склеиванием поверхностей.

Для монтажа навесных элементов при сборке МСБ применяют клеи марок Д-9, ВК-2 и ВК-9. Для монтажа активных навесных элементов повышенной мощности рекомендуется применять клей марки ВК-9, обладающий повышенной теплопроводностью.

Для повышения надежности МСБ при механических нагрузках и исключения электрических замыканий рекомендуется крепление проволочных выводов производить клеем на основе эпоксидных смол ЭД-20 и ЭД-16. Толщина клеевого слоя 50 ... 100 мкм. Для приклеивания подложки к основанию корпуса применяют клеи марок ВК-9, МПФ-1 и КВК.

2.4.6. Оценочный расчет и обеспечение тепловых режимов микросборок

Элементы МСБ, размещаемые на подложке, как правило, представляют собой маломощные источники тепловой энергии. Эта особенность и планарность конструкций, несомненно, способствуют облегчению тепловых режимов МСБ и в целом МЭА. Вместе с тем, как показано в § 1.1 и 1.2, необходимым условием улучшения качества МЭА является повышение степени интеграции элементной базы и конструктивно-технологических единиц. Поэтому естественное стремление разработчиков МСБ к увеличению числа элементов на подложке одновременно ведет к значительному возрастанию мощности, потребляемой от источников питания, и, следовательно, плотности тепловых потоков.

Плотность теплового потока (тепловой поток через единицу площади поверхности теплообмена) служит мерой тепловой нагрузки конструкций. Принято считать, что плотности потоков до $0,05 \text{ Вт/см}^2$ характеризуют малую тепловую нагрузку, свыше $0,05 \text{ Вт/см}^2$ — большую.

Представление о реальных тепловых нагрузках микросборок дает табл. 2.10, в которой приведены характеристики конструкций бескорпусных МСБ, выполненных с применением тонкопленочной технологии, и биполярных активных компонентов. Как видно из таблицы, повышенные тепловые нагрузки характерны для МСБ

Таблица 2.10

Функциональное назначение МСБ	Типоразмер подложки, мм	Число навесных активных компонентов	Число пассивных элементов	Потребляемая мощность, Вт	Плотность теплового потока, Вт/см^2
Смеситель	16×20	1	10	0,12	0,037
УПЧ	16×20	3	9	0,24	0,075
Четырехканальный УПТ	24×30	4	36	0,6	0,083
Дешифратор	24×30	11	—	0,6	0,083
Регистр 2×8 разрядов	24×30	5	—	0,8	0,111
Управляемый делитель частоты	30×48	19	—	2,0	0,138

как аналогового, так и цифрового типа. Поэтому при проектировании МСБ вопросам оценки и обеспечения нормальных тепловых режимов необходимо уделять серьезное внимание.

При анализе процессов теплопередачи конструкции МСБ независимо от технологии их изготовления могут быть представлены двумя моделями, которые приведены на рис. 2.23. Первая модель (рис. 2.23,а) соответствует корпусированным МСБ. Корпус наряду с функциями защиты МСБ от внешних воздействий выполняет роль теплообменника между конструкцией и средой. Тепло, выделяемое элементами МСБ, передается к корпусу с большой поверхности преимущественно кондукцией через слой компаунда. Влиянием на тепловой режим МСБ теплопередачи через газовую прослойку между подложкой и корпусом и через проволоочные перемычки, соединяющие контактные площадки с выводами корпуса, в большинстве случаев можно пренебречь, поскольку их тепловые проводимости примерно на два порядка меньше тепловой проводимости компаунда. Расчет показывает, что через газовую прослойку на корпус МСБ стекает лишь 0,05% выделенного на подложке тепла.

Вторая модель (рис. 2.23,б) обобщает конструкции бескорпусных МСБ. Ввиду того, что в конструкциях МЭА бескорпусные МСБ, как правило, устанавливаются на металлические планки рамок функциональных ячеек или на металлические основания, в модель введена теплоотводящая шина. Соотношения тепловых проводимостей в цепях передачи тепла от подложки корпусированной МСБ справедливы и для бескорпусных МСБ. Поэтому можно считать, что основная часть тепла с подложки через слой компаунда стекает на теплоотводящую шину и рассеивается в окружающей среде.

Аналогия процессов теплопередачи в корпусированных и бескорпусных МСБ позволяет при оценке тепловых режимов элементов воспользоваться единой тепловой моделью, которая приведена на рис. 2.24. Тепловая модель МСБ представляет собой двуслойный прямоугольный параллелепипед с размерами L_x , L_y и $L_z = h_n + h_k$, где h_n — толщина подложки МСБ; h_k — толщина слоя компаунда или клея. Источники тепла произвольно размещаются на верхней большой стороне параллелепипеда.

При составлении тепловой модели МСБ дополнительно к оговоренным принимаются следующие допущения:

— корпус (теплоотводящая шина) МСБ считается изотермической поверхностью с температурой t_k ;

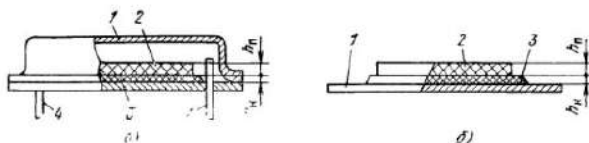


Рис. 2.23. Модели конструкций корпусированной (а) и бескорпусной (б) МСБ: 1 — корпус (теплоотводящая шина); 2 — подложка; 3 — компаунд; 4 — выводы

— пленочные тепловыделяющие элементы заменяются плоскими источниками тепла;

— навесные тепловыделяющие элементы представляются плоскими источниками тепла с той же мощностью рассеивания и конечной величиной внутренней тепловой проводимости (сопротивления) между критической зоной элемента (p - n -переходом) и поверхностью подложки.

Упрощенная тепловая схема, отражающая процесс теплообмена между тепловыделяющими элементами МСБ и окружающей средой, дана на рис. 2.25. Тепловые сопротивления в цепях передачи тепла от навесных тепловыделяющих элементов к корпусу складываются из внутреннего теплового сопротивления элемента R_t , тепловых сопротивлений подложки R_n и слоя компаунда R_k . Внутреннее тепловое сопротивление R_t навесного компонента определяется теплофизическими характеристиками материалов, конструкцией, способом установки и крепления на подложке.

Цепь передачи тепла между каждым из тепловыделяющих пленочных элементов и корпусом состоит из теплового сопротивления подложки и компаунда (клея). Для любого тепловыделяющего элемента МСБ $R_{ni} = h_n / \lambda_n S_i$, $R_{ki} = h_k / \lambda_k S_i$, где λ_n , λ_k — коэффициенты теплопроводности материалов подложки и компаунда; S_i — площадь i -го тепловыделяющего элемента, вычисляемая через его геометрические размеры l_{xi} и l_{yi} .

Теплопередача от корпуса (теплоотводящей шины) МСБ к окружающей среде характеризуется тепловым сопротивлением R_{kc} . Если оценка теплового режима МСБ производится вне конструкции МЭА, то теплообмен между корпусом МСБ и средой осуществляется за счет конвекции и излучения. При этом $R_{kc} = 1 / (\alpha_k S_k + \alpha_l S_k)$, где α_k , α_l — коэффициенты конвективной и лучевой теплопередачи; S_k — площадь поверхности корпуса (теплоотводящей шины).

Для микросборки в составе МЭА величина R_{kc} складывается из эквивалентного теплового сопротивления между корпусами МСБ и МЭА и теплового сопротивления между корпусом МЭА и окружающей средой.

При произвольном размещении элементов на подложке МСБ возможно взаимодействие тепловых полей пленочных элементов и

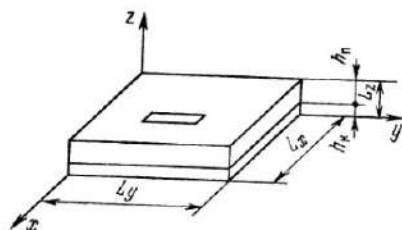


Рис. 2.24. Тепловая модель МСБ

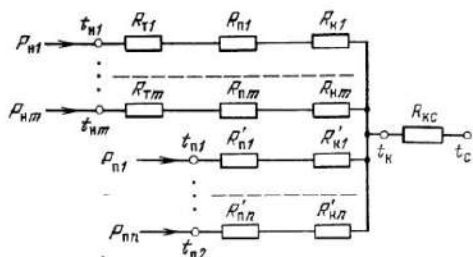


Рис. 2.25. Упрощенная тепловая схема МСБ

навесных тепловыделяющих компонентов. Это условие требует ограничения удельной мощности рассеивания пленочных резисторов P_0 до величины P'_0 , при которой обеспечивается нормальный тепловой режим навесных компонентов. Значение P'_0 определяется выражением

$$P'_0 = [t_{\text{н доп}} - (t_{\text{к}} + \vartheta_{\text{н max}})] / \alpha_{\text{т}}, \quad (2.48)$$

где $t_{\text{н доп}}$ — минимально допустимая температура навесных компонентов;

$$\vartheta_{\text{н max}} = P_{\text{н max}} (R_{\text{т}} + \alpha_{\text{т}} / S) \quad (2.49)$$

— перегрев относительно корпуса наиболее теплонагруженного навесного компонента; $P_{\text{н max}}$ — мощность рассеивания наиболее теплонагруженного навесного компонента;

$$\alpha_{\text{т}} = h_{\text{п}} / \lambda_{\text{п}} + h_{\text{к}} / \lambda_{\text{к}} \quad (2.50)$$

— коэффициент кондуктивной теплопередачи через подложку и слой компаунда.

При выполнении неравенства $P_0 \leq P'_0$ температуры пленочных и навесных тепловыделяющих элементов не превысят следующих значений:

$$t_{\text{н max}} = t_{\text{к}} + \alpha_{\text{т}} (P_0 + P_{\text{н max}} / S), \quad (2.51)$$

$$t_{\text{к max}} = t_{\text{к}} + \alpha_{\text{т}} P_0 + \vartheta_{\text{н max}}. \quad (2.52)$$

Приведенные соотношения используются при оценочном расчете теплового режима МСБ.

Расчет теплового режима МСБ производится в следующем порядке:

— по формуле (2.50) вычисляется коэффициент кондуктивной теплопередачи $\alpha_{\text{т}}$;

— с помощью формулы (2.49) находят перегрев относительно корпуса наиболее теплонагруженного навесного компонента;

— по формуле (2.48) определяют максимально допустимое значение удельной мощности рассеивания пленочных резисторов P'_0 ; если $P_0 \leq P'_0$, то по формулам (2.51) и (2.52) находят максимально возможные значения температур пленочных элементов и навесных компонентов.

Если $P_0 > P'_0$, нормальный тепловой режим элементов обеспечивается применением специальных конструктивных методов. К числу таких методов относятся:

— ослабление взаимного влияния тепловых полей элементов и компонентов МСБ;

— использование в конструкции материалов с более высокими коэффициентами теплопроводности;

— применение специальных методов монтажа компонентов МСБ и подложки в корпусе;

— применение систем принудительного охлаждения МСБ.

Влияние тепловыделяющих элементов МСБ на навесные компоненты проявляется лишь до некоторого расстояния между ними, определяемого соотношением тепловых сопротивлений элемент — корпус (теплоотводящая шина) и элемент — навесной компонент. Поэтому для ослабления влияния тепловых полей элементов МСБ на компоненты вокруг последних предусматривается зона защиты, свободная от источников тепла. Конструкции зон защиты и способы расположения компонентов на подложке представлены на рис. 2.26.

Ширина зоны защиты зависит от геометрических размеров поверхности подложки, занятой навесными компонентами, приведенной толщины подложки и максимально допустимой удельной мощности рассеивания пленочных резисторов. Определение ширины зон защиты при двусторонней защите и защите по периметру производится соответственно с помощью графиков рис. 2.27, а и б.

Параметры a и β_T , обозначенные на графиках, вычисляются по соотношениям $a = l/h$, $\beta_T = P'_0/P_0$, где l — меньший размер зоны, занимаемой навесными компонентами; $h = h_n + h_k \lambda_n / \lambda_k$ — приведенная толщина подложки. Через параметры a и β_T по графикам находят значение коэффициента δ , с помощью которого определяют ширину зоны защиты $l_z = \delta h$.

Облегчению тепловых режимов элементов и компонентов МСБ способствует уменьшение тепловых сопротивлений в цепях передачи тепла, что может быть достигнуто использованием материалов с высокими коэффициентами теплопроводности и применением специальных методов монтажа навесных компонентов. Так, например, при одинаковых геометрических размерах тепловое сопротив-

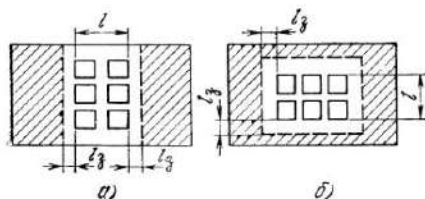
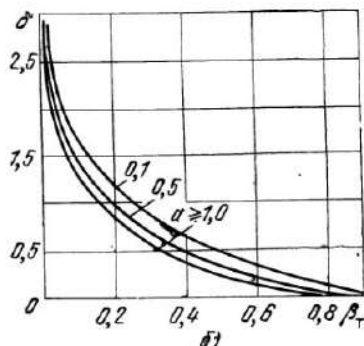
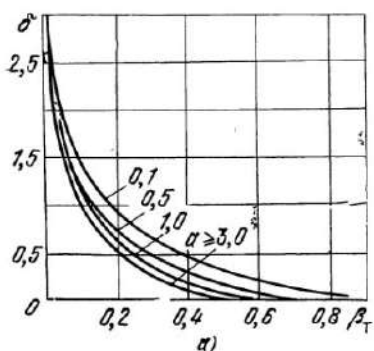


Рис. 2.26. Конструкции зон защиты:
а — двусторонняя, б — защита по периметру

Рис. 2.27. Графики для определения ширины зон защиты:

а — при двусторонней защите; б — при защите по периметру



ление подложки из поликора ($\lambda=30$ Вт/м $\cdot$ °С) более чем на порядок, а подложки из брокерита-9 ($\lambda=160$ Вт/м $\cdot$ °С) на два порядка меньше теплового сопротивления подложки из ситалла ($\lambda=1,5$ Вт/м $\cdot$ °С).

Компаунды и клеи на основе эпоксидных смол, с помощью которых навесные компоненты крепятся к подложке МСБ, а также подложка к корпусу (теплоотводящей шине) имеют низкий коэффициент теплопроводности (0,25 ... 0,4 Вт/м $\cdot$ °С). Для повышения теплопроводности в компаунды и клеи вводят наполнители. Использование в качестве наполнителей пылевидного кварца или кремния увеличивает коэффициент теплопроводности компаундов соответственно до 0,5 ... 0,8 Вт/м $\cdot$ °С и 1,9 ... 2,4 Вт/м $\cdot$ °С.

Снижению теплового сопротивления между элементами МСБ и корпусом или теплоотводящей шиной способствует исключение отдельных участков тепловой цепи. Это решение использовано в конструкции силовой интегральной схемы, приведенной на рис. 2.28. В целях облегчения теплового режима мощные бескорпусные транзисторы 3 размещаются не на подложке толсто пленочной микросборки 2, а непосредственно на металлическом основании корпуса 1. В результате тепловое сопротивление в цепи передачи тепла между кристаллом транзистора и корпусом уменьшено на величину теплового сопротивления подложки и слоя компаунда.

Перспективным направлением обеспечения нормальных тепловых режимов МСБ является использование термоэлектрического охлаждения. Термоэлектрические микрохолодильники способны не только отбирать выделяемое элементами МСБ тепло, но и выполнять термостатирование с точностью 0,1 ... 0,001°С. Разработанные в настоящее время микрохолодильники рассчитаны на площади охлаждаемых объектов в пределах 2 ... 31 мм² и имеют массу 0,01 ... 62 г, объем 2 ... 760 мм³. Потребление от источни-

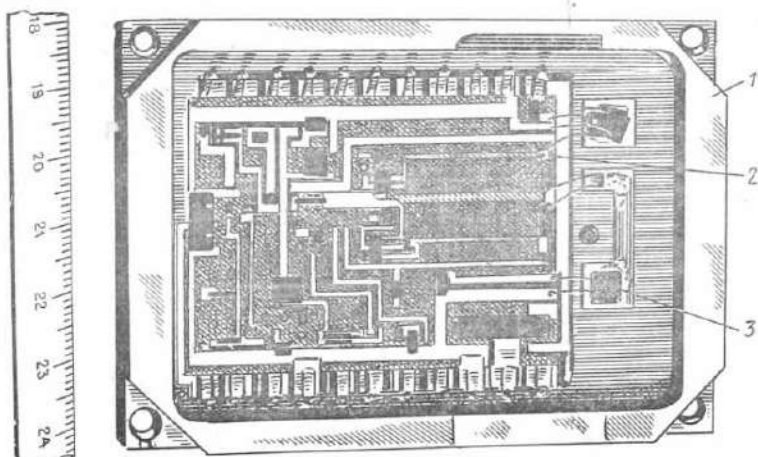


Рис. 2.28. Конструкция силовой ИС

ков питания в рабочем режиме для различных типов микрохолодильников составляет 0,15 ... 8 Вт. Положительной особенностью термоэлектрических микрохолодильников является относительно малая постоянная времени (2 ... 5 с).

Таким образом, конструктивные параметры микрохолодильников допускают их применение как для охлаждения отдельных компонентов, так и МСБ в целом.

Список литературы

- 2.1. Алексенко А. Г., Зуев Б. И. Макромоделирование интегральных схем операционных усилителей: Обзор. — Зарубежная радиоэлектроника, 1977, № 8, с. 10—16.
- 2.2. Груздев А. В. и др. Обеспечение устойчивости микроэлектронных усилительных трактов промежуточной частоты. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудование. 1977, вып. 2, с. 18—25.
- 2.3. Проектирование радиоприемных устройств: Учебное пособие для вузов/ Под ред. А. П. Сиверса. — М.: Сов. радио, 1976. — 486 с.
- 2.4. Функциональные устройства на интегральных микросхемах дифференциального усилителя/ Под ред. В. З. Найдера. — М.: Сов. радио, 1977. — 240 с.
- 2.5. Алексенко А. Г. Основы микросхемотехники: элементы морфологии микроэлектронной аппаратуры. Изд. 2-е перераб. и доп. — М.: Сов. радио, 1977. — 405 с.
- 2.6. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/ А. Г. Алексенко, С. С. Бадулин, Л. Г. Барулин и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977 — 352 с, гл. 3, 4.
- 2.7. Преснухин Л. Н., Шахнов В. А., Кустов В. А. Основы проектирования микроэлектронных вычислительных машин. — М.: Высшая школа, 1976. — 408 с.
- 2.8. Букреев И. Н., Мансуров Б. М., Горячев В. И. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. — М.: Сов. радио, 1975. — 368 с.
- 2.9. Ферхоштадт Петер В. И. Оценка технологии микропроцессорных БИС. — ТИИЭР, 1976, т. 64, № 6, с. 11.
- 2.10. Высоцкий Б. Ф., Войнич Б. А. Элементы инженерного расчета микроэлектронных радиолокационных устройств. Ч. 1. — М.: МАИ, 1971. — 125 с.
- 2.11. Конструирование аperiodических пленочных усилителей/ В. И. Дьячков, В. Ф. Зубков, П. В. Коробейников и др.; Под ред. П. В. Коробейникова. — М.: Сов. радио, 1972. — 114 с.
- 2.12. ЭВМ: Справочник по конструированию/ С. А. Майоров, С. А. Крутовских, А. А. Смирнов; Под ред. С. А. Майорова. — М.: Сов. радио, 1975. — 504 с.
- 2.13. Микропроцессорные БИС и микро-ЭВМ: построение и применение/ Под ред. А. А. Васенкова. — М.: Сов. радио, 1980. — 280 с.

3. КОНСТРУИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА БГИС И МИКРОСБОРКАХ

Применение БГИС и микросборок в конструкциях МЭА отражает качественно новый этап развития конструирования радиоэлектронных устройств. Эта тенденция, обусловленная появлением ИС повышенной степени интеграции (БИС), дальнейшим развитием техники монтажа и компоновки, может иметь в зависимости от назначения МЭА несколько направлений.

3.1. Основные направления конструирования микроэлектронной аппаратуры на БГИС и микросборках

3.1.1. Конструктивная иерархия МЭА

Выбор того или иного направления конструирования базируется на системном подходе (см. § 1.1), т. е. в зависимости от требований к информационным и материальным параметрам системы выбираются ранги (уровни) низшего порядка, обеспечивающие синтез (оптимизацию) заданной системы. Применительно к конструкции МЭА на БГИС и МСБ такими уровнями S_i (уровнями компоновки), начиная с низшего, являются ИС или БИС, плата, функциональные компоненты и микрокомпоненты (S_1); БГИС и микросборки (S_2); функциональные ячейки (ФЯ) и моноблоки МЭА (S_3).

На рис. 3.1 показаны эти уровни, их варианты и связи между ними, отображающие возможные способы формообразования конструкции МЭА на БГИС и МСБ (в дальнейшем для краткости — на МСБ).

Основой элементной базы МЭА являются бескорпусные ИС, а также транзисторы, диоды, конденсаторы и другие бескорпусные компоненты, которые на рисунке не показаны. Бескорпусные ИС и БИС в частных случаях могут помещаться в специальные миниатюрные корпуса или в кристаллодержатели (связь-1), предназначенные для монтажа на крупноформатных подложках, либо укрепляться на лентах-носителях (связь-2) [3. 1]. ИС на ленте-носителе также может корпусироваться (связь-3). На втором уровне компоновки (S_2) бескорпусные ИС с совместимыми с ними микрокомпонентами и функциональными компонентами устанавливаются на подложках с тонко- или толстопленочными элементами, проводниками и контактными площадками, а также на полиимид-

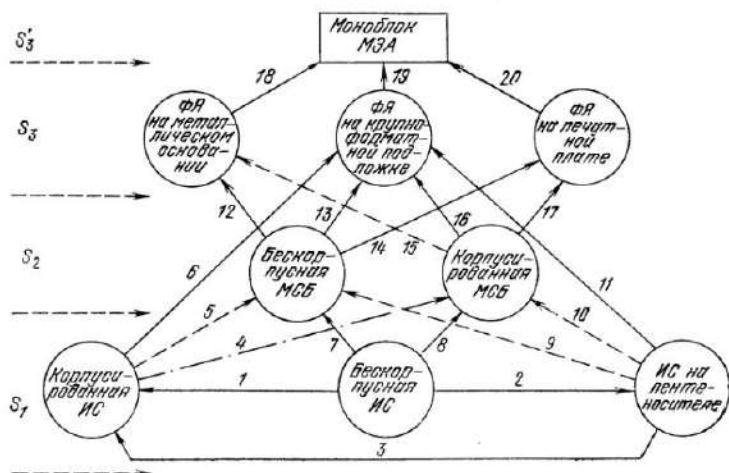


Рис. 3.1. Конструктивная иерархия и варианты формообразования конструкций МЭА

ные пленки, образуя бескорпусные МСБ (связь 7) или в случае корпусирования последних — корпусированные МСБ (связь 8). Применение корпусированных ИС и ИС в кристаллодержателях в корпусированных МСБ (связь 4) нерационально из-за значительных потерь в объеме и массе, а применение их в бескорпусных МСБ (связь 5) менее эффективно, чем непосредственная установка на крупноформатной подложке (связь 6). В последнем случае устраняется дополнительная коммутация между МСБ, что позволяет получать выигрыши в площади, объеме и массе. Аналогично можно объяснить меньшую эффективность связей 9 и 10 по сравнению со связью 11 (компоновкой ИС на лентах-носителях непосредственно на крупноформатных подложках).

Следующий уровень компоновки (S_3) в настоящее время имеет три разновидности: ФЯ на металлическом основании (рамке или пластине), ФЯ на крупноформатной многослойной подложке («гигантская микросборка») [3. 11] и ФЯ на печатной плате. Компоновка бескорпусных МСБ может осуществляться для всех трех вариантов (связи 12, 13, 14), а компоновка корпусированных МСБ чаще всего проводится на печатных платах (связь 17), в редких случаях — на крупноформатных подложках (связь 16). Компоновка корпусированных МСБ на металлическом основании (связь 15) практически нерациональна, если применять обычные корпуса, имеющие штыревые или планарные жесткие выводы. Однако если набор бескорпусных МСБ поместить в корпус со специальными выводами и компоновать эти более сложные корпусированные наборы МСБ в крупноформатных рамках, то такой вариант может оказаться приемлемым. Наиболее перспективной является компоновка ИС в кристаллодержателях на крупноформатных стальных эмалированных подложках или алюминиевых подложках с полиимидной пленкой (связь 6).

Компоновка ФЯ в блок (связи 18, 19, 20) образует следующий уровень (S'_3) и зависит от выбранной компоновочной схемы блока (разъемная, плоскостная, кассетная или книжная).

На рисунке сплошными линиями отражены наиболее часто применяемые в разработках или перспективные связи, штриховыми — редко применяемые, но возможные, и штрихпунктирной линией — нерациональные.

Таким образом, из схемы рис. 3.1, построенной на основе системного подхода к выбору конструктивного варианта, можно выделить следующие основные направления конструирования МЭА на МСБ: из бескорпусных МСБ на металлическом основании; из бескорпусных МСБ на крупноформатных подложках; из бескорпусных МСБ на печатных платах; из корпусированных МСБ на печатных платах; из ИС в кристаллодержателях и из корпусированных БИС на крупноформатных подложках; из ИС на лентах-носителях на крупноформатных подложках.

Для того чтобы при разработке конкретного вида МЭА провести рациональный выбор направления конструирования,

необходимо сравнить по комплексному показателю качества К (см. § 1.1) различные варианты компоновок и выбрать из них наиболее приемлемый. Расчет комплексного показателя качества должен проводиться на базе критериев сравнения основных материальных показателей.

Основываясь на отмеченных выше основных направлениях конструирования МЭА на БГИС и МСБ, рассмотрим характерные для них примеры конструкций, дадим оценку выигрышей в материальных параметрах и отметим возможные области применения этих методов. Рассмотрение проведем по усложнению уровней компоновки, отмеченных на рис. 3.1.

3.1.2. Компоновочные схемы БГИС и микросборок

Представление о конструкциях бескорпусной и корпусированной ИС достаточно известно, поэтому на уровне S_1 остановимся лишь на рассмотрении ИС на ленте-носителе [3.1], корпусированной БИС и ИС в кристаллодержателе [3.11].

ИС на ленте-носителе* (рис. 3.2) представляет собой разновидность бескорпусной ИС с шариковыми выводами, укрепленной методом термокомпрессии на фольгированной полиимидной пленке с печатными проводниками, ширина и расстояние между которыми составляет 75 мкм. Высокая разрешающая способность печатного рисунка обеспечивается аддитивным фотографическим способом (метод Photoforming). По краям и в центре с определенным шагом лента перфорирована и напоминает обычную киноленту с кадрами. Размер «кадра», в котором находится одна ИС, зависит от ширины ленты (11 ... 35 мм и более). Установка ИС на ленту проводится в «окно» кадра размером 5 ... 6 мм. Концы «паукообразных» проводников входят в окно в виде консольных выводов, которые привариваются к шариковым выводам ИС. В средней зоне кадра используются сами контактные площадки для последующей их приварки к контактным площадкам подложки или выводам корпуса. Размер средней зоны составляет 9 ... 12 мм. Приварка ИС на

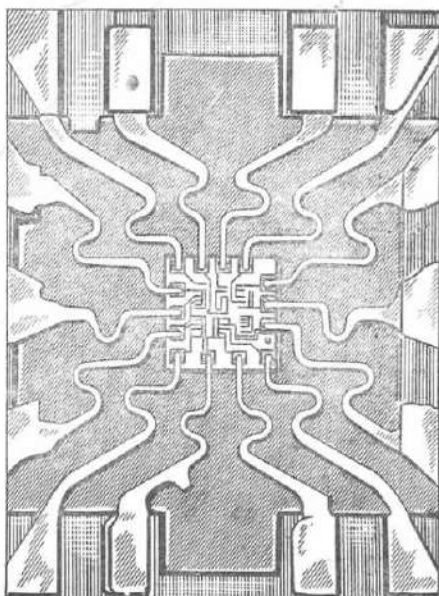


Рис. 3.2. ИС на ленте-носителе

*) По данным зарубежных фирм-изготовителей.

ленте-носителе осуществляется с помощью станков-автоматов. Производительность такого оборудования составляет 2000 ... 4000 ИС/ч, в то время как при автоматизированной приварке проволоочных выводов — 600 ИС/ч, а при ручных способах всего 60 ИС/ч. При автоматизированной приварке лента сматывается и после приварки ИС наматывается в рулон. Во внешней зоне кадра имеются крупные контактные площадки, которые служат для входного контроля перед установкой ИС на ленте-носителе в корпус либо на крупноформатную площадку. После проверки их на соответствие ТУ из кадра вырезается средняя зона ленты с ИС, которая и является рабочей площадью ИС на ленте-носителе. Установка ИС в корпусе также проводится автоматически.

Главным достоинством таких ИС является высокоавтоматизированный процесс производства, что значительно снижает их стоимость. ИС на лентах-носителях могут поставляться потребителю как в корпусах, так и непосредственно в рулонах без дополнительной тары. Кроме того, у них лучший теплоотвод от кристалла, так как консольные выводы печатных проводников имеют большее сечение 75×35 мкм (35 мкм — толщина фольги), чем проволоочные выводы (30 мкм в диаметре). Однако ИС на ленте-носителе имеют установочную площадь на подложке либо равную площади ИС с проволоочными выводами, либо в 1,5 ... 2 раза превышающую ее, т. е. плотность упаковки по площади (ИС/см²) у ИС на ленте-носителе при их компоновке на подложках не выше, чем у бескорпусных ИС с проволоочными выводами.

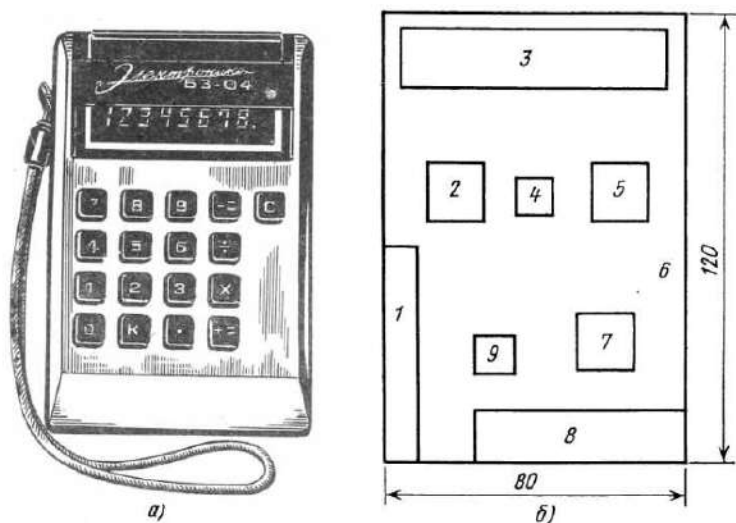


Рис. 3.3. Микрокалькулятор «Электроника БЗ-04»:

а — внешний вид; б — компоновочная схема;
1 — преобразователь напряжения; 2 — БИС управления сегментами индикатора; 3 — индикатор на жидких кристаллах; 4 — ИС управления анодами; 5 — БИС — набор управляющих схем; 6 — трассировочная подложка; 7 — БИС процессор; 8 — элемент питания типа 316; 9 — БИС — ЗУ

Примером корпусированных БИС могут служить БИС серии ~~К145~~, применяемые в конструкции отечественного микрокалькулятора «Электроника БЗ-04» (рис. 3.3). Компоновка их совместно с индикатором на жидких кристаллах на общей стеклянной двухслойной трассировочной подложке образует ФЯ. Размер подложки 60×85 мм. На подложке установлены следующие БИС: управления сегментами индикатора, набор управляющих схем, процессор, запоминающее устройство, а также ИС управления анодами, преобразователь напряжения и индикатор на жидких кристаллах. БИС-процессор имеет кристалл размером $5,2 \times 5,2 \times 0,3$ мм, содержащий 3400 эквивалентных транзисторов. Размеры каждого из корпусов трех БИС равны $12 \times 12 \times 2$ мм, а одной БИС и одной ИС — по $10 \times 10 \times 2$ мм. Размер контактных площадок для кнопочного управления 5×5 мм, а размер самих кнопок 9×9 мм. Поэтому удельные показатели данной конструкции по сравнению с другими ФЯ будут гораздо ниже, так как плотность упаковки в этом случае определяется не требованиями минимальных площадей, объема и массы, а требованиями эргономики (минимальным размером кнопок и зазоров между ними). Габаритные размеры корпуса калькулятора $120 \times 80 \times 20$ мм, а масса 200 г.

ИС в кристаллодержателе является разновидностью корпусированной ИС, оформленной в специальном миниатюрном безвыводном корпусе типа «кроватка». В квадратном керамическом корпусе имеется углубление, в котором укрепляется бескорпусная ИС. Металлизированные контактные площадки собранного в держателе кристалла соединены внутри корпуса с золочеными контактными площадками самого держателя, выведенными на боковую и нижнюю поверхности держателя по всем четырем сторонам с определенным шагом. С таким же шагом на подложках МСБ образована квадратная сетка контактных площадок. Соединение контактных площадок кристаллодержателя с контактными площадками подложки проводится пайкой дозированного припоя. Подобная конструкция позволяет проще осуществить контроль и тренировку ИС в кристаллодержателях, нежели ИС с проволоочными выводами, и тем самым обеспечить более высокий процент годных ИС. Кроме этого, кристаллодержатель защищает бескорпусные ИС от механических повреждений и позволяет применять автоматизированные методы сборки.

На следующем уровне компоновки (S_2) примерами бескорпусных и корпусированных МСБ могут служить конструкции, показанные на рис. 3.4—3.7. Бескорпусная МСБ (рис. 3.4) представляет собой набор бескорпусных ИС, транзисторов, диодов, диодных матриц и микрокомпонентов, устанавливаемых на ситалловую или поликоровую подложку либо на полиимидную пленку, либо на толстопленочную керамическую подложку, на которых имеются пленочные проводники и могут быть пленочные элементы (для цифровых МСБ они, как правило, отсутствуют).

Корпусированная МСБ (рис. 3.5) выполнена на ситалловой подложке 24×36 мм по тонкопленочной технологии с применением

бескорпусных компонентов и помещена в металлостеклянный корпус типа 1 со штыревыми выводами (на рисунке крышка корпуса не показана). Шаг между выводами равен 2,5 мм. Корпус может быть также специально спроектирован для другого, более крупного размера подложки.

Корпусированная МСБ (рис. 3.6) может быть выполнена также на основе толстопленочных плат, которые имеют, как правило, многослойные подложки с установленными на них бескорпусными ИС. Сборка двух плат (верхней и нижней) с помощью керамической рамки (обечайки) образует одну корпусированную МСБ. Электрическое соединение между платами производится подгибкой и опайкой выводов, расположенных по коротким сторонам плат. К контактным площадкам широких сторон плат припаивают внешние выводы, которые чередуются между собой с верхней и нижней частей МСБ, при этом верхние выводы специально изгибают. Корпусированная МСБ имеет размеры корпуса $36,5 \times 24,5 \times 5$ мм, а размер установочной площадки равен $36,5 \times 36,5$ мм. Шаг между выводами равен 1,25 мм.

На рис. 3.7 показана третья разновидность корпусированной

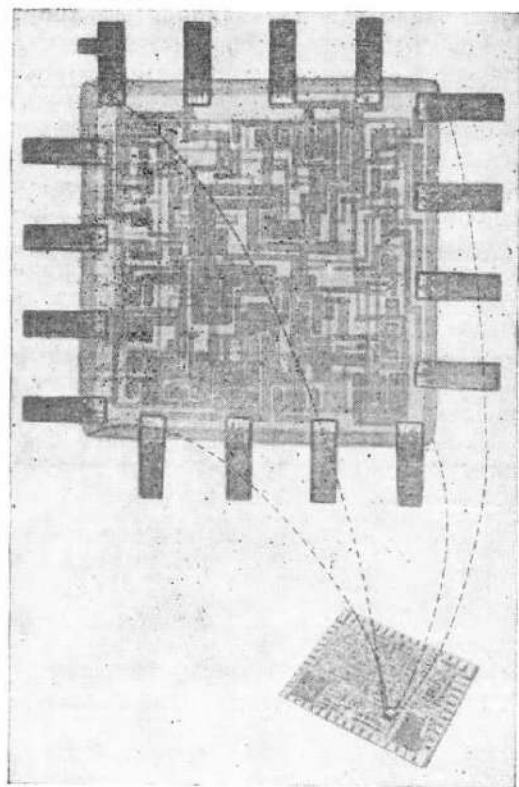


Рис. 3.4. Бескорпусная МСБ (на рисунке показана установка на нее отдельной бескорпусной ИС)

МСБ силового типа. Особенностью ее является то, что оконечные каскады УНЧ рассеивают 20 Вт, поэтому она выполнена на металлическом основании — теплоотводе. Толстопленочная однослойная плата, выполненная с планарными выводами, приклеивается к основанию, а мощные выходные транзисторы (по 10 Вт

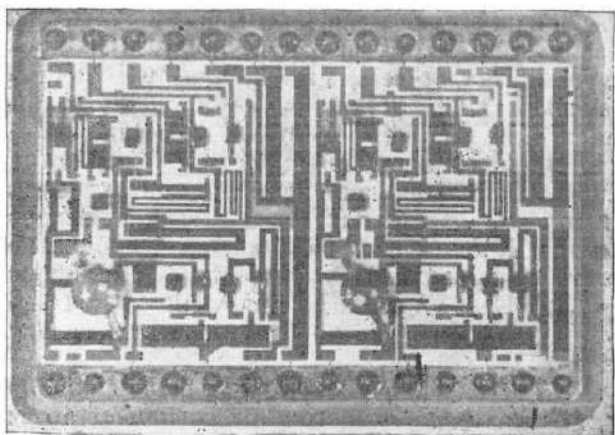


Рис. 3.5. Корпусированная тонкопленочная МСБ

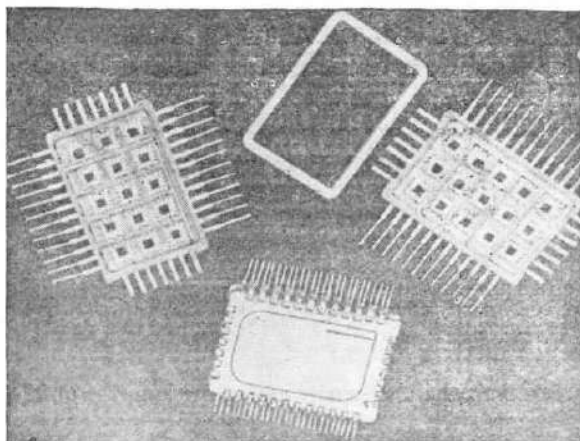
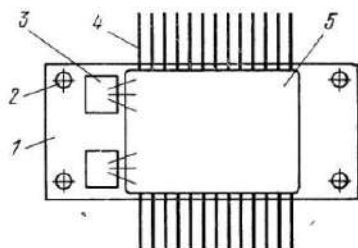


Рис. 3.6. Корпусированная толстопленочная МСБ и ее составные части

Рис. 3.7. Толстопленочная МСБ с теплоотводом — основанием (до заливки компаундом):

1 — металлическое основание-теплоотвод; 2 — отверстие для крепления; 3 — бескорпусный мощный транзистор; 4 — вывод ИС; 5 — толстопленочная плата



каждый) приклеиваются непосредственно на теплоотводе. Далее эта МСБ опрессовывается компаундом. Отверстия, находящиеся в углах металлического основания, не опрессовываются и служат для крепления. Размеры залитого корпуса составляют $48 \times 30 \times 6$ мм, толщина основания 3 мм, а установочная площадь равна 57×60 мм.

Анализ распределения площади подложек (см. § 1.1) в вышеуказанных примерах и других типах МСБ показывает, что для цифровых, аналоговых, а также для МСБ запоминающих устройств и силовых МСБ установочная площадь, занимаемая схемными элементами и компонентами, составляет примерно третью часть от общей площади подложки. Если считать, что ширина пленочных проводников, размеры контактных площадок и соответствующие расстояния между ними примерно равны, что определяется методом изготовления, но в процентном соотношении не зависит от последнего, то в первом приближении можно принять $S_m \approx S_{св}$, т. е. площадь, занимаемая монтажом, и свободная площадь также примерно будут составлять по $1/2$ общей площади каждая.

Плотность упаковки ИС на площади подложки γ_s для цифровых МСБ тонкопленочного типа совпадает по величине с данными рис. В.3, а для МСБ толстопленочного типа в 3,5 раза меньше. Объясняется это тем, что в последнем случае хотя и применяются ИС с шариковыми выводами, но они имеют дополнительную разводку от кристалла по площади, поэтому на такой подложке умещается лишь 15 ИС. Если это устранить, то на ней можно разместить порядка 45 ИС, и тогда $\gamma_s = 5,1$ ИС/см², что близко к данным рис. В.3 ($\gamma_s = 6$ ИС/см²).

Следует также отметить, что у МСБ аналогового типа высокой частоты (УВЧ, УПЧ), в которых применяются линейные полупроводниковые интегральные схемы (ЛИС), плотность упаковки будет меньше, чем у цифровых МСБ, однако это не является недостатком, так как в данном случае нет потребности в большем их количестве на подложке, а существует, наоборот, большая потребность в навесных конденсаторах.

3.1.3. Компонентные схемы функциональных ячеек МЭА

Следующим уровнем компоновки (S_3) являются функциональные ячейки, один из примеров которых был рассмотрен нами ранее (ячейка — плата микрокалькулятора «Электроника БЗ-04», по функциональной сложности являющаяся устройством).

Функциональные ячейки на металлическом основании могут иметь несколько конструктивных вариантов в зависимости от формы самого основания и способа компоновки бескорпусных МСБ в ячейке [3.2, 3.3]. В качестве основания может быть применена алюминиевая или магниевая рамка (рис. 3.8) либо металлическая пластина из тех же сплавов. Бескорпусные МСБ

приклеиваются компаундом к планкам рамки. Если они komponуются лишь с одной стороны рамки, а с другой приклеивается трассировочная печатная плата (рис. 3.9), то такая ФЯ является вариантом односторонней компоновки (рис. 3.10). Если же бескорпусные МСБ komponуются с двух сторон планок, то большая часть соединений между МСБ осуществляется через соседние контактные площадки рядом расположенных МСБ термокомпрессионной. Коммутация между верхним и нижним рядами МСБ, а также МСБ, расположенными с разных сторон, осуществляется с помощью печатных вставок и микропроволочного жгутового монтажа, прокладываемого в зонах между боковыми и дополнительными ребрами жесткости по коротким сторонам ячейки. В этом случае имеем вариант двусторонней компоновки ФЯ на металлической рамке (рис. 3.11). Как в первом случае, так и во втором в нижней части печатной платы (вставки) располагаются внешние выводы ФЯ в виде штырей или контактных площадок (рядами, в шахматном порядке) для монтажа ячеек между собой.

Третьим вариантом ФЯ на металлических рамках является вдвоенная ячейка, собранная из двух односторонних ячеек с многослойной печатной платой (МПП) между ними. Общее крепление осуществляется развальцованными или резьбовыми втулками

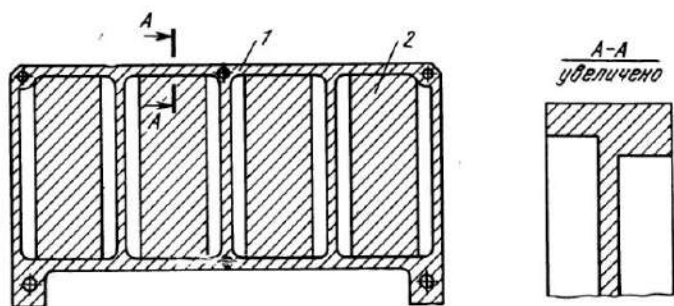


Рис. 3.8. Конструкция рамки:
1 — ребро жесткости; 2 — планка

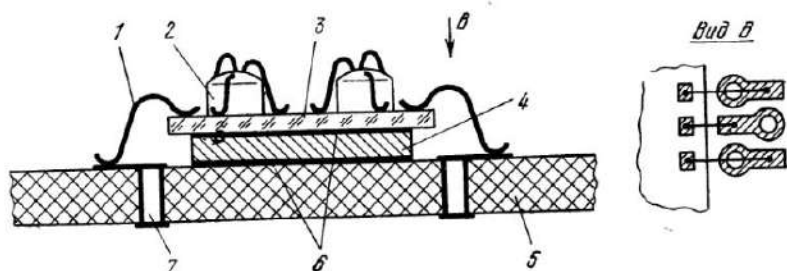


Рис. 3.9. Установка МСБ в ячейке:

1 — соединительный проводник; 2 — бескорпусная ИС; 3 — подложка; 4 — планка; 5 — печатная плата; 6 — компаунд-клей; 7 — металлизированное отверстие

по углам ФЯ [3.2]. Двусторонняя и сдвоенная ФЯ имеют примерно двукратное увеличение плотности упаковки МСБ в ячейке по сравнению с односторонней. Поскольку в каждой ячейке с одной стороны компоуется по 6 ... 8 МСБ размером 24×30 мм, то примерные размеры ФЯ составляют $(100 \dots 150) \times 90$ мм, а высота зависит от варианта компоновки (примерно 6 мм для односторонней и двусторонней и 9 мм для сдвоенной). Удельная мощность рассеивания в двусторонней ячейке будет примерно в 2 раза, а в сдвоенной — в 1,5 раза выше, чем в односторонней. Кроме того, применение жгутового монтажа в двусторонней ячейке требует ручной вязки жгутов, что является недостатком ее конструкции.

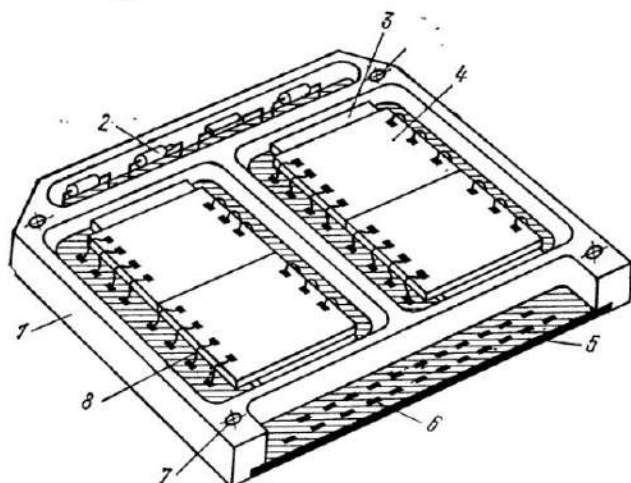


Рис. 3.10. Односторонняя компоновка ФЯ:

1 — рамка; 2 — навесной ЭРЭ; 3 — планка; 4 — бескорпусная МСБ; 5 — печатная плата; 6 — выводная контактная площадка; 7 — отверстие для стягивания ячеек в пакет; 8 — соединительный проводник

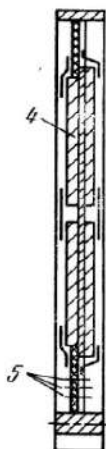
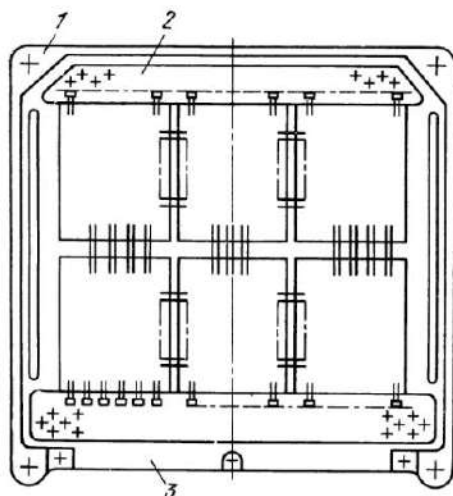


Рис. 3.11. Двусторонняя компоновка ФЯ:

1 — рамка; 2 — печатная коммутационная вставка; 3 — печатная вставка с выводными штырями; 4 — бескорпусная МСБ; 5 — выводные штыри

Разобранные выше варианты конструкций ФЯ на металлическом основании характерны для цифровой МЭА, отличающейся однородностью структуры как в схемотехническом, так и конструктивном плане. Применение металлических оснований обусловлено главным образом высокой плотностью упаковки ИС и, следовательно, значительным тепловыделением.

Для ФЯ другого назначения, например аналоговых, конструкции на металлических рамках имеют дополнительные особенности, вызванные спецификой построения и работы этих устройств. Так, для ФЯ приемно-усилительного типа главными требованиями являются требование последовательного изменения («в линию») уровня входных сигналов и преобразований его на несколько порядков, требование высокой добротности и стабильности частотно-избирательных микросборок (ЧИМ), требование электростатического экранирования. Это приводит к созданию «пенальных» конструкций ФЯ, имеющих удлиненный герметичный корпус, выполняющий одновременно роль экрана. В качестве ЧИМ могут применяться усилители с пленочными и тороидальными катушками, интегральными пьезоэлектрическими фильтрами и фильтрами ПАВ, т. е. с функциональными компонентами и элементами, совместимыми с МСБ.

Один из вариантов конструкций ФЯ типа «пенал» показан на рис. 3.12. Верхняя крышка на рисунке снята и не показана передняя стенка, на которой укреплены высокочастотные разъемы и трубка-штенгель для откачки воздуха. Активная часть приемно-усилительного тракта выполнена на МСБ с ЛИС, частотно-избирательные узлы — на тороидальных катушках, компоновка МСБ осуществлена без зазоров, по принципу «непрерывной микросхемы» [3.2], дополнительный монтаж осуществлен по бокам ФЯ на печатных вставках. В задней стенке имеются индивидуальные соединители типа «слезка» (металлостеклянный впаяный вывод) для питания схемы. Размеры «пенала» $40 \times 65 \times 7$ мм.

Функциональные ячейки на крупноформатных, как правило, толстопленочных подложках с применением бескорпусных МСБ

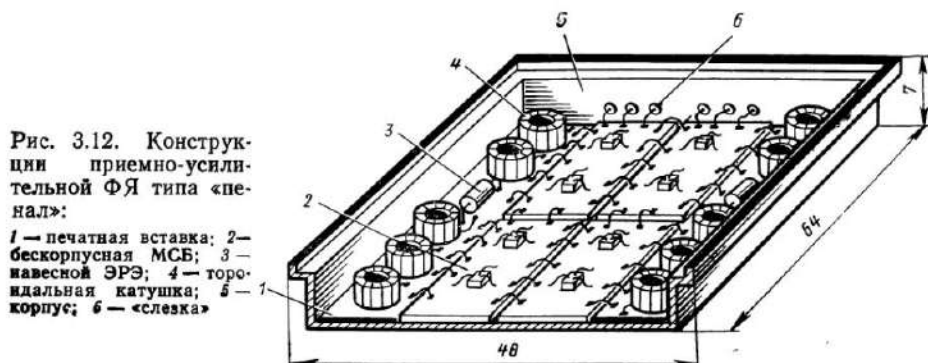


Рис. 3.12. Конструкция приемно-усилительной ФЯ типа «пенал»:

- 1 — печатная вставка; 2 — бескорпусная МСБ; 3 — навесной ЭРЭ; 4 — тороидальная катушка; 5 — корпус; 6 — «слезка»

(связи 1, 3 рис. 3.1), можно считать как сверхбольшие гибридные интегральные схемы. На несущее основание из металла (стали, алюминия) или стеклоэпоксидного пластика вжигается толсто пленочная подложка или приклеивается полиимидная пленка размером до сотен миллиметров, на которой создаются пленочные резисторы, конденсаторы, коммутация, устанавливаются навесные дискретные ЭРЭ и микрокомпоненты, совместимые с ИС, разъем, а также тонкопленочные бескорпусные МСБ. Отдельные области на подложке и бескорпусные МСБ могут герметически закрываться коваровыми крышками-экранами, например с помощью опайки по контуру. Пример такого рода конструкции, разработанной фирмой Hughes, показан на рис. 3.13 [3.4].

Компоновка ФЯ на печатных платах с бескорпусными МСБ (связь 14) представлена примером конструкции ячеек бортовой ЭВМ (рис. 3.14,б) [3.1].

Компоновка ФЯ на печатных платах с корпусированными МСБ (связь 17) практически ничем не отличается от вариантов компоновки ФЯ III поколения. Правила установки и монтажа также определяются видом корпуса, числом задействованных

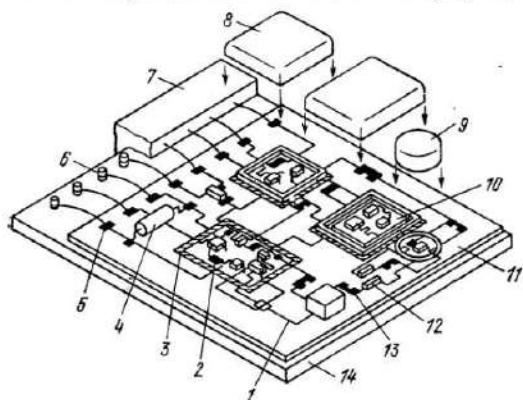
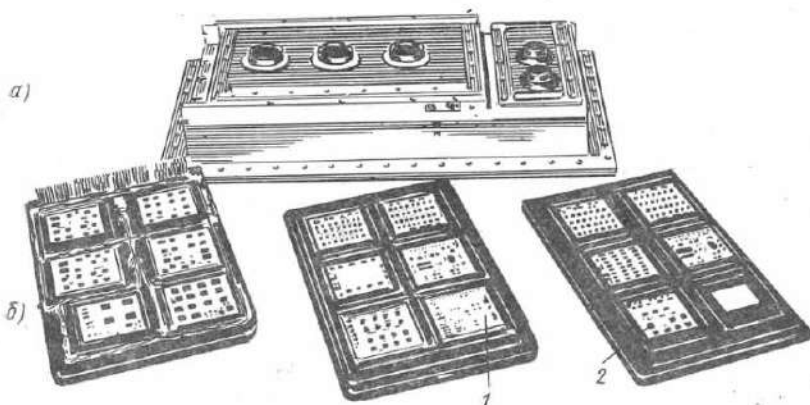


Рис. 3.13. Конструкция ФЯ на крупноформатной подложке:

1 — толсто пленочный проводник; 2 и 13 — толсто пленочные резисторы; 3 — область, закрываемая термически; 4 — навесной ЭРЭ; 5 — толсто пленочная контактная площадка; 6 — наконечник; 7 — резец; 8 и 9 — коваровые крышки; 10 — тонко пленочная подложка; 11 — керамическая подложка; 12 — бескорпусный конденсатор; 14 — несущая подложка из металла или стеклоэпоксидного пластика

Рис. 3.14. Конструкция моноблока (а) бортовой ЭВМ, состоящего из ФЯ (б) на крупноформатных печатных платах:

1 — бескорпусная МСБ; 2 — БИС



выводов и их расположением относительно корпуса (планарные или штыревые), как и при использовании ИС широкого применения.

3.1.4. Компоновочные схемы моноблоков МЭА на БГИС и микросборках

Последний в нашем рассмотрении уровень компоновки (S'_3) — моноблок МЭА, состоящий из ФЯ трех разновидностей, может иметь следующие компоновочные схемы: разъемную, плоскостную, кассетную (веерную) и книжную.

Разъемная компоновка блоков (рис. 3.15) характерна для объединения ФЯ III поколения, выполненных на печатных платах со стандартными разъемами ГРПП, ГРПМ и др. В этих случаях в блоке каркасного типа имеется общая трассировочная плата (кросс-плата) с ответными частями разъемов (розетками), в которые вставляются ФЯ. Сверху эти ячейки дополнительно крепятся винтами или накладной планкой. Проверка ФЯ проводится в выключенном состоянии или с помощью дополнительной специальной платы (во включенном состоянии). Вариант плоскостной компоновки блоков (рис. 3.14,а) характерен для ФЯ IV поколения на печатных платах или металлических рамках, если число ФЯ незначительно (порядка 3 ... 4). В этом случае ФЯ стягиваются в пакет винтами, а монтаж между ними может быть жгутовый или шлейфовый. Ремонт и проверка ФЯ может проводиться как в выключенном, так и во включенном состояниях.

Кассетная (веерная) компоновка блока (рис. 3.16) обладает той особенностью, что при ремонте кассета, состоящая из

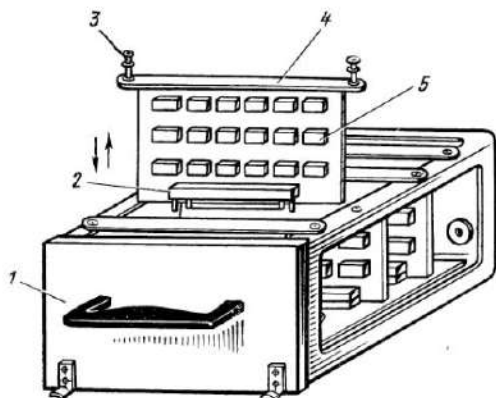


Рис. 3.15. Разъемная компоновка блока МЭА:

1 — корпус; 2 — разъем; 3 — невыпадающий винт; 4 — колодка; 5 — корпусированная МСБ (БГИС)

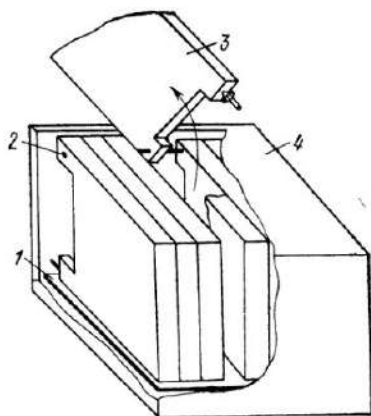


Рис. 3.16. Кассетная (веерная) компоновка блока МЭА:

1 — общая коммутационная плата; 2 — шарнирное соединение; 3 — кассета; 4 — корпус. Пятая по счету кассета условно показана наполовину

нескольких (обычно двух) ФЯ, откидывается на шарнире вверх; при этом жгутовый монтаж должен иметь запас по длине. Ремонт и проверка может проводиться во включенном состоянии.

Самой распространенной компоновкой блоков МЭА как III, так и IV поколения является книжная компоновка, основными дос-

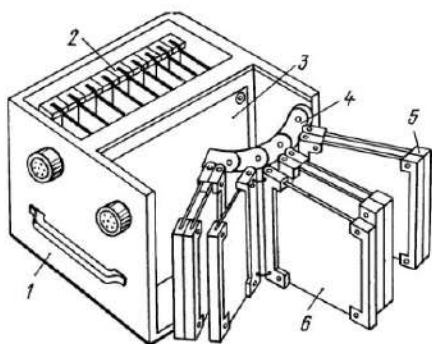


Рис. 3.17. Книжная компоновка блока МЭА III поколения с вертикальной осью раскрытия:

1 — корпус; 2 — секция; 3 — общая трассировочная плата; 4 — двойной шарнир; 5 — «двойка», 6 — ФЯ

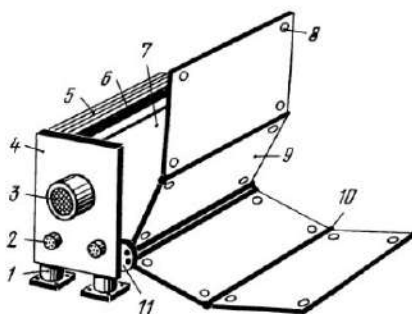


Рис. 3.18. Книжная компоновка блока МЭА III поколения с горизонтальной осью раскрытия:

1 — амортизатор; 2 — разъем; 3 — воздуходувка; 4 — передняя панель; 5 — секция; 6 — средняя стенка; 7 — гибкий шлейф; 8 — отверстие для стягивания ячеек в пакет (секцию); 9 — ФЯ; 10 — межячеечный шарнир; 11 — общий шарнир

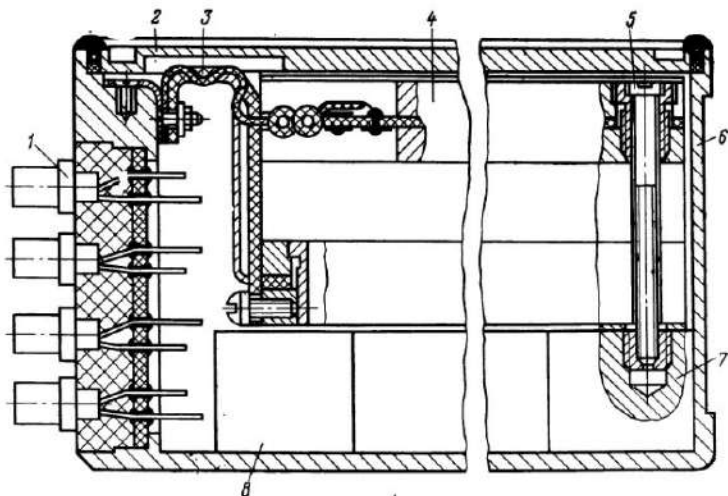


Рис. 3.19. Книжная компоновка блока МЭА IV поколения:

1 — разъем; 2 — крышка корпуса; 3 — гибкая матрица — ремень; 4 — ФЯ на металлической рамке; 5 — стяжной винт; 6 — корпус; 7 и 8 — бобышки крепления

тоинствами которой являются высокая компактность, легкий доступ к МСБ при ремонте, возможность проверки и отладки устройств во включенном состоянии схемы. Для блоков МЭА III поколения характерными компоновками «книжки» [3.3] являются варианты с вертикальной (рис. 3.17) и горизонтальной (рис. 3.18) осями раскрытия. Блоки имеют каркасную конструкцию, в центре которой расположены общие трассировочные платы, а по бокам — секции, состоящие из набора ФЯ («двоек»), шарнирно закрепленных между собой и самими ячейками. Монтаж — жгутовой или шлейфовый.

На рис. 3.19 представлена книжная компоновка блока МЭА на металлических рамках [3.2]. Пакет ФЯ стянут винтами к бобышкам в нижней части корпуса. Корпус выполнен из алюминиевых сплавов или стали и может быть сварным. На передней, более толстой стенке корпуса укреплены и загерметизированы разъемы типа РПС, трубка-штенгель, винты заземления. Тонкие стенки корпуса имеют толщину 2 ... 3 мм, а передняя 6 ... 8 мм. Монтаж между ячейками может осуществляться гибкой матрицей — «ремнем» или гибкими шлейфами. Матрица представляет собой лист бессернистой резины с пробитыми в нем отверстиями диаметром 1,5 ... 2 мм, через которые прошиваются жгуты из микропроводочного монтажного провода ГФ-100М. В каждое отверстие можно продеть жгут, состоящий из 16 ... 20 проводов. Гибкий шлейф выполнен на ленте из полиимидной или лавсановой пленки, толщиной 100 ... 200 мкм с нанесенными на ней печатными прямолинейными проводниками. Шлейфы позволяют изменять направление монтажа до 90°.

Герметизация корпуса осуществляется по методу «паяного шва» [3.2]. В зазор между корпусом и верхней крышкой (рис. 3.20) по всему периметру укладывается уплотнительная резиновая прокладка, центрирующая крышку и не позволяющая при пайке проникать парам припоя и флюса внутрь корпуса. На прокладку также по периметру накладывается стальная проволока диаметром 0,8 мм, один из концов которой выводится в «отросток» паза, затем производится пайка. При необходимости вскрыть блок конец проволоки вместе с припоем вырывается из «шва»; такое вскрытие и запайка допускаются до 3 ... 4 раз. В менее ответственных случаях герметизация осуществляется уплотнительными прокладками и стягивающими винтами так же, как и для блоков III поколения.

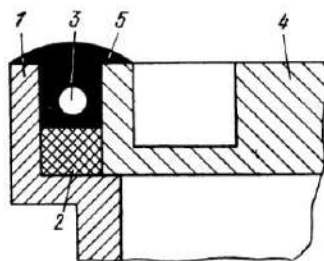


Рис. 3.20. Герметизация корпуса «паяным швом»;

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

3.1.5. Коэффициенты дезинтеграции конструктивов МЭА

Для некоторых вариантов конструкции МСБ, которые повторяют серийно выпускаемые БГИС (рис. 3.5—3.7), либо ФЯ карманного микрокалькулятора (рис. 3.3), а также для ФЯ, конструируемых по известным правилам [3.2, 3.3] для III и IV поколений (рис. 3.10, 3.11), были рассчитаны коэффициенты дезинтеграции объема (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Вариант компоновки ФЯ и область ее применения в радиоаппаратуре	Номер рисунка		IV			$q_{V\Sigma}$
	МСБ	ФЯ	БИС—бескорпусная МСБ	Бескорпусная МСБ—корпусированная МСБ	МСБ—ФЯ	
Двусторонняя на металлической рамке с бескорпусными МСБ на полиимидной пленке; цифровая МЭА	3.4	3.11	6,3	—	6	38
Односторонняя на металлической рамке с бескорпусными МСБ на ситалловых подложках; цифровая МЭА	3.4	3.10	5,2	—	9,7	50
Односторонняя на МПП с корпусированными МСБ на ситалловых подложках; аналоговая МЭА	3.4	—	7,3	3,1	7,5	170
Односторонняя на МПП с корпусированными МСБ на толсто пленочных подложках; цифровая МЭА	3.6	—	11,7	2,2	9,4	242
Односторонняя на МПП с корпусированными МСБ на стеклянных подложках; запоминающие устройства	—	—	9,1	7,6	9,4	650
Односторонняя на крупноформатной стеклянной подложке с корпусированными БИС; карманные микрокалькуляторы	—	3.3	60*)	—	14,4**)	864
Односторонняя на МПП с залитыми компаундом МСБ на толсто пленочных подложках с теплоотводом; силовые устройства	3.7	—	15	7,1	9,4	1000

*) При переходе от бескорпусной к корпусированной БИС.

**) При переходе от корпусированной БИС к ФЯ

В таблице приведены значения коэффициентов дезинтеграции объема на двух или трех компоновочных уровнях в зависимости от корпусирования БИС, МСБ или его отсутствия, т. е. при переходе от БИС к бескорпусной МСБ, от бескорпусной МСБ к корпусированной МСБ и от бескорпусной или корпусированной МСБ к ФЯ, и суммарный коэффициент дезинтеграции объема ($q_{V\Sigma}$)

от уровня БИС до ФЯ, равный их произведению. Величины коэффициентов дезинтеграции объема характерны именно для этих рассматриваемых примеров конструкций и не могут быть общими для всего того или иного класса МСБ или ФЯ. Однако они отражают некоторые средние значения величин этих классов, кото-

рые в первом приближении позволяют оценить выигрыши в объеме ФЯ для разных вариантов выбора.

Так, наименьшими потерями в объеме обладают ФЯ на бескорпусных МСБ и их выигрыши могут быть в 3 ... 5 раз больше, чем у ФЯ III поколения, что вполне согласуется с расчетами подобных моделей ФЯ, приведенными в [3.1]. Значительные потери объема характерны для трех последних вариантов, что также объясняется простыми причинами: высокой потребляемой мощностью, требованиями эргономики и наличием теплоотвода соответственно.

Из данных табл. 3.1 следует, что применение бескорпусных МСБ характерно для бортовой МЭА с повышенными требованиями к массе и объему и, наоборот, для аппаратуры стационарной промышленной электроники могут быть приемлемы варианты с корпусированными МСБ или БИС.

Отметим также, что выигрыш в объеме не всегда желательно оценивать в размах (в относительных величинах), а иногда лучше дать оценку в абсолютных величинах (в см³), в особенности для МЭА малой сложности.

Расчет абсолютного выигрыша в объеме МЭА при переходе от одного варианта компоновки к другому можно провести по формуле [3.1]

$$\Delta V = N_{\text{ИС}}(h_1/\gamma_{S_1} - h_2/\gamma_{S_2}), \quad (3.1)$$

где $N_{\text{ИС}}$ — сложность устройства, выражаемая количеством применяемых ИС, шт; h_1, h_2 — высота конструктива соответственно в рассматриваемых вариантах, см; $\gamma_{S_1}, \gamma_{S_2}$ — плотность упаковки ИС на установочной площади конструктива, ИС/см².

Оценочные расчеты для разных вариантов компоновки дают следующие ориентировочные значения плотности упаковки: 0,1 ИС/см² для корпусированных ИС на печатной плате или крупноформатной подложке; 0,55 ИС/см² — бескорпусных ИС на лентаносителях на тех же несущих основаниях; 1,4 ИС/см² — бескорпусных ИС на тонкопленочных подложках; 3 ... 5 ИС/см² — бескорпусных ИС на многослойных толстопленочных подложках [3.1]. Тогда если несложная МЭА, построенная из корпусированных ИС на печатных платах, занимает объем 240 см³, а та же аппаратура, построенная из бескорпусных ИС на подложках, — 80 см³ (в 3 раза меньше), то абсолютный выигрыш составит 160 см³. В случае увеличения сложности МЭА в 10 раз оценочные расчеты по формуле (3.1) показывают, что для первого варианта объем будет равен 2400 см³, во втором варианте 800 см³, а выигрыш составит уже 1600 см³, т. е. на порядок выше в абсолютной величине объема. Отсюда следует, что незначительные выигрыши в абсолютном объеме несложной МЭА вряд ли могут оправдать выбор конструирования на IV поколении, в то время как при большой сложности МЭА он вполне оправдан, в особенности для бортовых радиоустройств.

3.2. Основные показатели и особенности выбора и расчета конструкций МЭА на БГИС и микросборках

3.2.1. Основные показатели конструкций микроэлектронной аппаратуры и критерии их сравнения

К основным показателям конструкций МЭА относятся масса m , объем V , надежность, определяемая суммарной интенсивностью отказов Λ , потребляемая мощность P_0 и стоимость C . Однако поскольку выбор направления конструирования МЭА проводится на ранних стадиях ее разработки, когда большинство из этих абсолютных параметров неизвестно, то необходимы априорные критерии сравнения (количественные оценки выигрышей и проигрышей) по этим параметрам, учитывающие особенности элементной базы и способы формообразования для рассматриваемых методов конструирования. Вполне естественно, что каждый из методов имеет свои выигрыши и проигрыши. Величины выигрышей и проигрышей определяются относительными величинами абсолютных или удельных показателей, причем сравнение конструктивных вариантов для общего случая желательно проводить на базе удельных показателей конструкций [3.1].

Одним из главных удельных показателей конструкции МЭА является *плотность упаковки элементов* γ на плоскости или в объеме: $\gamma_S = N/S$ [эл/см²]; $\gamma_V = N/V$ [эл/см³]. Чем больше эти величины, тем более совершенным считается принятый метод конструирования. Вполне понятно, что обе эти величины коррелируют между собой, и достаточно сильно.

Вторым удельным показателем, определяющим меру потерь площади, объема или массы при формообразовании того или иного уровня компоновки конструкции МЭА, является соответствующий этим параметрам *коэффициент дезинтеграции*.

$$q_S = S/S_N, \quad q_V = V/V_N, \quad q_m = m/m_N,$$

где S , V , m — суммарная площадь, объем и масса рассматриваемого уровня компоновки МЭА; S_N , V_N , m_N — площадь, объем и масса полезной (схемной) части на этом уровне компоновки.

В работе [3.1] показано, что $\gamma_{бл} = \bar{\gamma}_{ИС}/q_V$, где $\gamma_{бл}$, $\bar{\gamma}_{ИС}$ — плотность упаковки соответственно для блока МЭА и для «средней» ИС, являющейся базовой конструктивно-технологической единицей конструкции.

Таким образом, видно, что оба указанных показателя взаимосвязаны, причем главный из них ($\gamma_{бл}$), определяющий совершенство конструкции, зависит как от выбора элементной базы ($\bar{\gamma}_{ИС}$), так и от выбранного метода компоновки (q_V). Поэтому если в сравниваемых вариантах методов конструирования принята примерно одна и та же элементная база ($\bar{\gamma}_{ИС} \approx \text{const}$), то выигрыш в объеме, а через него корреляционно и в массе (через удельную массу $m' = m/V$) будет определяться отношением суммарных ко-

эффициентов дезинтеграции объема (массы) от уровня БИС до блока (или ФЯ) в рассматриваемых вариантах.

Третьим удельным показателем конструкции МЭА является *удельная мощность рассеивания*

$$P_{\text{уд рас}} = P_{\text{рас}} / V. \quad (3.2)$$

Она характеризует теплонапряженности на разных уровнях компоновки и поэтому имеет допустимые уровни для отдельных элементов конструкций. Например, на уровне ИС эта величина может составлять десятки тысяч Вт/дм³, на уровне МСБ — сотни Вт/дм³, на уровне ФЯ и блоков — десятки-сотни Вт/дм³. Обычно для блоков МЭА с объемом в несколько единиц дм³ принимают допустимую удельную мощность рассеивания порядка 30 ... 40 Вт/дм³, если нет дополнительных систем охлаждения. В данном случае этот показатель можно отнести к группе ограничений на объем.

Покажем это. Поскольку мощность рассеивания $P_{\text{рас}}$ определяется потребляемой мощностью как

$$P_{\text{рас}} = k_P P_0, \quad (3.3)$$

где k_P — коэффициент потерь мощности (обычно $k_P = 0,8 \dots 0,9$), то сравним два варианта конструкции большего и меньшего объемов ($V_1/V_2 = x_1$), учитывая при этом, что изменение потребляемой мощности $P_{01}/P_{02} = x_2$ значительно меньше, чем изменение объема ($x_1 \gg x_2 > 1$). Поскольку с изменением объема обратно пропорционально меняется и допустимая удельная мощность рассеивания, то примем, что $P_{\text{уд рас доп2}}/P_{\text{уд рас доп1}} = x_3$, где $x_3 > 1$. Будем считать, что запасы по удельной мощности рассеивания в рассматриваемых вариантах соответственно равны α_1 и α_2 , т. е.

$$P_{\text{уд рас доп1}} = \alpha_1 P_{\text{уд рас}}, \quad P_{\text{уд рас доп2}} = \alpha_2 P_{\text{уд рас}}. \quad (3.4)$$

При этом очевидно, что $\alpha_{1,2} \geq 1$. Учитывая это условие и пользуясь выражениями (3.2) — (3.4), получаем $x_3 = \alpha_2 x_1 / \alpha_1 x_2$, откуда $\alpha_2 = (\alpha_1 x_2 x_3 / x_1) \geq 1$ или

$$x_1 \leq (\alpha_1 / \alpha_2) x_2 x_3. \quad (3.5)$$

В предельном случае, когда $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, имеем $x_1 \leq x_2 x_3$.

Полученная формула подтверждает ранее сделанный вывод о том, что возможный выигрыш в объеме конструкции не должен превышать определенной величины, а именно: произведения вариаций величин потребляемой мощности и допустимой удельной мощности рассеивания.

Пример 3.1. Пусть в первом варианте объем блока составляет $V_1 = 1$ дм³, в котором рассеивается мощность $P_{\text{рас}} = 10$ Вт. Допустимая мощность рассеивания равна 20 Вт/дм³. При переходе на новые методы компоновки во втором варианте имеем незначительное увеличение потребляемой мощности ($x_2 = 1,2$) и трехкратное увеличение допустимой мощности рассеивания ($x_3 = 3$). Требуется определить максимально допустимое уменьшение объема блока при равенстве удельной мощности рассеивания ее допустимой величине во втором варианте. Величина $\alpha_1 = 2$, $\alpha_2 = 1$. По выражению (3.5) находим $x_1 \leq 2 \cdot 1,2 \cdot 3 = 7,2$, т. е. объем блока во втором варианте не должен быть меньше 0,14 дм³.

Таким образом, для оценки комплексного показателя качества необходимо не только знать выигрыши в объеме, массе, мощности потребления и других параметрах, но и учитывать их в ограничениях, например по допустимым теплонапряженностям.

Выигрыш (или проигрыш) в надежности при переходе на другие методы конструирования может быть оценен либо по среднестатистическим данным, характерным для рассматриваемого момента времени, либо оценочным расчетом по электрической функциональной схеме, отражающей сложность устройства: $C_{p\pi y} = k_1(k_2N + k_3M)$, где N — число элементов и компонентов схемы; M — число соединений между ними; k_1 — масштабный коэффициент; k_2, k_3 — весовые коэффициенты, учитывающие вероятности отказов компонентов и соединений между ними.

Пример 3.2. Для бортовой авиационной МЭА необходимо выбрать оптимальный вариант конструирования по двум предлагаемым методам: конструирование из корпусированных МСБ на печатной плате и конструирование из бескорпусных МСБ на металлическом основании, если известно, что во втором случае получаются выигрыши в массе в 1,1 раза, в объеме в 1,95 раза [3.1]. Примем, что получим выигрыш надежности в 2 раза и проигрыш в стоимости также в 2 раза. Потребляемая, а следовательно, и рассеиваемая мощность остаются постоянными. Коэффициенты значимости при этом выбраны следующими: $\varphi_m = 1,0$, $\varphi_V = \varphi_A = 0,8$, $\varphi_C = 0,5$, $\varphi_P = 0,4$.

По формуле (1.2) рассчитаем комплексные показатели качества для двух вариантов, приняв в первом из них все частные составляющие показатели за единицу, а во втором — пронормировав выигрыши (проигрыши) в относительных величинах, т. е. для второго варианта $m = 0,91$, $V = 0,51$, $P_0 = 1$, $\Lambda = 0,5$, $C = 2$. Тогда получим $K_1 = 1,0 + 0,8 + 0,4 + 0,8 + 0,5 = 3,5$; $K_2 = 1,0 \cdot 0,91 + 0,8 \cdot 0,51 + 0,4 \cdot 1,0 + 0,8 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 2 = 3,12$, откуда следует, что второй вариант конструирования данной МЭА предпочтительнее.

Таким образом, основными критериями сравнения показателей конструкций являются плотность упаковки элементов, коэффициенты дезинтеграции, удельная мощность рассеивания, надежность и стоимость. Кроме этого, дополнительно для сравнения вибропрочности, конструктивной расчлененности могут использоваться абсолютные показатели (например, собственная частота неамортизированной конструкции f_0 и показатель функционального расчленения ПФР). Расчет этих показателей проводится по формулам

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha}{l^2} \sqrt{\frac{k_{ж}}{m}}, \quad \text{ПФР} = \frac{N}{M}, \quad (3.6)$$

где α — постоянная, определяемая вариантом крепления конструкции; l — наибольший геометрический размер конструкции (пластины или балки); $k_{ж}$ — жесткость конструкции, Н/мм²; m — погонная масса на единицу длины или площади; N и M — число элементов и компонентов и число выводов в конструктиве, шт.

3.2.2. Влияние объема и формы блоков МЭА на удельные показатели компоновки

В зависимости от объекта установки, назначения и степени интеграции аппаратуры объем и форма блоков МЭА могут быть

различными. Обычно объемы блоков бортовой МЭА изменяются в пределах от 0,1 дм³ до нескольких десятков кубических дециметров, а форма блоков может быть плоской, прямоугольной, цилиндрической или кубической.

Оценим количественно, как влияет каждый из этих факторов на удельную мощность рассеивания и вибропрочность конструкций блоков МЭА.

Известно [3.1], что мощность рассеивания в блоке $P_{\text{рас}} = k_{\Sigma} S \Delta T$, где k_{Σ} — суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности блока, Вт/м²·°С; S — площадь поверхности теплоотдачи, м²; ΔT — перегрев корпуса блока относительно окружающей среды, °С. Удельная мощность рассеивания $P_{\text{уд рас}} = k_{\Sigma} \Delta T S / V$, т. е. она прямо пропорциональна отношению поверхности теплоотдачи к объему блока.

Оценим влияние объема блока на удельную мощность рассеивания, принимая для простоты выводов кубическую форму блока со стороной a_6 . Изменение стороны куба в k_1 раз приведет к изменению объема блока в k_1^3 раз, что очевидно. Поскольку $S = 6a_6^2$, а $V = a_6^3$, то удельная мощность рассеивания

$$P_{\text{уд рас}} = k_{\Sigma} \Delta T \cdot 6 / a_6.$$

Если считать, что какой-либо объем блока принят за номинальный, например $V_0 = a_{60}^3$, а по отношению к нему требуется оценить количественное изменение удельной мощности рассеивания (вариацию) B_P (в раз) при изменении объема в k_1^3 раз для i -го варианта, то такая оценка может быть сделана по следующей формуле:

$$B_P = \frac{k_{\Sigma i} \Delta T \cdot 6 a_{60}}{k_{\Sigma 0} \Delta T \cdot 6 a_{6i}} = \frac{k_{\Sigma i}}{k_{\Sigma 0}} \frac{a_{60}}{a_{6i}} = \frac{k_{\Sigma i}}{k_{\Sigma 0}} \frac{1}{k_1}, \quad (3.7)$$

где $k_{\Sigma 0}$, $k_{\Sigma i}$ — суммарные коэффициенты теплопередачи для номинального объема и объема блока в i -м варианте; a_{60} , $a_{6i} = k_1 a_{60}$ — стороны куба в указанных выше случаях ($k_1 > 0$).

Поскольку с изменением определяющего размера блока (стороны куба) происходит также изменение коэффициента конвекции, являющегося слагаемым в суммарном коэффициенте теплопередачи, а другое слагаемое — коэффициент лучеиспускания $\alpha_{\text{л}}$ — практически не зависит от определяющего размера, то с изменением стороны куба в k_1 раз в форме (3.7) необходимо учесть изменение $k_{\Sigma i} / k_{\Sigma 0}$. Оценочные расчеты по методике [3.5] для герметичных блоков МЭА с $\alpha_{\text{л}} \approx 7$ Вт/м²·°С показывают, что увеличение определяющего размера блоков в 2 раза (от 100 до 200 мм), так и уменьшение его в 2 раза (от 100 до 50 мм) изменяют суммарный коэффициент теплопередачи не более, чем на 5 ... 10%, т. е. незначительно. Поэтому изменение удельной мощности рассеивания может быть оценено приближенно как $B_P \approx 1 / k_1$.

Поскольку изменение объема блока равно $V_V = V_i/V_0 = k^3$, то на рис. 3.21 показана зависимость B_P от изменения объема, рассчитанная на основе этих соотношений. Из графика можно рассчитать, что изменение объема в 10 раз изменяет этот параметр компоновки примерно в два раза в обратную сторону. Для практических расчетов на рис. 3.22 приведена зависимость отношения S/V для характерных объемов блоков МЭА.

Оценим количественное влияние формы блока на удельную мощность рассеивания. Будем «расплющивать» куб в более плоские панели квадратной или прямоугольной формы. При этом за параметр степени расплющивания примем отношение стороны куба a_6 к высоте панели h' , получаемой в том же объеме, или коэффициент планарности $k_2 = a_6/h'$. Поскольку объемы в обоих вариантах равны, то $a_6 S_0 = h' S_i$ (где $S_0 = a_6^2$ — площадь грани куба, S_i — площадь грани панели в плане), откуда $k_2 = S_i/S_0$ характеризует увеличение площади верхней грани куба при расплющивании его в панель. Поскольку объем остается постоянным, то изменение удельной мощности рассеивания будет происходить лишь за счет увеличения площади теплоотдачи S .

Рассмотрим для простоты выводов расплющивание куба в панель квадратной формы. Как показывают расчеты, изменение удельной мощности рассеивания при расплющивании куба в панель прямоугольной формы мало чем отличается от указанного выше. Обозначим увеличение стороны верхней грани через $k_3 = a'_{6i}/a_6$, где a'_{6i} — сторона верхней грани панели. Тогда общая площадь теплоотдачи панели $S_{\pi} = 2a_6^2 k_3 (k_3 + 2/k_2)$, а увеличение удельной мощности B'_P , равное увеличению площади теплоотдачи $B_S = S_{\pi}/6S_0$, можно записать как

$$B'_P = (k_3/3) (k_3 + 2/k_2).$$

Из равенства объемов находим, что $k_2^3 a_6^2 (a_6/k_2) = a_6^3$ и $k_2^3 = 1/k_3$, откуда

$$B'_P = (k_2 + 2/\sqrt{k_2})/3. \quad (3.8)$$

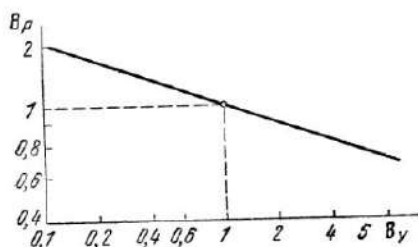


Рис. 3.21. Зависимость вариации удельной мощности рассеивания от вариации объема блока

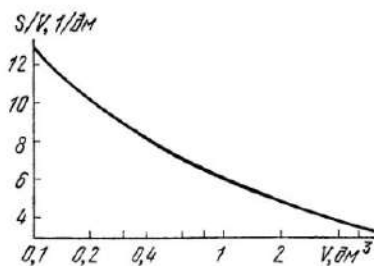


Рис. 3.22. Зависимость отношения площади теплоотдачи блока к его объему от объема блока

На рис. 3.23 представлены графики зависимостей вариации удельной мощности рассеивания блоков МЭА от степени планарности их формы при деформации куба в квадратную и прямоугольную (балку) панели. Расчет B'_P для балки, проведенный по более сложной формуле, дает незначительное приращение этой величины, поэтому вывод формулы для второго случая не приводится.

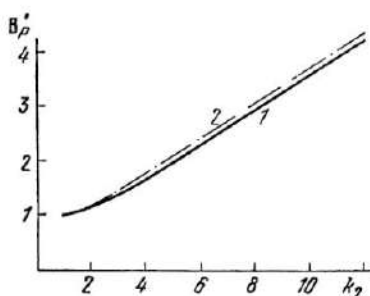


Рис. 3.23. Зависимости вариации удельной мощности рассеивания блоков МЭА от степени планарности их формы при деформации куба в квадратную (1) и прямоугольную (2) панели

Пример 3.3. Требуется определить минимально допустимые габариты блока МЭА, если известно, что $k_2=3$, $\Delta T=40^\circ\text{C}$ при $T_{\text{max}}=60^\circ\text{C}$, $k_2=0,12$ Вт/дм²·°C, $P_0=40$ Вт. Принимаем, что 80% потребляемой мощности рассеивается в тепловую энергию. Тогда $P_{\text{рас}}=32$ Вт. Определим допустимую мощность рассеивания для блока кубической формы. Из графика рис. 3.23 находим $B'_P=1,39$, тогда $P_{\text{рас к}}=32/1,39=23$ Вт.

Удельная мощность рассеивания в блока $P_{\text{уд рас}}=23/V$. Допустимая удельная мощность рассеивания $P_{\text{уд рас доп}}=0,12 \cdot 40 \cdot S/V=4,8S/V$. По графику рис. 3.22 методом последовательных приближений находим, что для выполнения условия $P_{\text{уд рас}}=P_{\text{уд рас доп}}$ необходим объем $V=0,73$ дм³, при котором $S/V=6,6$ 1/дм и $P_{\text{уд рас}}=31,5$ Вт/м³. Сторона куба равна $a_6=\sqrt[3]{V}=0,9$ дм=90 мм. Высота блока $h'=a_6/k_2=90/3=30$ мм, $k_3=\sqrt{k_2}=1,73$, сторона блока $a'_6=1,73 \cdot 90=156$ мм. Искомые (минимально допустимые) габариты блока: 156×156×30 мм. При наличии унифицированных типоразмеров блоков выбирается ближайший больший типоразмер.

Перейдем далее к рассмотрению влияния объема и формы блоков МЭА на вибропрочность. Оценка этого влияния может характеризоваться изменением собственной (резонансной) частоты конструкции блока f_0 . Поскольку блок МЭА представляет собой совокупность (систему) элементов конструкции, имеющих различные форму, размеры и способы крепления, то каждый такой элемент обладает своей собственной частотой, причем наиболее опасной частотой для появления резонанса является самая низшая, которая характерна для наиболее крупноформатного, плоского и слабо закрепленного элемента. Определение такого наиболее «слабого» места в конструкции проводится путем анализа конкретной конструкции блока и расчета его собственной частоты.

В общем случае влияние объема блока МЭА (без амортизаторов) может быть определено следующим образом: чем меньше объем блока, а следовательно, и его масса, тем выше собственная частота конструкции и его вибропрочность. Это подтверждается формулой (3.6).

Более конкретно можно оценить влияние формы блоков на их вибропрочность, если идти от плоской формы блока к еще более плоской, т. е. учитывать коэффициент планарности k_2 . Собственная

частота плоской пластины *) согласно [3.6] определяется как

$$f_0 = \frac{k_m k_b C h_0}{a^2} 10^4 \text{ [Гц]}, \quad (3.9)$$

где k_m , k_b — коэффициенты материала и веса (нагруженности) пластины, определяемые по таблицам [3.6]; C — частотная постоянная, зависящая от способа закрепления пластины и определяемая также по таблице [3.6]; h_0 , a — толщина и длинная сторона пластины, см.

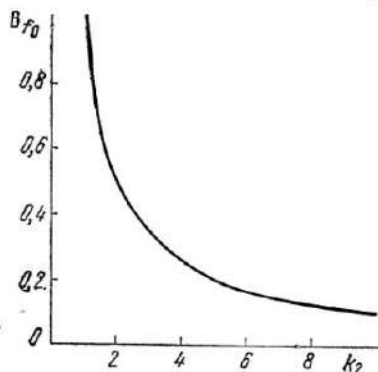


Рис. 3.24. Зависимость вариации собственной частоты блока МЭА от коэффициента планарности его конструкции

Если блок МЭА имеет плоскую форму, то обычно и функциональные ячейки, упакованные в нем в пакет, имеют примерно ту же форму; изменения сторон ФЯ пропорциональны изменениям сторон блока. Толщина ФЯ и, в частности, ее несущей конструкции (печатной платы или металлической рамки с печатной платой), естественно, будет в несколько раз меньше, чем высота блока. Однако если рассматривать влияние степени расплющивания блока на его собственную наименьшую частоту, то можно в качестве исходного условия принять следующее: при увеличении k_2 в кон-

струкциях ФЯ блока основным изменяющимся параметром является сторона a , толщина пластины h_0 не изменяется, частотная постоянная C при сохранении способа закрепления также не меняется, коэффициент k_m постоянен, а изменением k_b можно пренебречь.

Для простоты рассмотрения, как и ранее, примем квадратную форму пластины, тогда увеличение ее стороны a_i/a будет характеризоваться коэффициентом $k_3 = \sqrt{k_2}$. Вариация собственной частоты V_{f_0} для i -го варианта может быть определена по аналогии с предыдущими примерами следующим образом (с учетом постоянства указанных выше величин):

$$V_{f_0} = f_{0i}/f_0 = (a/a_i)^2 = 1/k_2. \quad (3.10)$$

На рис. 3.24 приведена зависимость вариации собственной частоты ФЯ блока МЭА от степени планарности его конструкции.

Пример 3.4. Для блока МЭА III поколения на печатных платах с объемом 0,73 дм³ определить допустимую степень планарности конструкции блока и его габариты, если заданы $f_{0i} = 200$ Гц; $h_0 = 0,8$ мм; $k_b = 0,8$; $k_m = 0,54$, $C = 86$. Примем вначале, что блок имеет кубическую форму со стороной $a_0 = 90$ мм (см. при-

*) Для металлической рамки с печатной платой собственная частота пластины определяется по более сложной формуле, которая приводится в специальной литературе, а здесь для упрощения выводов не рассматривается.

мер 3.3). Сторону квадратной ФЯ принимаем равной $a=75$ мм (с учетом стенок корпуса и зазоров между ними и пакетом ФЯ). Тогда $f_0=0,54 \cdot 0,8 \cdot 86 \cdot 0,08 \times 10^4 / 7,5^2 = 528$ Гц. Далее по выражению (3.10) определяем искомую величину $k_2 \leq f_0 / f_{01} = 528 / 200 = 2,64$. Высота блока $h' = 90 / 2,64 = 34,1$ мм, величина $k_3 = \sqrt{2,64} = 1,62$; сторона блока $a'_{61} = k_3 a_6 = 145,8$ мм. Габариты блока: $145,8 \times 145,8 \times 34,1$ мм. Сравнивая результаты расчета примера 3.4 с результатами расчета примера 3.3, видим, что требования вибропрочности накладывают ограничение на степень планарности блока ($k_2 \leq 2,64$). Примем это ограничение и скорректируем расчеты примера 3.3.

Из графика рис. 3.23 для $k_2 = 2,64$ находим $V'_{\text{р}} = 1,3$, тогда $P_{\text{рас н}} = 32 / 1,3 = 24,6$ Вт; $P_{\text{уд рас}} = 24,6 / V$; $P_{\text{уд рас доп}} = 4,8 S / V$; из графика рис. 3.22 находим $V = 0,76$ дм³, откуда $a = 91$ мм. Высота блока $h' = 91 / 2,64 = 34,5$ мм, сторона блока $a'_{61} = 1,62 \cdot 91 = 147,4$ мм. Скорректированные габариты блока $147,4 \times 147,4 \times 34,5$ мм.

Из приведенных расчетов видно, что требования вибропрочности ограничили степень планарности конструкции блока, что привело к уменьшению допустимой удельной мощности рассеивания и, следовательно, к некоторому увеличению объема и габаритов блока.

3.2.3. Выбор оптимального объема блока МЭА по нескольким критериям конструирования

При конструировании блоков МЭА для обеспечения требуемых свойств их конструкций, таких, как малые масса и объем, высокая вибро- и ударопрочность, допустимая теплонапряженность, электромагнитная совместимость, технологичность изготовления, при заданной функциональной сложности устройства необходимо руководствоваться одновременно несколькими критериями выбора его формы и объема. Ранее уже отмечалось влияние требований вибропрочности и теплонапряженности на этот выбор. Введем дополнительно еще несколько критериев выбора, а именно: критерии рационального размещения МСБ в ФЯ, оптимального выбора высоты ФЯ и технологически допустимой толщины несущей конструкции. Поясним их более подробно.

Сложность микроэлектронного устройства выполняемого в виде моноблока, можно характеризовать числом МСБ ($N_{\text{МСБ}}$) различного типа, определяемым по выбранной электрической схеме. Поскольку размеры МСБ могут быть различными, то рекомендуется определять это число числом эквивалентных МСБ ($N_{\text{МСБ (э)}}$), например размером 24×30 мм, получаемым делением общей (полезной) площади всех МСБ устройства $S_{\text{МЭУ}}$ на площадь одной эквивалентной МСБ $S_э$.

Имея в наличии данные о количестве эквивалентных МСБ определенного размера, форму которых стремятся многократно повторить, конструктор может выбрать несколько вариантов их размещения в ФЯ, отличающихся числом ФЯ ($r_{\text{я}}$), их размерами ($a \times b$) и формой ($\psi = a/b$), где a — длинная сторона плоскости ФЯ. Рациональными вариантами размещения МСБ в ФЯ будут считаться те, в которых отсутствует необоснованная потеря площади. Поскольку общее количество МСБ $N_{\text{МСБ}}$ определяет полезную

площадь устройства $S_{\text{МЭУ}}$, а ячейки для оптимальной их компоновки в пакет должны иметь унифицированные размеры, в том числе и по площади $S_{\text{я}}=ab$, то число ячеек выбирается из уравнения

$$r_{\text{я}} \geq \frac{S_{\text{МЭУ}} q_{S(\text{я})}}{S_{\text{я}}} \approx \frac{N_{\text{МСБ}(\text{я})} S_{\text{я}} q_{S(\text{я})}}{S_{\text{я}}}, \quad (3.11)$$

где $q_{S(\text{я})}$ — коэффициент дезинтеграции площади в ячейке:

$$q_{S(\text{я})} = S_{\text{я}} / S_{\text{я}} N_{\text{МСБ}(\text{я})}; \quad (3.12)$$

$N_{\text{МСБ}(\text{я})}$ — число эквивалентных МСБ в ФЯ.

Из вышерассмотренных компоновочных схем ФЯ на бескорпусных и корпусированных МСБ на металлических рамках, крупноформатных подложках и печатных платах следует, что наиболее типичным является размещение МСБ в ряд как по горизонтали, так и по вертикали, т. е.

$$N_{\text{МСБ}(\text{я})} = n'_x n'_y, \quad (3.13)$$

где n'_x , n'_y — количество МСБ в ряду по горизонтали и по вертикали соответственно. Это условие является отправным для выбора площади и формы ФЯ.

Таким образом, варианты выбора размещения должны отвечать требованиям одинакового количества МСБ в каждой ячейке и такого заполнения ее площади, при котором коэффициент дезинтеграции площади не превышает величины, обусловленной лишь необходимыми потерями на трассировку и увеличение жесткости, например с помощью ребер жесткости, несущей конструкции (платы, рамки). Незаполненных установочных мест (окон) в ФЯ не должно быть. Варианты, в которых это может быть, отбрасываются.

Высота ФЯ ($h_{\text{я}}$) определяется толщиной несущей конструкции (h_0), односторонним ($\alpha=1$) или двусторонним ($\alpha=2$) расположением МСБ и ЭРЭ на ней и величиной допустимого зазора между ФЯ, определяемого через глубину установки ($h_{\text{г}}$) МСБ и ЭРЭ в ФЯ. Например, для варианта печатных плат $h_{\text{г}}=\Delta/\alpha$, где Δ — расстояние между соседними платами; для варианта металлических рамок $h_{\text{г}} \approx (h_{\text{рам}} - h_0)/\alpha$, где $h_{\text{рам}}$ — высота рамки. Глубина установки определяется максимальной высотой устанавливаемых МСБ и ЭРЭ и требуемыми воздушными зазорами между ними в соседних ФЯ. В ряде случаев она может определяться требованиями электромагнитной совместимости, например в случае экранированных СВЧ ФЯ расстояние от экрана до поверхности МСБ не должно быть меньше 3,5 ... 4 мм для того, чтобы потери, вносимые экраном, не уменьшали добротность частотно-избирательных узлов или микрополосковых линий.

В общем случае высота ячейки определяется как

$$h_{\text{я}} = (\alpha x + 1) h_0, \quad (3.14)$$

где

$$\kappa = h_y / h_0 \quad (3.15)$$

— коэффициент увеличения жесткости пластины за счет ее ребрения.

Оптимизация высоты ячейки состоит в выборе такой ее минимально допустимой величины, при которой обеспечиваются требования допустимой глубины установки и допустимой толщины несущей конструкции.

Допустимая толщина несущей конструкции в свою очередь зависит как от требования заданной вибропрочности, так и от возможности ее технологического изготовления, например изготовления тонкой металлической планки методами литья. Ограничения последнего критерия должны выбираться из технологических норм на процессы изготовления.

Ограничения на минимально допустимую толщину плоской необребренной несущей конструкции из условий заданной вибропрочности можно определить из формулы (3.9) следующим образом:

$$h_0 \geq f_{0 \text{ доп}} a^2 / k_m k_b C \cdot 10^3 \text{ [мм]}. \quad (3.16)$$

Величина k_m определяется выбором материала и может быть найдена по таблицам [3.6]. Величины k_b и C также определяются по таблицам [3.6], однако они могут быть линеаризованы и представлены как

$$k_b = a_1 + a_2 S_y, \quad (3.17)$$

$$C = a_3 + a_4 \psi, \quad (3.18)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 — коэффициенты линейных уравнений аппроксимирующих функций. Частота $f_{0 \text{ доп}}$ определяется по заданному значению величины перегрузки n_G и допустимым значениям амплитуды и виброскорости для плоской пластины. Учитывая, что $S_y = ab$ и $\psi = a/b$, окончательно получаем

$$h_0 \geq \frac{f_{0 \text{ доп}} \psi S_y}{k_m (a_1 + a_2 S_y) (a_3 + a_4 \psi) \cdot 10^3} \text{ [мм]}. \quad (3.19)$$

Наконец, искомая величина оптимизации — объем блока — выражается как

$$V_6 = q_{V \text{ [ФЯ-Б]}} V_{\text{пак}}, \quad (3.20)$$

где

$$V_{\text{пак}} = r_y h_y S_y \quad (3.21)$$

— объем пакета ФЯ; $q_{V \text{ [ФЯ-Б]}}$ — коэффициент дезинтеграции объема от уровня ФЯ к блоку при их корпусировании.

Таким образом, анализируя представленные выражения, можно отметить следующий порядок определения минимально допустимого объема блока по рассматриваемым критериям:

1) по заданной функциональной сложности устройства (числу микросборок и их типоразмерам) рассчитывается число эквива-

лентных МСБ, их суммарная полезная площадь и площадь с учетом дезинтеграции в ФЯ;

2) выбираются рациональные варианты размещения МСБ в ФЯ и определяются для каждого из них площади ячейки $S_{я}$, коэффициенты формы ψ и число ячеек $r_{я}$;

3) по заданной величине перегрузки и допустимым значениям амплитуды вибраций и виброскорости для плоской пластины находится допустимая собственная частота конструкции;

4) для выбранного материала несущей конструкции и способа заземления пластины определяются значения k_m и виды линейризованных уравнений (3.17), (3.18), после чего рассчитываются по формулам (3.19), (3.15) зависимости $h_0=f_1(S_{я})$ и $h_y=f_2(S_{я})$ для разных коэффициентов формы ψ и разных коэффициентов увеличения жесткости k , если несущая конструкция имеет ребра жесткости;

5) по графикам полученных зависимостей для выбранных вариантов размещения МСБ в ФЯ рассчитываются значения h_0 , h_y и $h_{я}$; заведомо неоптимальные случаи исключаются, а остальные рассматриваются дальше с учетом обеспечения условий $h_0 \geq h_{0min}$ по критериям вибропрочности и технологичности изготовления и $h_y \geq h_{ymin}$ по критерию возможности установки МСБ и ЭРЭ на заданной глубине в ячейке или электростатического экранирования. Оптимизация высоты ячейки проводится по варианту размещения, коэффициентам формы и увеличения жесткости несущей конструкции, в результате определяется оптимальный объем и форма блока;

6) по методике примера 3.3 делается проверка обеспечения нормальных теплонапряженностей в блоке по заданной величине потребляемой мощности; при неудовлетворении этого условия объем и форма блока корректируются.

Пример 3.5. Требуется определить оптимальный объем блока микроэлектронного устройства из бескорпусных МСБ на металлических рамках, работающего в диапазоне частот вибраций 50...5000 Гц с допустимыми перегрузками $n_g=15$ и в температурных условиях, оговоренных в примере 3.3. Сложность устройства составляет 96 эквивалентных МСБ размером 24×30 ($S_g=7,2$ см²). Потребляемая мощность не более 50 Вт. Компонентная схема — односторонняя ($\alpha=1$) ФЯ с соотношением ширины ребра жесткости к ширине окна $b_1/b_0=0,05$. Материал рамки — алюминиевый сплав ($k_m=0,95$). Технологически допустимое значение $h_{0min}=0,8$ мм, а из условий установки ИС и ЭРЭ $h_{ymin}=4$ мм.

Суммарная полезная площадь МСБ равна $S_{мэу}=96 \cdot 7,2=691,2$ см², площадь с учетом дезинтеграции составит $S_{мэуqS(я)}=691,2 \cdot 1,736=1200$ см².

Коэффициент дезинтеграции площади был определен из геометрии ФЯ как $q_{S(я)}=(1+k_x)(1+k_y)$, а величины коэффициентов зазоров приняты равными $k_x=0,22$; $k_y=0,42$.

Рациональными вариантами размещения МСБ в ячейке являются следующие:

1. $r_{я}=2$, $S_{я}=600$ см², $a=350$ мм, $b=175$ мм, $\psi=2$, $N_{МСБ(я)}=48$,

$n'_x=8$, $n'_y=6$;

2. $r_{я}=4$, $S_{я}=300$ см², $a=b=175$ мм, $\psi=1$, $N_{МСБ(я)}=24$, $n'_x=4$,

$n'_y=6$;

3. $r_y = 4$, $S_y = 300 \text{ см}^2$, $a = 260 \text{ мм}$, $b = 122 \text{ мм}$, $\psi = 2$, $N_{\text{МСБ}}(я) = 24$,
 $n'_x = 6$, $n'_y = 4$;
 4. $r_y = 6$, $S_y = 200 \text{ см}^2$, $a = 175 \text{ мм}$, $b = 122 \text{ мм}$, $\psi = 1,5$, $N_{\text{МСБ}}(я) = 16$,
 $n'_x = n'_y = 4$.

Способ закрепления рамки — защемление по двум длинным сторонам.

Допустим, что для выбранного варианта $f_{\text{доп}} = 1 \text{ кг/с}^2$.

Для уменьшения допустимой толщины планок рамки воспользуемся рекомендациями [3.7], а именно созданием в конструкции ФЯ ребер жесткости. Как показывает анализ графиков увеличения жесткости $I/I_0 = f(h/h_0)$ [3.7, с. 234] для случая $b/b_0 = 0,05$, эта зависимость близка к параболе [для наших обозначений $k_{\text{ж}}/k_{\text{ж}0} = (h/h_0)^2 = \chi^2$ при $b_1/b_0 = 0,05$], а поскольку изменение собственной частоты прямо пропорционально корню квадратному из изменения жесткости

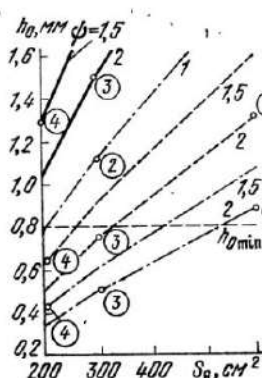


Рис. 3.25. Зависимость минимально допустимой толщины несущей конструкции по критерию вибропрочности от установочной площади ячейки для разных коэффициентов формы и увеличения жесткости:

— $\chi = 2$; — — — $\chi = 4$;
 - - - - $\chi = 6$

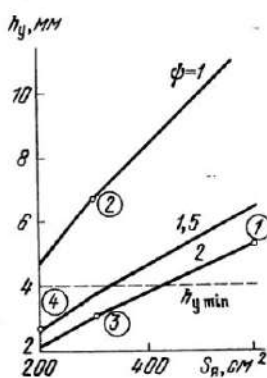


Рис. 3.26. Зависимость глубины установки МСБ в ФЯ от установочной площади ячейки для разных коэффициентов формы по критерию вибропрочности

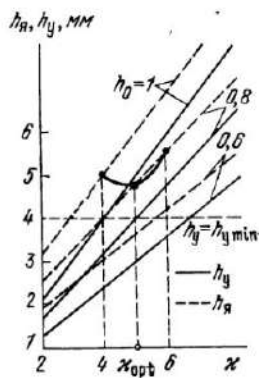


Рис. 3.27. Графики для определения минимальной высоты ячейки (оптимального χ)

[см. формулу (3.6)], то можно считать, что увеличение жесткости конструкции в χ^2 раз увеличивает собственную частоту конструкции рамки по сравнению с необребренной пластиной в χ раз. Следовательно, для обеспечения той же вибропрочности рамки можно уменьшить допустимую толщину планок рамки также в χ раз. Рабочая формула для этого случая примет вид

$$h_0 \geq \frac{f_{\text{доп}} \psi S_y}{\chi k_M (a_1 + a_2 S_y) (a_3 + a_4 \psi) \cdot 10^3} [\text{мм}]. \quad (3.22)$$

Из табличных данных [3.6] получим аппроксимирующие зависимости для нашего случая: $k_M = 0,66 + 0,0004 S_y$ и $C = -150 + 210 \psi$. Далее по формуле (3.22) для выбранных вариантов S_y , ψ и $\chi = 2, 4, 6$ рассчитаем зависимости h_0 из условий вибропрочности и построим их графики (рис. 3.25). По выражению (3.15) рассчитаем и построим зависимости $h_y = f_2(S_y)$ (рис. 3.26) для разных ψ (как видно из формулы, величина h_y не зависит от χ , так как с изменением χ

величина h_0 обратно пропорционально изменяется в такое же число раз). На графиках отмечены минимально допустимые значения $h_{0\min}$ из условий технологичности изготовления планок и $h_{y\min}$ из условий сборки ИС и ЭРЭ в ячейке. Цифрами в кружках около точек на графиках отмечены принятые нами варианты размещения МСБ в ячейках. Для этих вариантов рассчитаем значения h_y и h_{π} , сведем их в табл. 3.2 и проведем анализ вариантов.

Таблица 3.2

Номер варианта	ψ	κ	h_0 , мм	h_y , мм	h_{π} , мм
1	2	4 6	1,3 0,87	5,2 5,22	6,5 6,09
2	1	6	1,12	6,72	7,84
3	2	2 4 6	1,5 0,75 0,5	3,0 3,0 3,0	4,5 3,75 3,5
4	1,5	2 4 6	1,29 0,64 0,43	2,58 2,56 2,58	3,87 3,2 3,01

Таблица 3.3

Номер варианта	ψ	κ	h_0 , мм	h_{π} , мм
3	2,0	2 4 6	2,0 1,0 0,8	6,0 5,0 5,6
4	1,5	2 4 6	2,0 1,0 0,8	6,0 5,0 5,6

Из данных табл. 3.2 следует, что:

— вариант 2 необходимо исключить, так как величины h_y и h_{π} слишком значительные;

— варианты 3 и 4 не обеспечивают условия $h_y \geq h_{y\min}$ и в большинстве подвариантов условие $h_0 \geq h_{0\min}$;

— наиболее близким к оптимальному является вариант 1 при $\kappa=6$.

Однако в вариантах 3 и 4 значения h_0 являются лишь минимально допустимыми по критерию вибропрочности и ничто не мешает выбрать их больше при тех же значениях κ для обеспечения минимально допустимого зазора $h_y = h_{y\min} = 4$ мм. Приняв это условие, определим для этих вариантов значения h_0 и h_{π} и сведем в табл. 3.3.

Из данных табл. 3.3 видно, что минимальная высота ячейки возможна в обоих вариантах при $\kappa=4$. Варианты отличаются между собой формой и площадью ячейки. В обоих вариантах имеются запасы по h_0 , т. е. имеется дальнейшая возможность уменьшить h_{π} при выполнении $h_0 \geq h_{0\min}$ за счет оптимального выбора ψ и κ . Изменять форму ячейки в нашем случае нецелесообразно, так как при этом может ухудшиться размещение МСБ в ячейке.

Будем определять $\kappa_{\text{опт}}$. Для этого по выражениям $h_{\pi} = (\kappa+1)h_0$ и $h_y = \kappa h_0$ построим зависимости этих величин от κ при $h_0=0,6$; 0,8 и 1 мм (рис. 3.27). Поскольку $h_0=0,6$ мм $< h_{0\min}$, то этим условием в нашем примере воспользоваться нельзя, остаются два условия ($h_0=0,8$ мм и $h_0=1$ мм). При $h_0=0,8$ мм и $h_y=h_{y\min}=4$ мм имеем минимум $h_{\pi}=4,8$ мм при $\kappa=5$. Для соседних точек ($\kappa=6$, $h_0=0,8$ мм, $h_y=4,8$ мм > 4 мм, $h_{\pi}=5,6$ мм; $\kappa=4$, $h_0=1$ мм, $h_y=4$ мм, $h_{\pi}=5,0$ мм) значения высоты ячейки будут больше; таким образом, оптимальное значение $\kappa_{\text{опт}}=5$.

Далее найдем минимальный объем блока для двух вариантов его конструктивного воплощения: варианты 3 и 4 при $\kappa=5=\text{const}$. При этом учтем, что в варианте 4 число ФЯ больше, чем в варианте 3, и, как показывает график рис. 3.23, в случае меньшего «расплющивания» блока уменьшается B'_{π} , т. е. в варианте 4 теплоотдача будет хуже. Поэтому выбираем вариант 3. Объем пакета составит $V_{\text{пак}}=4 \cdot 300 \cdot 0,48=576$ см³, принимаем $q_V[\text{ФЯ}-\text{Б}]=1,5$, тогда $V_6=864$ см³. Определим поверхность теплоотдачи блока $S=2(AB+BH+AH)$, где A , B , H — размеры блока. Примем, что $A=a+8$ мм=268 мм, $B=b+6$ мм=128 мм и $H=r_{\pi}h_{\pi}+6$ мм=25,2 мм, тогда $V_6=864,4$ см³, $S=8,86$ дм². Отсюда $S/V=10,25$ 1/дм; $P_{\text{уд рас доп}}=4,8 \cdot 10,25=49,2$ Вт/дм³. Мощность, рассеиваемая

в блоке при $k_p=0,8$ равна $P_{рас}=k_p P_0=0,8 \cdot 50=40$ Вт, а удельная мощность рассеивания $P_{уд рас}=40/0,8644=46,3$ Вт/дм³ < 49,2 Вт/дм³, т. е. условие обеспечения допустимой теплонапряженности также удовлетворяется, поэтому выбранный конструктивный вариант остается оптимальным.

3.3. Количественная оценка массы комплекса микроэлектронной аппаратуры на этапе технического предложения

Важной задачей этапа технического предложения при конструировании комплексов МЭА является оценка возможностей обеспечения по заданным функциональным (электрическим) параметрам устройств комплекса их материальных параметров и, как правило, количественное сравнение их с параметрами прототипа. Наиболее полное сравнение может быть проведено с помощью удельных коэффициентов (см. § 1.1) конструкции устройств, а также частично с помощью удельных и относительных показателей конструкции (см. § 3.2).

Сложность количественной оценки на этапе технического предложения таких материальных параметров комплекса МЭА, как масса и объем, определяется тем, что в этот период отсутствуют исходные для их расчета конструкторские документы (сборочные чертежи узлов, функциональных ячеек, блоков). Основным исходным документом на этом этапе является электрическая функциональная или принципиальная схема. На ее основе возможны количественные оценки надежности, потребляемой мощности, стоимости. Зная величину потребляемой мощности и задаваясь допустимой величиной удельной мощности рассеивания, определяющей тепловую напряженность конструкций, можно определить минимально допустимый объем конструкций устройств и комплекса в целом. Остается оценить массу комплекса и его отдельных устройств, причем с достаточной инженерной точностью.

Эта задача с учетом требований комплексной микроминиатюризации и прогрессивных методов конструирования МЭА может быть решена, если руководствоваться следующими положениями:

- любой комплекс МЭА независимо от его назначения и объема установки может содержать специфичные по своей конструкции устройства (антенны, мощные передатчики, индикаторы и др.) и устройства, выполняемые на микросборках;

- оценка масс специфичных конструкций устройств может базироваться на опыте разработок прототипов в отечественной и зарубежной практике или на расчете удельных коэффициентов этих устройств;

- при расчете массы комплекса МЭА предполагается известной масса кабельной сети между устройствами комплекса;

- устройства, выполняемые на МСБ, могут содержать определенное число ФЯ цифрового, аналогового и силового типов; последние являются децентрализованными встроенными вторичными источниками питания (ВИП), построенными на силовых микросхемах;

— каждая МСБ в зависимости от того, какие функции электрической схемы и какое их число она в себя «вбирает», обладает определенной массой, которая для «типовой» МСБ размером, например, 24×30 мм, может быть конкретно рассчитана для цифрового, аналогового и силового типов; если размеры МСБ отличаются от размеров типовой МСБ, но кратны им, то пересчет масс не вызывает затруднений;

— общее число МСБ и конкретное их содержание в ФЯ разных типов определяется из функциональной электрической схемы каждого микроэлектронного устройства (МЭУ), число и массы дополнительных электрорадиоэлементов (ЭРЭ), совместимых с МСБ, также определяются из электрических схем;

— для пересчета масс МСБ и ЭРЭ в массы ФЯ, блоков, панелей и микроэлектронной части комплекса используются известные средние значения коэффициентов дезинтеграции массы от МСБ к ФЯ ($q_{m[МСБ-ФЯ]}$) различного типа, от ФЯ к блоку Б или панели П ($q_{m[ФЯ-Б]}$, $q_{m[ФЯ-П]}$) и от блока (панели) к комплексу К ($q_{m[Б(П)-К]}$).

Прежде чем сформулировать порядок расчета массы комплекса МЭА на этапе технического предложения, остановимся на рассмотрении существующих методов компоновки МЭУ в комплекс, которые в значительной мере отличаются по величине коэффициентов дезинтеграции массы и порядку расчета массы комплекса.

Так, при блочном методе компоновки МЭУ в комплекс каждое микроэлектронное устройство корпусируется в виде блока, а затем набор блоков komponуется на раме или в стойке в комплекс. Суммарный коэффициент дезинтеграции массы в этом случае будет равен $q_{m\Sigma}^I = q_{m[МСБ-ФЯ]}^I q_{m[ФЯ-Б]}^I q_{m[Б-К]}^I$.

При моноблочном методе компоновки МЭУ их комплекс обычно выполняется в виде корпусированного контейнера или моноблока, внутри которого находится пакет крупноформатных ФЯ (панелей). Наиболее перспективной формой такой панели для МЭА являются крупноформатные (300×450 мм) подложки на металлическом основании или гигантские МСБ [3.10]. Цепочка компоновочных уровней будет следующей: МСБ—П—К. Суммарный коэффициент дезинтеграции массы равен $q_{m\Sigma}^{II} = q_{m[МСБ-П]}^{II} q_{m[П-К]}^{II}$.

Оценим разницу в суммарных коэффициентах дезинтеграции массы при различных методах компоновки МЭУ в комплекс. Наибольшее значение коэффициента дезинтеграции массы принимает в 1-м варианте при переходе от МСБ к ФЯ, а во 2-м варианте — от МСБ к панели. Объясняется это значительной добавкой массы рамок и металлического основания. В первом приближении можно считать, что

$$q_{m[МСБ-ФЯ]}^I \approx q_{m[МСБ-П]}^{II} \quad (3.23)$$

Поскольку приемы корпусирования пакета ячеек или пакета панелей мало чем отличаются друг от друга, то для обоих вариан-

тов можно принять примерное постоянство коэффициентов дезинтеграции на этом уровне, а именно:

$$q_{m[\text{ФЯ}-\text{Б}]}^{\text{I}} \approx q_{m[\text{П}-\text{К}]}^{\text{II}}. \quad (3.24)$$

Тогда с учетом выражений (3.23), (3.24) выигрыш по массе при моноблочном методе компоновки может быть определен как

$$B_m = q_{m\Sigma}^{\text{I}} / q_{m\Sigma}^{\text{II}} = q_{m[\text{Б}-\text{К}]}^{\text{I}}.$$

Приведем порядок расчета массы комплекса МЭА на этапе технического предложения для обоих вариантов.

Порядок расчета массы комплекса для блочного метода компоновки:

1) по заданной электрической функциональной схеме для каждого i -го из k микроэлектронных устройств проводится его функциональное и конструктивное расчленение на r функциональных ячеек цифрового типа, n — аналогового и l — силового типа;

2) по выбранной элементной базе и числу «вбираемых» функций для «типовой» МСБ каждого типа определяется средняя масса, например для цифровой МСБ — m_1 , аналоговой — m_2 и силовой — m_3 ;

3) для каждой ФЯ i -го устройства определяется из электрической принципиальной схемы число комплектующих МСБ и масса дополнительных ЭРЭ; например для цифровой ФЯ соответственно $p_{1\text{ЭРЭ}}$ и $m_{1\text{ЭРЭ}}$, для аналоговой — s и $m_{2\text{ЭРЭ}}$, для силовой (ВИП) — t и $m_{3\text{ЭРЭ}}$;

4) рассчитываются активные (полезные) массы МСБ и ЭРЭ, входящих в каждую цифровую, аналоговую и силовую ФЯ i -го МЭУ соответственно: $m_{N1} = pm_1 + m_{1\text{ЭРЭ}}$, $m_{N2} = sm_2 + m_{2\text{ЭРЭ}}$, $m_{N3} = tm_3 + m_{3\text{ЭРЭ}}$;

5) определяется масса пакета ячеек i -го МЭУ с учетом коэффициентов дезинтеграции массы для выбранных компоновочных схем этих ячеек:

$$m_{\text{МЭУ } i} = q_{m[\text{МСБ}-\text{ФЯ}]_1} m_{N1} r + q_{m[\text{МСБ}-\text{ФЯ}]_2} m_{N2} n + q_{m[\text{МСБ}-\text{ФЯ}]_3} m_{N3} l;$$

6) рассчитывается масса блока i -го МЭУ с учетом коэффициента дезинтеграции массы в блоке: $m_{B_i} = q_{m[\text{ФЯ}-\text{Б}]} m_{\text{МЭУ } i}$;

7) находится суммарная масса блоков МЭУ с учетом их дезинтеграции в комплексе: $m_{\Sigma \text{МЭУ}} = q_{m[\text{Б}-\text{К}]} \sum_{i=1}^k m_{B_i}$;

8) определяются суммарная масса специфических конструкций устройств $m_{\Sigma \text{сп}}$, масса кабельной сети $m_{\text{каб}}$ и рассчитывается реально возможная при выбранном методе компоновки масса ком-

плекса МЭА:

$$m_K = m_{\Sigma \text{ МЭУ}} + m_{\Sigma \text{ сп}} + m_{\text{каб}}. \quad (3.25)$$

Порядок расчета массы комплекса для моноблочного метода компоновки:

1) по заданной электрической структурной схеме комплекса проводится функциональное и конструктивное его расчленение на k панелей;

2) для выбранной элементной базы и числа «вбираемых» функций для «типовых» МСБ цифрового, аналогового и силового типов аналогично изложенному выше рассчитываются средние массы m_1, m_2, m_3 ;

3) для каждой i -й панели определяются число цифровых МСБ (p), аналоговых (s) и силовых (t), а также масса дополнительных ЭРЭ ($m_{\text{ЭРЭ}}$), компонуемых в отдельных окнах панели на печатных вставках;

4) рассчитываются активные (полезные) массы МСБ и ЭРЭ, входящих в каждую i -ю панель $m_{N_i} = pm_1 + sm_2 + tm_3 + m_{\text{ЭРЭ}}$;

5) рассчитывается масса i -й панели с учетом коэффициента дезинтеграции массы от МСБ к панели: $m_{\Pi_i} = q_{m[\text{МСБ}-\Pi]} m_{N_i}$;

6) определяется масса пакета панелей: $m_{\text{пак}} = \sum_{i=1}^k m_{\Pi_i}$;

7) рассчитывается масса моноблока МЭУ комплекса с учетом их дезинтеграции при корпусировании пакета панелей: $m_{\Sigma \text{ МЭУ}} = q_{m[\Pi-K]} m_{\text{пак}}$;

8) определяются суммарная масса специфических конструкций устройств $m_{\Sigma \text{ сп}}$, масса кабельной сети $m_{\text{каб}}$ и рассчитывается по формуле (3.25) реально возможная при выбранном методе компоновки масса комплекса МЭА.

3.4. Способы обеспечения тепловых режимов, вибропрочности и герметичности конструкций МЭА

Повышение удельных показателей МЭА сопровождается увеличением плотности упаковки элементов и ведет к росту выделяемого в конструкции тепла. Поэтому, несмотря на способность конструкций МЭА рассеивать большие по сравнению с РЭА удельные тепловые мощности, проблема отвода тепла в МЭА остается одной из острых.

Для облегчения тепловых режимов МЭА используются различные системы охлаждения. Под системой охлаждения понимают совокупность устройств и конструктивных элементов, используемых для уменьшения локальных и общих перегревов. Системы

охлаждения принято классифицировать по способу передачи тепла, виду теплоносителя и источников тепла. В МЭА находят применение естественное и принудительное воздушное охлаждение, а также жидкостные и испарительные системы охлаждения. При естественном воздушном охлаждении тепло от элементов конструкции передается окружающей среде за счет естественной конвекции. Использование других систем охлаждения связано с введением в конструкцию элементов и устройств, которые содержат теплоноситель и задают режим его движения.

Поскольку способ охлаждения в значительной мере определяет конструкцию МЭА, то его **правильный выбор** уже на ранних стадиях конструирования является чрезвычайно важной и одновременно сложной задачей. Выбор способа охлаждения производится с помощью диаграммы, приведенной на рис. 3.28.

Исходными данными для выбора являются удельная тепловая мощность $P_0 = P/S$, где S — условная площадь поверхности конструкции, и допустимый перегрев конструкции θ . Условную площадь поверхности находят по выражению $S = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3 K_3]$, где L_1, L_2, L_3 — размеры конструкции МЭА; K_3 — коэффициент заполнения аппарата.

Определение способа охлаждения производится по положению на диаграмме точки, соответствующей P_0 и θ . Если точка попала в зону 1, то применяют естественное воздушное охлаждение, в зону 3 — принудительное воздушное охлаждение, в зону 5 — жидкостное охлаждение, в зону 9 — охлаждение испарением жидкости с прокачкой.

Заштрихованные области на диаграмме соответствуют следующим способам охлаждения: 2 — естественное и принудительное воздушное охлаждение, 4 — смешанное воздушно-жидкостное ох-

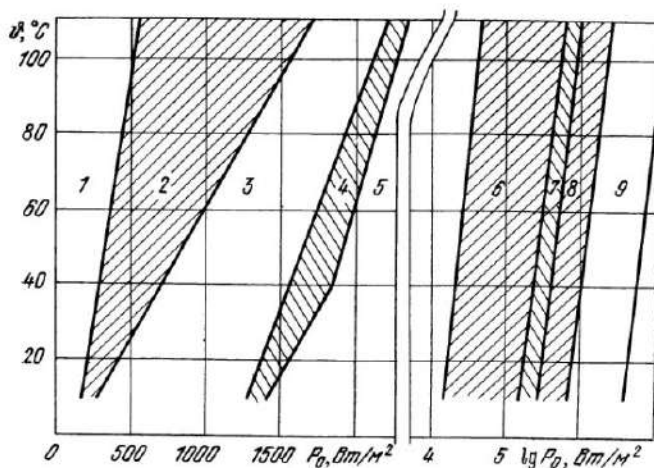


Рис. 3.28. Диаграмма для выбора способа охлаждения МЭА

лаждение, 6 — жидкостно-испарительное охлаждение без прокачки, 7, 8 — жидкостно-испарительное с прокачкой. Если точка попадает в заштрихованную зону, то способ охлаждения уточняется на последующих этапах конструирования.

Наиболее простым и доступным способом охлаждения МЭА является естественное воздушное охлаждение. Исходя из этого обратимся к обобщенной тепловой схеме блока МЭА (рис. 3.29), с помощью которой определим и проанализируем конструктивные способы обеспечения тепловых режимов при естественном воздушном охлаждении.

Характеристиками теплового режима блока, указанными на схеме, являются температура в центре t_{30} и на поверхности t_3 нагретой зоны и температура корпуса блока t_k . Поверхности нагретой зоны и корпуса условно приняты за изотермические.

При заданной температуре окружающей среды t_c и суммарном тепловом потоке P температура в центре нагретой зоны t_{30} зависит от эквивалентной внутренней тепловой проводимости нагретой зоны σ_{30} . Температура на поверхности нагретой зоны t_3 определяется суммарной тепловой проводимостью от нагретой зоны к корпусу, которая складывается из конвективной $\sigma_{3к}$, лучевой $\sigma_{3л}$ и кондуктивной (с помощью теплопроводности) $\sigma_{3т}$ составляющих. И, наконец, температура корпуса блока t_k зависит от величин конвективной $\sigma_{кк}$ и лучевой $\sigma_{кл}$ проводимостей между корпусом и средой. Количественно эти зависимости выражаются соотношениями

$$t_k = t_c + P / (\sigma_{кк} + \sigma_{кл}), \quad (3.26)$$

$$t_3 = t_k + P / (\sigma_{3к} + \sigma_{3л} + \sigma_{3т}), \quad (3.27)$$

$$t_{30} = t_3 + P / \sigma_{30}. \quad (3.28)$$

Из (3.26) — (3.28) следует, что при характерной для МЭА и обусловленной повышением степени интеграции тенденции роста P снижение температур (или перегревов) в конструкциях возможно за счет увеличения тепловых проводимостей или, что то же самое, уменьшения тепловых сопротивлений в цепях передачи тепла. Остановимся на основных способах решения этой задачи.

Повышению внутренней эквивалентной тепловой проводимости нагретой зоны способствует использование в конструкциях МЭА функциональных ячеек на металлических рамках и установка микросборок на теплоотводящие планки. Высокая тепловая проводимость элементов рамки и хороший тепловой контакт между рам-

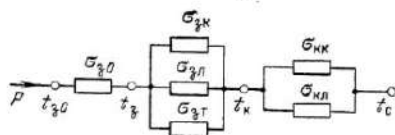


Рис. 3.29. Обобщенная тепловая схема блока МЭА

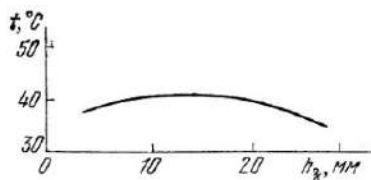


Рис. 3.30. Распределение температуры в нагретой зоне блока МЭА

ками при сборке функциональных ячеек в пакет обеспечивают теплофизические характеристики нагретой зоны, близкие к характеристикам анизотропного однородного тела. В подтверждение сказанного на рис. 3.30 приведено экспериментальное распределение температуры по высоте нагретой зоны блока МЭА объемом 0,9 дм³ при $P=5$ Вт. Нагретая зона блока состоит из пяти функциональных ячеек на металлических рамках, расположенных горизонтально. Источники тепла (бескорпусные МСБ) в нагретой зоне распределены равномерно. Как видно из рисунка, перепад температур по высоте нагретой зоны незначителен и не превышает 5°C.

Спецификой конструкций МЭА являются малые газовые зазоры между нагретой зоной и корпусом, которые не обеспечивают условий для конвекции. Поэтому тепло от нагретой зоны к корпусу передается преимущественно излучением и теплопроводностью через газовые прослойки и элементы конструкции. За счет высоких коэффициентов теплопроводности конструкционных материалов наиболее эффективен последний способ теплопередачи. Поэтому в конструкциях МЭА крайне важно обеспечить хороший тепловой контакт между элементами нагретой зоны и корпусом. При конструировании блоков МЭА это требование выполняется креплением пакета функциональных ячеек на бобышках основания корпуса. Площадь тепловых контактов и количество контактных точек нагретой зоны и корпуса следует выбирать так, чтобы одновременно удовлетворить требованиям улучшения массо-габаритных характеристик конструкции и обеспечения нормального теплового режима элементов.

В условиях естественного воздушного охлаждения суммарная тепловая проводимость от корпуса конструкции к среде зависит от площади поверхности конвективного и лучевого теплообмена (площади поверхности корпуса) и степени черноты поверхности. Поэтому повышение тепловой проводимости между корпусом и средой может быть достигнуто за счет увеличения площади поверхности, способствующей повышению степени черноты (чернение, оксидирование, покрытие эмалью и т. д.). Однако увеличение площади поверхности не согласуется с требованиями уменьшения массы и габаритов конструкции и по этим соображениям в ряде случаев неприемлемо. Лучшее решение может состоять в использовании, например, принудительного воздушного охлаждения.

По отношению к внешним механическим воздействиям МЭА характеризуется повышенной по сравнению с РЭА виброустойчивостью, вибро- и ударопрочностью. Это объясняется тем, что снижение массы элементов и повышение жесткости их крепления способствует повышению собственных частот и, следовательно, уменьшению числа опасных низкочастотных резонансов.

При малых величинах массы конструкции и ее элементов значительно снижаются разрушающие силы, возникающие при линейных ускорениях и ударах.

Устойчивость МЭА к механическим воздействиям во многом зависит от прочности МСБ и способа их крепления на планках функциональных ячеек. Слабым (с точки зрения механических воздействий) звеном конструкции МСБ являются проволоочные выводы навесных компонентов и переемы, число которых зависит от количества размещенных на подложке компонентов и может составлять десятки-сотни штук. Для обеспечения вибропрочности выводов накладываются ограничения на их длину и консольность (прогиб). При диаметре вывода d длина вывода $l \leq 100d$, консольность $C \leq 10d$. Монтаж выводов выполняется без перегибов и натяжения.

Установлено, что МСБ, обладающие достаточным запасом вибропрочности, заведомо прочны к воздействиям ударов и линейных ускорений.

Герметичность конструкций МЭА принято характеризовать величиной допустимой суммарной течи газа

$$B = \frac{Q p_0^2}{p_k^2 - p_0^2} \frac{\eta_r}{\eta_v} K,$$

где Q — допустимый поток газа, заполняющего внутренний объем конструкции; p_0 , p_k — давление окружающей среды и давление внутри корпуса конструкции соответственно; η_r , η_v — вязкость газа и воздуха соответственно при температуре 20°C ; $K \leq 1$ — коэффициент запаса.

Допустимый поток газа $Q = V(p_1 - p_2)/\tau$, где V — внутренний объем корпуса МЭА; p_1 , p_2 — соответственно начальное и конечное давление внутри корпуса; τ — время, за которое давление p_1 понизилось до величины p_2 . Для конструкций с объемом свободного газа $0,15 \dots 0,2 \text{ дм}^3$ степень герметичности, равная $6,65 \times 10^{-6} \text{ (дм}^3 \cdot \text{Па)}/^\circ\text{C}$, обеспечивает поддержание давления внутри корпуса близким к нормальному в течение восьми лет.

При жестких требованиях к герметичности герметизация МЭА выполняется методом пайки по шву. Конструкция соединения крышки корпуса блока МЭА с основанием приведена на рис. 3.20. В менее ответственных случаях герметизация конструкций МЭА производится с помощью резиновых уплотнительных прокладок, закладываемых по периметру соединений в специальный паз, и стягивания элементов соединения (крышки и основания корпуса) винтами или болтами. Срок службы уплотнительных прокладок не превышает 2—3 лет. Поэтому конструкции, герметизированные с помощью прокладок, нуждаются в проведении периодических регламентных работ.

3.5. Основные тенденции развития конструкций МЭА на микросборках

Современный этап развития МЭА характеризуется внедрением основных принципов комплексной микроминиатюризации (КММ), отражающих системный подход к проектированию и конструиро-

ванию систем, комплексов и устройств радиоаппаратуры. В вопросах формообразования конструкций МЭА эти принципы еще далеко не полностью нашли реальное воплощение. Так, все еще наблюдается значительная диспропорция между массой и объемом активной части конструкции (БИС, функциональными компонентами, навесными ЭРЭ), ее коммутацией (монтажом, разъемами) и несущими (механическими) конструкциями (платами, рамками, корпусами). Причем с дальнейшим развитием прогресса в электронной технике (увеличением степени интеграции ИС) эта диспропорция все более увеличивается. Доля активных (полезных) компонентов и элементов в общем балансе масс и объемов для МЭА на МСБ уже сейчас составляет лишь единицы, а в некоторых случаях и доли единиц процентов. Такое изменение соотношений масс и объемов с развитием техники конструирования объясняется значительным отставанием техники компоновки и монтажа, технологии изготовления несущих конструкций и отсутствием новых, более прочных, теплопроводных и технологичных материалов (металлов и диэлектриков).

В связи с этим основные тенденции развития конструкций МЭА на ближайшие годы должны учитывать и решать отмеченную проблему и могут иметь следующие направления:

- дальнейшее развитие и внедрение в практику конструирования ИС сверхвысокой степени интеграции и компонентов функциональной микроэлектроники;

- разработка новых принципов формообразования и компоновки МЭА;

- создание и промышленное освоение новых видов конструкционных материалов их технологии изготовления для значительного уменьшения доли несущих конструкций в конструкциях МЭА;

- совершенствование существующих и развитие новых принципов коммутации в микроэлектронных конструкциях;

- увеличение эффективности систем теплоотвода и уменьшение масс и объемов систем охлаждения, разработка новых принципов и методов охлаждения радиоаппаратуры.

Основная цель конструирования МЭА, как уже отмечалось, состоит в разработке таких конструкций, которые обладали бы максимально возможной плотностью упаковки ($\gamma_{\text{пл}} = \gamma_{\text{ИС}}/q_v$) при допустимых ограничениях по теплонапряженности, вибропрочности и т. п. и обеспечивали бы выполнение заданных по ТЗ функциональных параметров.

Первое направление развития конструкций МЭА решает эту задачу на уровне элементной базы, т. е. за счет значительного увеличения $\gamma_{\text{ИС}}$. В остальных направлениях ставятся задачи по уменьшению величины q_v , т. е. создания наиболее компактной конструкции на основе новых способов формообразования, компоновки, монтажа, новых видов материалов, несущих конструкций и способов теплоотвода.

Новые способы формообразования и компоновки (второе направление) были рассмотрены выше (см. § 3.1). Они характеризовались общим стремлением перехода от МЭА III поколения к МЭА IV поколения, позволяющей получать более компактные конструкции. Например, при таком переходе получаются средние выигрыши в объеме в 2 ... 4 раза и по массе в 1,5 ... 3 раза. Это достигается за счет исключения корпусов ИС из конструкций, а следовательно, уменьшения объема и массы не только за счет самих корпусов, но и за счет возможного при этом уменьшения конструктивных зазоров между ИС. Такой принцип конструирования МЭА IV поколения можно считать первым этапом выполнения задачи по уменьшению коэффициента дезинтеграции. Объясняется это тем, что в данном случае используются лишь частично возможности полной микроминиатюризации конструкций, а именно только полезного объема и массы, или объема и массы самих схемных элементов (ИС, БИС). Традиционные же способы конструирования несущих конструкций (плат, подложек) и монтажа остаются прежними, и в общем объеме и массе конструкции блока последние составляют значительную часть. Так, если для МЭА III поколения объем и масса активных (схемных) элементов (корпусированных ИС) составляют 15 ... 30%, а объем монтажа и несущих конструкций 70 ... 85%, то для МЭА IV поколения доля полезного объема и массы (бескорпусных ИС) обычно не превышает единиц процентов. Такая диспропорция между элементной базой и остальными элементами конструкции обусловлена установившимися способами их разработки, не согласующимися с принципами комплексной микроминиатюризации компоновки блоков и устройств.

Устранение этой диспропорции нашло отражение в создании и развитии конструирования гибких печатных схем [3.8] и крупноформатных пленочных подложек на металлическом основании [3.10] (третье направление). В конструкциях гибких печатных схем вместо жесткого основания печатной платы, выполненного из гетинакса, стеклотекстолита и их заменителей, имеющих толщину порядка 1 ... 1,5 мм, используются полиимидные пленки, толщина которых обычно составляет от 0,1 до 0,28 мм. Разрешающая способность печатных рисунков равна 0,25 ... 0,5 мм, однако в последнее время отработанная технология этих схем позволяет получить ее равной 0,08 ... 0,13 мм. Гибкие пленки обладают способностью сгибаться, сворачиваться, скатываться в рулон и скручиваться под углом (рис. 3.31), что позволяет создавать конструкции МЭА из них во всех трех измерениях в отличие от жестких печатных плат (двумерное пространство). Применение гибких печатных схем повышает надежность, уменьшает время сборки устройств на сотни часов и дает выигрыш в объеме и массе в 2 ... 4 раза по сравнению с применением жестких плат. При этом доля их объема и массы значительно уменьшается.

Крупноформатные подложки выполняются чаще всего на стальном листе толщиной 500 мкм с нанесенной на него путем обжига кера-

мической толсто пленочной основы толщиной 100 мкм либо на алюминиевом основании примерно той же или несколько большей толщины с наклеенной тонкопленочной полиимидной пленкой. Размеры таких подложек достигают 300×450 мм. Это позволяет обеспечить в конструкциях ФЯ высокие теплоотвод, вибропрочность, компактность и низкую стоимость при отсутствии печатных плат, рамок и подложек.

Эти принципы конструирования можно считать вторым этапом выполнения задачи по повышению компактности компоновки, основанном на микроминиатюризации несущих конструкций. В настоящее время это направление конструирования находится еще в начальном этапе освоения и внедрения в производство, что не в малой степени связано с консерватизмом конструкторов, привыкших работать с обычными печатными платами.

Четвертым направлением перспективного развития конструкций МЭА может явиться широкое внедрение оптических волноводных линий монтажа взамен гальванических соединений в блоках [3.9]. При этом методами интегральной технологии могут быть изготовлены оптоэлектронные устройства, объединенные на платах-подложках, пакет которых образует блок. Набор ФЯ и общая блочная оптическая плата с разъемом для межблочных волоконных соединений корпусируются. Такой может выглядеть конструкция микроэлектронного блока будущего (рис. 3.32) [3.9].

Основными элементами интегральной оптики являются оптический волновод, модулятор и ответвитель. Система оптических волноводов на плате, питаемых от общего источника света (лазер с мощностью порядка 100 ... 150 мВт), образует коммутацию платы. Переход светового луча с платы на плату осуществляется экoplanарными ответвителями (дифракционными решетками),

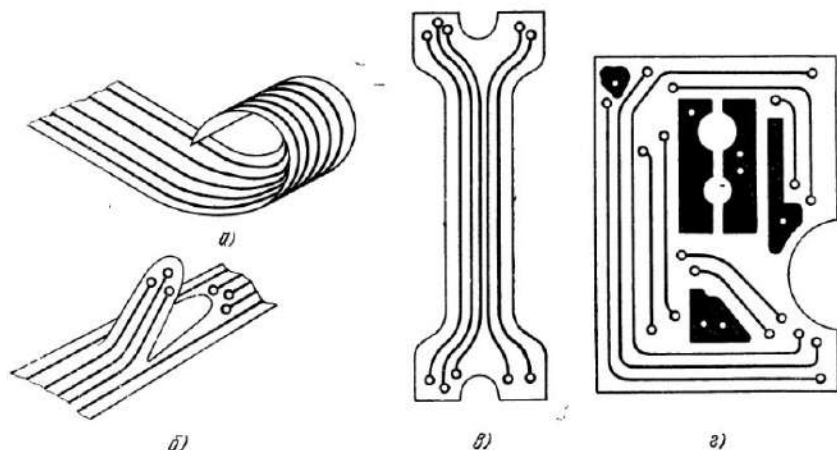


Рис. 3.31. Гибкие печатные конструктивы:

а — шлейф; б — монтаж с разводкой на ячейки; в — печатный «жгут»; г — печатная плата

а поворот луча в пределах платы — планарными ответвителями. Модулятор, представляющий решетку встречных штырей, преобразует электрический сигнал от логической схемы электронной части платы в световой. Логическая схема аналогично воспринимает световой сигнал через фотоприемное окно и управляется электрическими сигналами. По данным работы [3.9] применение таких интегральных схем с оптическими каналами связи (ИСОКС) по сравнению со схемами на гальванических связях в конструкциях МЭА может дать выигрыши в объеме субблока в 60 раз, в объеме блока из 100 субблоков — в 6 раз, по плотности упаковки — в 65 раз при увеличении потребляемой мощности в 1.3 раза.

В настоящее время разработаны не только принципы построения ИСОКС и блоков на их основе, но и элементы интегральной технологии их изготовления и оценены их технические характеристики, что позволяет считать этот перспективный метод конструирования технических реализуемых в недалеком будущем.

Пятое направление развития конструкций МЭА основано на уменьшении объема и массы теплопроводящих элементов конструкции за счет увеличения их теплопроводности и новых систем охлаждения и рассмотрено выше.

В заключение отметим, что полное решение вопросов КММ МЭА должно включать и вопросы уменьшения объема и массы кабельной сети (межблочной коммутации). В этом направлении перспективными являются методы мультиплексирования и волоконной оптики, которые находят все более широкое развитие.

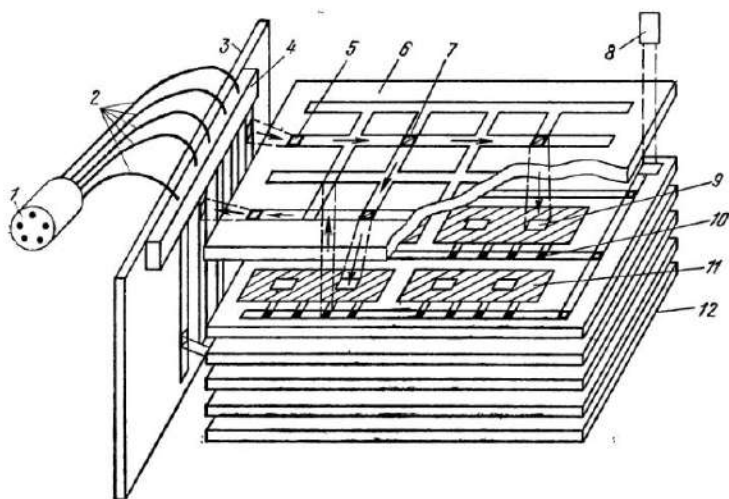


Рис. 3.32. Конструкция перспективного блока МЭА на ИСОКС:

1 — разъем; 2 — многоканальный волоконно-оптический кабель; 3 — блочная оптическая плата; 4 — разъем на плате; 5 — экспланарный ответвитель; 6 — волноводно-оптическая плата; 7 — планарный ответвитель; 8 — лазерный источник питания; 9 — фотоприемное окно; 10 — модулятор; 11 — зона ИС; 12 — схемная плата

Список литературы

- 3.1. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/ А. Г. Алексенко, С. С. Бадулин, Л. Г. Барулин и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977.—352 с., гл. 7.
- 3.2. Конструирование микроэлектронной аппаратуры/ Б. Ф. Высоцкий, А. И. Головин, В. В. Марков и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1975. — 120 с.
- 3.3. ОСТ 4ГО.010.009—76. Узлы и блоки РЭА на микросхемах. Конструирование.
- 3.4. Маттера Л. Пленочная технология — основное направление конференции по элементам электронной аппаратуры. — Электроника, 1977, № 7, с. 55—61.
- 3.5. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. — М.: Сов. радио, 1976. — 232 с.
- 3.6. Карпушин В. Б. Виброшумы радиоаппаратуры. — М.: Сов. радио, 1977. — 320 с.
- 3.7. Орлов П. И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие в 3-х книгах. — М.: Машиностроение, 1977, книга 1. — 624 с.
- 3.8. Лаймен. Гибкие схемы — новое средство конструирования аппаратуры. — Электроника, 1977, т. 50, № 19, с. 24—36.
- 3.9. Володин Е. Б., Свидзинский К. К. Перспективы применения элементов интегральной оптики в микроэлектронной аппаратуре. — Электронная промышленность, 1977, вып. 6 (60), с. 75—83.
- 3.10. Спектор. Платы, позволяющие разместить свыше тысячи ИС. — Электроника, 1979, № 6, с. 50—56.
- 3.11. Лаймен. Новые методы компоновки, повышающие плотность расположения элементов. — Электроника, 1978, т. 51, № 20, с. 35—48.

3

4. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ БГИС И МИКРОСБОРОК

Одним из следствий развития микроэлектроники является изменение методологии и принципов конструирования МЭА. При этом наиболее важные изменения связаны с повышением эффективности и качества проектно-конструкторских работ за счет их автоматизации на основе широкого использования ЭВМ, автоматизированных рабочих мест, устройств оперативного взаимодействия и полуавтоматического производственного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).

В этой главе даются краткие сведения о принципах построения автоматизированных систем конструирования (АСК) МСБ и МЭА. Приводятся основные данные по составу АСК, представленной автоматизированным рабочим местом проектировщика — конструктора РЭА под сокращенным названием АРМ-Р.

Приводятся также для иллюстрации решения конструкторских задач средствами АСК основы теории и алгоритмы автоматизированного разбиения электрических схем МЭА на МСБ и трассировки. Для более глубокого изучения вопроса можно воспользоваться перечнем литературы в конце главы.

4.1. Организация и состав средств автоматизированной системы конструирования БГИС и микросборок

Использование ЭВМ в конструкторском проектировании зависело от степени сложности решаемых задач. Первоначально ЭВМ применяли для облегчения и ускорения сложных и многократно повторяемых вычислений, выполнявшихся в процессе конструирования радиоэлектронной аппаратуры. Позднее ЭВМ стали выполнять более сложные логические задачи: контроль собственных действий, выпуск технической документации и др. Применение ЭВМ в конструкторском проектировании первоначально основывалось на принципе *замещения*, когда задачи решались в пакетном режиме обработки в основном на ЭВМ II поколения.

В конце 60-х годов сформировались новые принципы использования ЭВМ в конструкторском проектировании, развитие которых привело к появлению *автоматизированного проектирования*, под которым понимается такой метод проектирования, при котором в процессе разработки нового устройства используется форма взаимодействия конструктора с ЭВМ, основанная на отношении *дополнительности* [4.3].

Отношение *дополнительности* принципиально отличается от отношения *замещения*, поскольку оно основывается на разделении функций между конструктором и ЭВМ в процессе проектирования. Это разделение предполагает такую специализацию и такое развитие сторон, которые позволяют обоим партнерам наиболее полно и в наилучшей комбинации использовать свои индивидуальные качества для решения поставленных задач.

За инженером конструктором остаются такие виды деятельности, как:

- принятие решений и инженерное творчество;
- осмысление проблемы, определение цели, содержания проекта и постановка задачи проектирования;
- выбор критериев оценок при решении конструкторских задач синтеза, анализа, оптимизации и контроля;
- постановка задач синтеза, анализа, оптимизации и контроля конструктивов МЭА;
- выбор наилучшего решения.

В качестве помощника при воплощении в жизнь решений конструктора ЭВМ выступает благодаря своим исключительным возможностям по обработке, сбору, накоплению, систематизации, хранению, оперативному поиску и отображению в удобной для конструктора форме различной информации, представляющей собой накопленный опыт, специальные знания, методы решения конструкторских задач, справочные и оперативные данные, промежуточные и окончательные результаты этапов проектирования МЭА.

Отношение *дополнительности* стало возможным в процессе машинного проектирования РЭА и МЭА только с появлением ЭВМ III поколения и особенно с внедрением автоматизированных рабочих мест радиоинженеров на базе СМ ЭВМ.

Автоматизированные системы конструирования МЭА представляют собой системотехнический комплекс, состоящий из аппаратных, программных, регламентирующих и информационных средств, используемых разработчиками для автоматизированного конструирования и технологической подготовки производства МЭА.

Аппаратные средства АСК включают центральные и периферийные ЭВМ со штатными внешними устройствами (устройства ввода — вывода перфолент и перфокарт, алфавитно-цифровое печатающее устройство и долговременная память на магнитных дисках, магнитных барабанах и магнитной ленте, графопостроители, дисплеи, кодировщики графической информации и др.).

Программные средства — важнейший компонент АСК. Именно программные средства объединяют все остальные, достаточно универсальные и независимо используемые компоненты АСК в единое целое. Они определяют специализацию системы, степень и характер использования ЭВМ в процессе конструирования, обеспечивают возможность перестройки и дальнейшего развития каждой конкретной АСК.

Программные средства АСК — сложная организация многих и разных по назначению процедур, для которых характерны: иерархическая структура, многоуровневое управление, специализация и стандартизация функций, выполняемых отдельными процедурами. В общей структуре программных средств АСК выделяются три основные части: системная, операционная и стандартная.

Системная часть программных средств, язык управления процессом конструирования и аппаратные средства, обеспечивающие возможность взаимодействия конструктора с ЭВМ в интерактивном режиме проектирования, организуют отношение дополнителности между конструктором и ЭВМ и являются теми отличительными элементами, при наличии которых комплекс проблемно-ориентированных программ вместе с другими более универсальными средствами становится АСК. Системная часть программных средств обеспечивает выполнение важнейших функций АСК: организацию и реализацию взаимодействия компонентов системы и конструктора в процессе разработки РЭА и МЭА, а также координацию и управление используемыми процедурами. Системная часть программных средств содержит обычно управляющие программы, организующие взаимодействие проектировщика с основными компонентами АСК на всем протяжении процесса конструирования, начиная с ввода задания на конкретное конструирование, а также программы-диспетчеры, которые обеспечивают отбор, установление порядка работы, взаимосвязь и управление операционными и стандартными процедурами, используемыми при каждом решении конкретной задачи конструирования МЭА.

Операционная часть программных средств представляет собой содержательную часть АСК и включает программы, реализующие методы решения задач синтеза, анализа, оптимизации, контроля и т. д.

Стандартная часть программных средств АСК содержит средства автоматизации программирования, программы, обеспечивающие работу различных архивов, вводимых в систему для оперативного получения справочной информации, используемой в процессе автоматизированного конструирования, хранения промежуточных и окончательных результатов, накопления каталога готовых конструкторских решений (опыта работы АСК), а также программы контрольных операций, формирования технической документации на конструктивы, вывода результатов на специализированные внешние устройства и т. д.

Программные средства в овеществленной и доступной для многократного использования форме отображают знания, навыки, опыт высококвалифицированных конструкторов и создателей АСК и дают им возможность опосредованно участвовать во многих конкретных разработках, осуществляемых с использованием данной системы.

Программные средства АСК должны позволять совершенствовать и развивать как структуру, так и функции системы, обеспечивать пополняемость и замену частей, блоков и отдельных программ, входящих в систему. Этим требованиям наилучшим образом удовлетворяет библиотечный принцип построения структуры программных средств с набором независимо запрограммированных модулей. Последние должны быть доступны и пригодны для работы конструктора в режиме оперативного взаимодействия с системой (интерактивном режиме).

Под регламентирующими средствами АСК понимаются две системы стандартов, определяющих правила взаимодействия разработчиков МЭА в процессе конструирования с АСК и правила выполнения и обращения машинной документации.

Информационными средствами АСК являются данные трех видов: управляющие, предназначенные для управления процессом конструирования, проектные данные о конструируемом изделии и служебные, предназначенные для поиска сведений о конструкции. Информационные средства, хранящиеся на машинных носителях, будем называть банком данных АСК. В процессе эксплуатации АСК ее банк данных постоянно пополняется информацией.

АСК МЭА для радиоаппаратостроительных отраслей базируются на серийных аппаратных средствах вычислительной техники: ЭВМ типа ЕС, АСВТ, АРМ-Р и ~~СМ-ЭВМ~~.

Аппаратные средства АСК состоят из центрального вычислителя для обработки и хранения данных и периферийного терминального оборудования. В качестве центрального вычислителя используется одна ЭВМ или комплекс из нескольких ЭВМ. Мощность используемой в качестве центрального вычислителя ЭВМ зависит от характера и объема конкретных задач конструирования. В качестве центрального вычислителя могут быть использованы ЭВМ ЕС-1033, М-4030, М-4031, ЕС-1050, ЕС-1060.

Периферийное оборудование в АСК МЭА состоит из внешних устройств центрального вычислителя, а также терминального обо-

рудования ЕС ЭВМ и АРМ-Р. Аппаратные средства АРМ-Р используются для ввода данных, организации интерактивных режимов и выпуска технической документации. АРМ-Р в АСК является средством, реализующим интерактивный режим работы конструктора с системой. Поэтому более подробно рассмотрим состав аппаратных и программных средств АРМ-Р, назначение и режимы работы.

АРМ-Р представляет собой аппаратурно-программный проблемно-ориентированный комплекс, предназначенный для ввода, преобразования и представления алфавитно-цифровой и графической информации в режиме диалога с системой. Комплектация АРМ-Р определяется в зависимости от его функционального назначения, а также от состава и объема решаемых задач [14]. ~~АРМ-Р комплексируется на базе серийных аппаратных средств, выпускаемых отечественной промышленностью или странами социалистического содружества.~~

Аппаратные средства АРМ-Р можно объединить в следующие четыре группы: обработки, оперативного взаимодействия, документирования и ввода — вывода.

Рассмотрим технические характеристики аппаратных средств АРМ-Р более подробно, чтобы оценить их возможности для решения задач автоматизации конструирования МЭА.

Средства обработки АРМ-Р состоят из следующего оборудования. Управляющий вычислительный комплекс (УВК) ~~М-400~~ со штатными устройствами ввода-вывода, в котором малая ЭВМ ~~М-400~~ используется в качестве базового процессора: выполняющая функция логического ядра АРМ-Р, управления устройствами АРМ-Р, в том числе функции процессора графического дисплея, функции преобразования информации и обеспечения связи с центральным вычислителем АСК. В состав УВК ~~М-400~~ входят устройства ввода — вывода на перфокартах и устройство ввода — вывода на электрическую пишущую машинку.

Основные технические характеристики ЭВМ М-400 следующие: процессор параллельного типа; разрядность арифметических операндов 8/16, логических операндов 1/8/16; система команд включает 65 команд, обеспечивающих в соответствии с видами адресации выполнение свыше 400 различных типов команд над словами, байтами и битами; количество видов адресации 12; цикл оперативной памяти 1,2 мкс; время выполнения операций типа регистр — регистр 4,8 мкс; время выполнения команд регистр — память 7,5 мкс; время выполнения команд память — память 12 мкс.

В комплект АРМ-Р входит устройство расширения памяти М-400. Общий объем оперативной памяти составляет 48К байт ($K=1024$). По мере развития аппаратных средств АРМ-Р будет комплектоваться более совершенными малыми ЭВМ (СМ-3, СМ-4, Наир-4/АРМ) с повышенным быстродействием и объемом оперативной памяти до 256К байт.

К средствам обработки АРМ относятся накопители на магнитных дисках и магнитных лентах. Устройство внешней памяти на

магнитных дисках предназначено для хранения программ ДОС-400, ДОС АРМ, ТЕСАРМ, системы реального времени, программ пользователя, констант, архива и рассчитано на работу с блоками накопителей типа ИЗОТ-1370. Накопитель на магнитных дисках имеет один постоянный и один сменный пакет. Основные технические характеристики накопителя на магнитных дисках АРМ-Р: скорость обмена информацией 2,5 Мбайт/с; общий объем памяти 5 Мбайт; среднее время позиционирования около 45 мс.

Накопитель на магнитной ленте обеспечивает запись, долговременное хранение и воспроизведение информации на стандартную магнитную ленту с внешним диаметром катушки 216 мм.

Скорость записи и считывания около 4000 строк/с.

Средствами оперативного взаимодействия АРМ-Р являются: электрифицированная пишущая машинка; алфавитно-цифровой дисплей; графический дисплей.

Рассмотрим технические характеристики и возможности алфавитно-цифрового и графического дисплеев.

Алфавитно-цифровой дисплей типа Videoton-340 в составе АРМ-Р используется в качестве системной консоли для приема директив пользователя и отображения сообщений АСК, а также для отображения и редактирования алфавитно-цифровой информации.

Основные технические характеристики алфавитно-цифрового дисплея: размер рабочего поля экрана 200×140 мм; количество строк 16; количество знаков в строке 80; набор знаков с общим количеством в 96 знаков состоит из заглавных латинских и русских букв, цифр и специальных знаков.

Режимы работы дисплея: автономный, работа с ЭВМ, передача информации из буферной памяти в ЭВМ и параллельная печать на пишущей машинке содержимого буферной памяти.

Алфавитно-цифровой дисплей имеет следующие возможности редактирования текста: сброс экранного изображения, установление метки в 1-ю позицию 1-й строки, перемещение метки в четырех направлениях, табуляция, замена, вставка и изъятие знака, вставка и изъятие строки, защита памяти, подчеркивание, поднятие кадра на одну строку вверх при заполнении последней строки.

Графический дисплей типа ЭПГ-400 в составе АРМ-Р используется для ввода, отображения и редактирования на экране ЭЛТ графической и алфавитно-цифровой информации. Графический дисплей использует канал прямого доступа к памяти ЭВМ для регистрации изображения на экране. Дисплей обеспечивает отображение информации в следующих режимах: построение символов (знаков); построение длинных векторов, точек, векторов-звезд и прямых углов с абсолютным и относительным заданием координат; построение коротких векторов с относительным заданием координат; построение графиков с автоматическим приращением по осям X и Y; маркирование любым символом произвольных позиций.

На экране ЭПГ-400 может быть построено изображение со следующими параметрами: размер изображения до 240×240 мм; количество адресуемых точек 1024×1024 ; количество уровней модуляции 8; четыре типа линий (непрерывная, штриховая, пунктирная и штрихпунктирная).

Графический дисплей обеспечивает ввод информации в ЭВМ с помощью алфавитно-цифровой и функциональной клавиатур и с помощью светового пера с разрешающей способностью не хуже 7 единиц растра.

Таким образом, средства оперативного взаимодействия АРМ-Р позволяют вести конструирование МСБ и узлов МЭА в интерактивном режиме.

АРМ-Р может быть использовано для получения технической документации, и поэтому оно комплектуется следующими средствами документирования: устройствами печати; графопостроителями. В АРМ-Р используется последовательное устройство печати мозаичного типа. Оно предназначено для вывода алфавитно-цифровой информации с ЭВМ на бумагу с перфорированными краями шириной до 420 мм с количеством копий до четырех. Максимальная скорость печати до 180 зн./с. Знаки формируются точечной матрицей размером 7×7 . Графопостроитель в составе АРМ-Р используется для автоматического вычерчивания графиков, диаграмм, функциональных и электрических схем и конструкторских чертежей с управлением от ЭВМ АРМ-Р, накопителя на магнитной ленте и перфоленты. АРМ-Р комплектуется как рулонными, так и планшетными графопостроителями.

В качестве средств ввода—вывода информации в АРМ-Р используются следующие устройства: ввода—вывода перфоленты; ввода с перфокарт; кассетные магнитные накопители; аппаратура передачи данных для связи с ЕС ЭВМ; устройства кодирования графической информации.

Рассмотрим более подробно технические характеристики устройства кодирования графической информации типа ЭМ-709, так как оно играет важную роль в автоматизации конструирования МСБ и других узлов МЭА.

Кодировщик предназначен для полуавтоматического кодирования графической информации с чертежа или эскиза. Принцип работы основан на полуавтоматическом измерении координат или размеров кодируемого чертежа с выдачей значений на перфоленту или (и) непосредственно в ЭВМ. Кодировщик рассчитан на работу в режимах кодирования точек, контуров и линий, позволяет производить привязку кодируемого чертежа к электрически заданной координатной сетке, округление координат, работать в абсолютной и относительной системах координат, производить замену и поворот координатных осей на углы, кратные 90° . Кодировщик обеспечивает цифровую индикацию выданных координат и выдачу алфавитно-цифрового кода.

Конструктивно установка представляет собой планшет с пультом управления, подвижным наборным полем и визирным устрой-

ством. Размер рабочего поля 900×1200 мм. Погрешность выдачи координат $\pm 0,2$ мм. Производительность кодировщика 300 ... 400 точек/ч.

В комплект АРМ-Р входят также устройства сопряжения технических средств процессора АРМ с ЕС ЭВМ.

Структура и состав аппаратных средств АРМ-Р показаны на рис. 4.1.

В заключение рассмотрения аппаратных средств АРМ-Р необходимо наметить основные пути и принципы их совершенствования:

- увеличение объема ОЗУ до 256К байт;
- увеличение быстродействия процессора;
- аппаратная реализация арифметики с плавающей запятой;
- аппаратная реализация на графических средствах ряда функций, выполняемых программно, таких как: генераторы дуг, кривые 2-го порядка, тексты разной ширины и направления, стандартные геометрические элементы, их преобразования и т. п.;
- введение в состав АРМ-Р устройств автоматического считывания графической и текстовой информации.

АРМ-Р имеет следующий состав математического обеспечения (МО):

- операционные системы ДОС-400, ДОС АРМ и ТЕСАРМ;

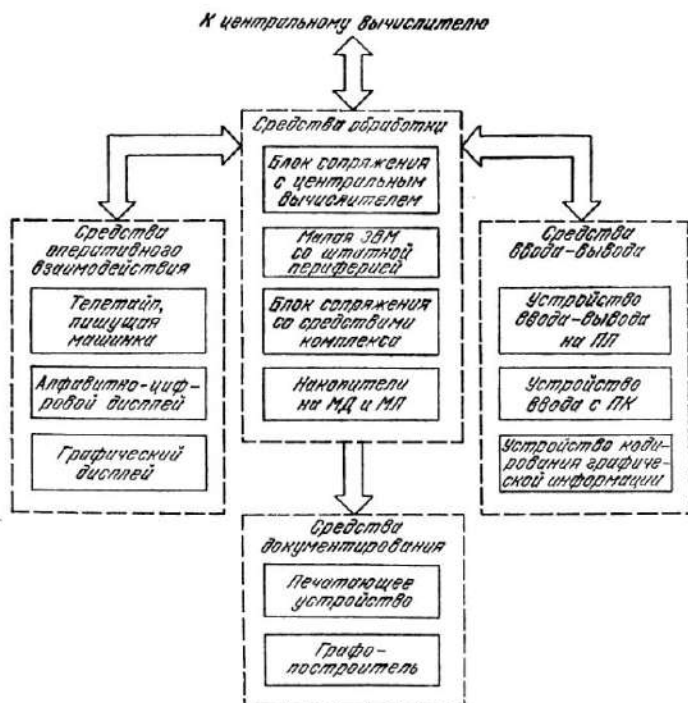


Рис. 4.1. Структура аппаратных средств АРМ-Р

— трансляторы с языков программирования Фортран-4, Бэйсик и Макро-11;

— программы обмена и перекодировки информации с внутреннего представления графической и текстовой информации во внешнее, используемое различными периферийными устройствами;

— прикладные программы по автоматизации конструирования РЭА и МЭА.

Стандартное МО АРМ-Р предназначено для обеспечения связи устройств комплекса АРМ-Р с оператором и конструктором, осуществления режима одновременного выполнения нескольких задач, организации выполнения прикладных программ и проверки работоспособности всего программно-аппаратного комплекса АРМ-Р. МО АРМ-Р включает две дисковые операционные системы ДОС-400 и ДОС АРМ и тестовую операционную систему. Тестовая операционная система ТЕСАРМ предназначена для полуавтоматической проверки работоспособности оборудования, входящего в состав АРМ-Р.

Основной режим работы АРМ-Р осуществляется с помощью ДОС АРМ, позволяющей одновременно выполнять до четырех прикладных программ. Разработка и отладка программ осуществляется под управлением ДОС-400, так как ДОС АРМ не включает языки программирования. ДОС-400 включает монитор и набор стандартных программ и представляет собой мощную программную систему, ориентированную на клавиатуру управляющей консоли и предназначенную для взаимодействия пользователя с ЭВМ и облегчения его работы по составлению, отладке и выполнению программ на УВК М-400.

Состав прикладных операционных программ АРМ-Р определяется режимами использования АРМ в АСК. Основными режимами использования АРМ-Р являются: автономный; режим пункта выпуска документации; управления процессом конструирования; интерактивного конструирования.

В автономном режиме программные средства АРМ-Р обеспечивают решение следующих задач: ввод задания, полуавтоматическое проектирование и вывод графической, текстовой рабочей документации и управляющей информации на перфоленты.

В режиме пункта выпуска документации программные средства АРМ-Р обеспечивают вывод графической и текстовой документации, управляющих перфолент для производственных автоматов и контроля цифровых, цифро-аналоговых и аналоговых МСБ по информации, выдаваемой центральным процессором АСК на языке внутреннего представления графической и текстовой информации.

В режиме управления процессом конструирования комплекс программ АРМ-Р обеспечивает централизованное управление этапами проектирования, выполняемыми с помощью аппарата директив пользователя. На средствах АРМ-Р в этом режиме отображаются результаты выполнения отдельных этапов конструкторских работ.

В режиме интерактивного конструирования комплекс программ обеспечивает: выполнение центральным процессором определенных программных модулей по директивам пользователя; редактирование результатов проектирования конструктором с использованием аппаратных средств АРМ-Р; синтаксический и семантический контроль принимаемых конструктором решений по редактированию результатов конструирования.

Основные задачи при конструировании и расчете МСБ, решаемые на АРМ-Р: выполнение расчетов по моделированию теплового режима МСБ, расчету топологии элементов МСБ и др.; размещение элементов и компонентов произвольной конфигурации на подложке МСБ; разводка (трассировка) соединений и редактирование топологии МСБ; выполнение электрических принципиальных схем и подготовка формализованных заданий на моделирование аналоговых и цифровых схем на ЕС ЭВМ; механизированное изготовление управляющих перфолент для получения фотооригиналов слоев МСБ; составление спецификаций, перечней и таблиц координат; выполнение аналитических и графических инженерных расчетов; выпуск конструкторской и технологической документации для передачи в производство; корректировка и редактирование графических, текстовых и смешанных документов; выполнение сборочных чертежей МСБ, объединительных плат и ячеек; составление программ для часто повторяющихся расчетов с помощью языков программирования, ориентированных на инженера (Фортран-4, Бэйсик); подготовка информации для последующей передачи на центральный вычислитель АСК с целью выполнения более сложных задач функционального и конструкторского проектирования; отображение на экранах дисплеев или вывод на бумагу результатов, полученных на центральном процессоре АСК; ввод стандартных конструктивов в библиотеку АСК.

Как видно из изложенного выше, аппаратно-программный комплекс АРМ-Р представляет собой сложный современный интерактивный комплекс для автоматизации конструирования микроэлектронной аппаратуры.

4.2. Разбиение схемы МЭА на конструктивно законченные части

Компоновка в автоматизированных системах конструирования МЭА — это переход от функционально-логической схемы устройства или ее описания к конструктивному, описывающему распределение функциональных элементов по соответствующим конструктивным иерархическим уровням (ИС, МСБ, ячейка и т. д.).

В зависимости от критериев качества, которым должна удовлетворять МЭА, вида конструктивов и характера функциональной схемы можно выделить три подзадачи в задаче компоновки МСБ:

типизация — разбиение схемы устройства на подсхемы, реализуемые в виде отдельных конструктивов, по показателю качества минимуму номенклатуры конструктивов;

покрытие — преобразование функционально-логической схемы устройства в схему соединений между определенными конструк-

тивами, например покрытие функционально-логической схемы МСБ кристаллами полупроводниковых ИС определенной серии;

разбиение — разрезание схемы устройства на подсхемы, реализуемые в виде отдельных конструктивов, например по критерию минимума связей между конструктивами. В этой подзадаче компоновки количество конструктивов и их типоразмеры могут задаваться или определяться в процессе разбиения.

При конструировании МЭА необходимо в общем случае решать в комплексе все три задачи компоновки. Однако при конструировании МСБ и ячеек МЭА чаще всего решается подзадача разбиения. Первая подзадача чаще применяется при конструировании аппаратуры III поколения, когда необходимо определить минимальное количество типовых конструктивных элементов в составе ее конструкции, например типовых элементов замены. Вторая подзадача чаще решается при компоновке цифровой аппаратуры.

Задачи компоновки по сравнению с другими задачами автоматизированного конструирования МЭА наименее разработаны, и критерии компоновки носят эвристический характер.

Рассмотрим подзадачу разбиения более подробно.

Постановка задачи разбиения. Допустим, имеется исходный граф $G(V, R)$, моделирующий заданную электрическую схему проектируемого устройства. Требуется разбить граф на подграфы таким образом, чтобы количество ребер между подграфами было минимальным, т. е. необходимо граф $G(V, R)$ разбить на подграфы $G_i(V_i, R_i)$ с минимальной связностью между ними.

При решении задачи разбиения обычно задаются следующие ограничения:

— количество подграфов, реализуемых в виде отдельных конструктивов, количество вершин или заданный суммарный вес вершин, моделирующих конкретные компоненты и элементы, которые могут быть физически размещены в пределах монтажной платы (подложки) конструктива;

— максимальное количество внешних связей у каждого конструктива, моделируемого подграфом.

Иногда количество подграфов (конструктивов), на которые необходимо разбить схему, не задается и его требуется определить в процессе разбиения.

Если количество подграфов задано, то при разбиении графа на подграфы ограничения можно записать следующими выражениями:

$$G_i(V_i, R_i) \neq \emptyset, \quad (4.1)$$

$$G_i(V_i, R_i) \cup G_j(V_j, R_j) = \emptyset, \quad (4.2)$$

$$\bigcap_{i=1} G_i(V_i, R_i) = G(V, R), \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^t x_i \leq t, \quad (4.4)$$

где x_i — вес i -й вершины; t — максимально допустимое количество вершин в подграфе. Условия (4.1)—(4.3) вытекают из самого действия разбиения графа на подграфы. Условие (4.1) означает, что подграф не может быть пустым, так как не имеет смысла конструктив без элементов и компонентов на нем. Условие (4.2) означает, что не может быть элементов или компонентов, размещенных более чем на одном конструктиве. Условие (4.3) показывает, что весь граф разбивается на подграфы таким образом, что ни одна вершина не может быть пропущена в подграфах, т. е. не может быть элемента или компонента в схеме, не принадлежащего определенному конструктиву. Последнее условие (4.4) необходимо потому, что все конструктивы имеют конечные размеры, выбранные в соответствии с требованиями технологии, унификации и т. д., и на их плоскости может быть размещено определенное количество элементов и компонентов.

Алгоритмы разбиения. Для решения задачи разбиения обычно применяется комбинация, состоящая из двух алгоритмов: последовательного и итерационного. В последовательных алгоритмах вначале по некоторому правилу упорядочиваются вершины графа, а затем из них комплектуются подграфы в соответствии с условиями (4.1)—(4.4). Полученное распределение вершин по подграфам является исходным для итерационных алгоритмов. Итерационные алгоритмы осуществляют перестановку вершин из одного подграфа в другой по заданным критериям с целью минимизации показателей качества разбиения.

Рассмотрим более подробно один из итерационных алгоритмов разбиения по критерию минимума количества связей между конструктивами (подграфами) [4.5]. Из множества подграфов разбиения $\{G_i\}$ выберем два любых подграфа, например $G_i(V_i, R_i)$ и $G_j(V_j, R_j)$, и дадим для них некоторые определения:

— внутренняя полустепень $\rho_i^{\text{вн}}(V_k)$ вершины V_k подграфа G_i — количество ребер графа, инцидентных вершине V_k и одновременно другим вершинам этого подграфа;

— внешняя полустепень $\rho_i^{\text{внш}}(V_l)$ вершины V_l подграфа G_i — количество ребер графа, инцидентных вершине V_l и вершинам второго подграфа G_j .

Эти определения можно дать и для вершин подграфа G_j .

Для любых двух вершин $V_k \in G_i$ и $V_l \in G_j$ сумма внешних полустепеней равна $\rho_{i,j}^{\text{внш}}(V_k, V_l) = \rho_i^{\text{вн}}(V_k) + \rho_l^{\text{вн}}(V_l)$. Количество ребер, одновременно инцидентных обоим вершинам $V_k \in G_i$ и $V_l \in G_j$, обозначим $\rho_{ij}^{\text{внш}}(V_k, V_l)$. Эти ребра в выражении $\rho_{ij}^{\text{внш}}(V_k, V_l)$ учтены два раза, так как ребро, инцидентное вершинам V_k и V_l , учитывается как в $\rho_i^{\text{вн}}(V_k)$, так и в $\rho_j^{\text{вн}}(V_l)$.

Сумма внутренних полустепеней для этих же вершин $\rho_{ij}^{\text{вн}}(V_k, V_l) = \rho_i^{\text{вн}}(V_k) + \rho_j^{\text{вн}}(V_l)$. Тогда для двух выбранных подграфов спра-

ведливо следующее утверждение: перестановка между собой двух вершин $V_k \in G_i$ и $V_l \in G_i$ приводит к уменьшению связности подграфов, если сумма внешних полустепеней $\rho_{ij}^{\text{внш}}$ без удвоенной суммы ребер, одновременно инцидентных этим вершинам $\rho_{ij}(V_k, V_l)$, больше суммы их внутренних полустепеней, т. е.

$$\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l) = \rho_{ij}^{\text{внш}}(V_k, V_l) - \rho_{ij}^{\text{вн}}(V_k, V_l) - 2\rho_{ij}(V_k, V_l) > 0. \quad (4.5)$$

Алгоритм, реализующий перестановки вершин V_k и V_l , уменьшающие связность между подграфами G_i и G_j , состоит из следующих блоков.

Блок 1. Для каждой пары вершин V_k и V_l , удовлетворяющих условиям $V_k \in G_i$ и $V_l \in G_j$, вычисляется по формуле (4.5) значение $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l)$.

Блок 2. Те пары вершин, для которых выполняется условие $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l) > 0$, заносятся в список и упорядочиваются по максимальному значению $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l)$. Вершины, для которых $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l) \leq 0$, в список не заносятся и в дальнейшем не рассматриваются.

Блок 3. Переставляются между собой вершины V_k и V_l , для которых $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l)$ максимально. Если имеется несколько пар вершин, у которых значения $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l)$ максимальны и равны между собой, то переставляются вершины любой из пар.

Блок 4. Переставленные вершины метятся, и повторяется подсчет $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l)$ для вновь образованных подграфов, причем для помеченных вершин $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l)$ не определяется. Метки отменяются у всех вершин.

Блок 5. Проверяется, есть ли пары вершин, для которых $\Delta \rho_{ij}(V_k, V_l) > 0$. Если имеются, то повторяются блоки 2, 3, 4. В противном случае перестановка вершин между подграфами G_i и G_j заканчивается.

Так как исходный граф необходимо разделить на m подграфов, то для всех возможных пар подграфов алгоритм перестановки (блоки 1—5) повторяется. Количество таких пар подграфов равно числу сочетаний из m подграфов по 2:

$$C_m^2 = \frac{m!}{2!(m-2)!} = \frac{m(m-1)}{2}.$$

Таким образом, необходимо повторение не более $m(m-1)/2$ раз алгоритма перестановки для минимизации количества связей между подграфами при разбиении графа $G(V, R)$ на m подграфов.

4.3. Математическое моделирование соединений МЭА

Среди задач автоматизации конструирования МЭА особое место занимает синтез соединений и их оптимальное пространственное расположение в конструкции микроэлектронного устройства. Известные алгоритмы [4.1, 4.7] синтеза соединений имеют специа-

лизированное применение для определенного класса монтажных соединений.

БГИС, МСБ и радиоэлектронная аппаратура на их основе характеризуются большим разнообразием монтажных соединений [4.2]. Монтажные соединения полупроводниковых ИС и БИС выполняются с помощью слоя металлизации и диффузионного слоя; монтажные соединения БГИС и МСБ — одно-, двух- и многослойного пленочного и микропроволочного монтажа; соединения между БИС и МСБ — печатного и микропроволочного монтажа; соединения между ячейками и блоками МЭА — жгутов, гибких шлейфов и плоских кабелей. Перечисленные виды соединений МЭА имеют различную технологическую природу и сильно отличаются по конструктивным характеристикам.

Среди всех видов соединений можно условно выделить две группы соединений: плоские (пленочные, печатные) и объемные (микропроволочные, гибкие шлейфы и плоские кабели). Кроме разделения на плоские и объемные соединения с точки зрения алгоритмизации синтеза соединений МЭА, важным является разделение соединений на дискретно-ортогональные (печатные, пленочные), их иногда называют регулярными видами соединений, и на непрерывные или нерегулярные (микропроволочные, жгутовые) соединения. Известные [4.1, 4.7] алгоритмы синтеза соединений решают задачи построения плоских, дискретно-ортогональных соединений и поэтому применимы для некоторых конструктивов МЭА. Для автоматизации синтеза всех видов соединений МЭА требуются универсальные методы моделирования этих соединений.

Так как нерегулярные виды соединений обычно сочетаются с дискретно-ортогональными, то их можно представить в виде квазирегулярных соединений, и, следовательно, использовать такую дискретно-ортогональную модель для всех видов соединений МЭА.

Рассматриваемая ниже объемная дискретно-ортогональная модель соединений МЭА применима для всех указанных регулярных и квазирегулярных видов соединений. Эту модель соединений МЭА в дальнейшем будем называть объемной коммутационной моделью.

Объемная коммутационная модель (ОКМ) МЭА построена на графомножественном принципе моделирования пространственного

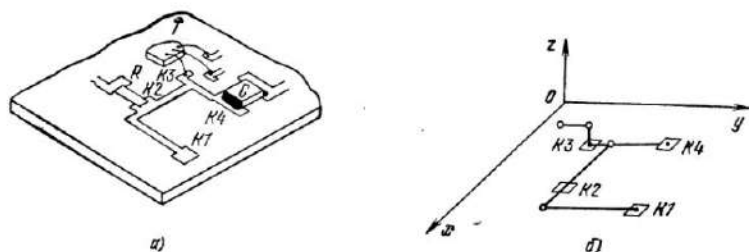


Рис. 4.2. Представление пленочных и микропроволочных соединений ОКМ

размещения соединений и элементов конструкции. Основой ОКМ является ортогональный граф $G_{\perp}$, задаваемый множеством ребер R . На рис. 4.2,а показан пример представления соединения элементов МСБ с помощью пленочных и микропроволочных проводников, а на рис. 4.2,б — их представление в виде ОКМ, состоящей из отрезков, параллельных осям координат Ox , Oy , Oz .

В общем случае ОКМ состоит из двух взаимно трансформируемых частей: модели свободных участков (МСУ) и модели занятых участков (МЗУ) монтажного пространства МЭА. МСУ моделирует те части конструктива, на которых могут размещаться в процессе синтеза соединений проводники, контактные площадки и другие соединительные элементы. МЗУ моделирует те части конструктива, на которых уже размещены соединительные элементы или эти участки запрещены для их размещения. МСУ и МЗУ являются взаимно трансформируемыми моделями, так как в результате синтеза соединений ресурс МСУ уменьшается, а объем МЗУ возрастает за счет построенных соединений. Наличие этих двух моделей необходимо для обеспечения однозначного перехода от ОКМ к топологическому чертежу того или иного конструктива. Так, на рис. 4.3,а показан фрагмент топологии пленочных соединений, на рис. 4.3,б — соответствующая ему ОКМ: МСУ изображена тонкими линиями, а МЗУ — толстыми. Если пользоваться только МСУ, то при восстановлении из ОКМ топологии соединений возможны неоднозначные их представления; некоторые из них показаны на рис. 4.3,в и 4.3,г.

Ортогональные графы МСУ и МЗУ состоят из ребер R , параллельных трем осям координат Ox , Oy , Oz . Тогда ребра R^c МСУ могут быть представлены в виде трех подмножеств ребер: $\{R\}_x^c$ — ребра, параллельные Ox ; $\{R\}_y^c$ — ребра, параллельные Oy ; $\{R\}_z^c$ — ребра, параллельные Oz .

При этом МСУ в виде графа $G_{\perp}^c$, заданного множеством ребер $\{R\}_x^c$, не содержит ребер, отличных от $\{R\}_x^c$, $\{R\}_y^c$ и $\{R\}_z^c$, т. е.

$$\{R\}_x^c \cup \{R\}_y^c \cup \{R\}_z^c = \{R\}_x^c.$$

Аналогично можно представлять и МЗУ в виде множества ребер

$$R^3 = \{R\}_x^3 \cup \{R\}_y^3 \cup \{R\}_z^3.$$

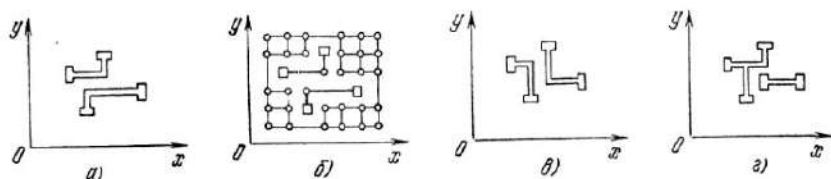


Рис. 4.3. Составные части ОКМ: МЗУ и МСУ

Из теории графов известно, что любое из подмножеств ребер $\{R\}_x$, $\{R\}_y$ или $\{R\}_z$ удовлетворяет следующим условиям:

$$\{R\}_x \cap \{R\}_y = \{V\}, \quad \{R\}_y \cap \{R\}_z = \{V\}, \quad \{R\}_z \cap \{R\}_x = \{V\},$$

где $\{V\}$ — множество вершин ортогонального графа $G_\perp$.

Рассмотрим, как может быть представлен отрезок магистрали или проводника соответственно в машинной МСУ и МЗУ. Машин-

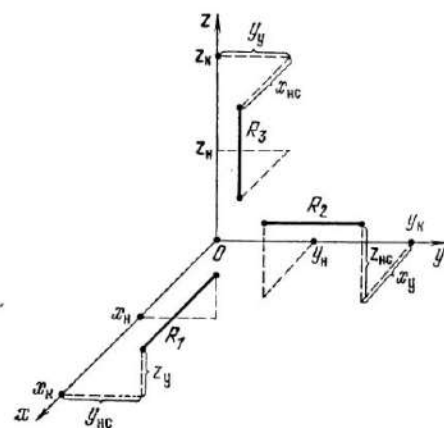


Рис. 4.4. Представление отрезков объемной коммутационной модели в численном виде

ная реализация МСУ представляется в виде трех множеств ребер $\{R\}_x$, $\{R\}_y$ и $\{R\}_z$, моделирующих отрезки, параллельные соответствующим осям координат. Отрезок (ребро) в МСУ представляется в виде последовательности четырех чисел, характеризующих его пространственное размещение. Так, отрезок R_1 , параллельный оси Ox (рис. 4.4), однозначно может быть задан четырьмя числами: x_n — начало отрезка, x_k — конец отрезка; y_n — уровень отрезка и y_{nc} — номер слоя отрезка. Аналогичные координаты описывают отрезки, параллельные осям Oy и Oz :

$$Oy: y_n, y_k, x_y, z_{nc}; \quad Oz: z_n, z_k, y_z, x_{nc}.$$

На рис. 4.4 показаны отрезки $R_1 \in \{R\}_x$, $R_2 \in \{R\}_y$ и $R_3 \in \{R\}_z$.

Такое машинное представление МСУ и МЗУ позволяет судить о взаимном расположении отрезков (ребер) ОКМ на основании применения алгебры логики к соответствующим координатам отрезков.

Рассмотрим пример машинной реализации модели свободных участков. Машинный аналог модели свободных участков может быть записан в виде четырех массивов: SM , TSM , NSM и $NTSM$.

Массив SM — трехмерный, т. е. его можно описать как $SM(I, J, K)$, где K принимает значения $\{1, 2, 3\}$ в зависимости от выбираемой координатной плоскости (при $K=1$ рассматриваются отрезки, параллельные оси Ox , при $K=2$ — параллельные оси Oy и при $K=3$ — параллельные оси Oz). С помощью изменения индекса J в ячейку памяти записывается или выбирается определенная координата отрезка (при $J=1$ записываем начало отрезка, при $J=2$ — конец отрезка, при $J=3$ — уровень отрезка). Ячейка $J=4$ необходима для записи признака в процессе выполнения алгоритма трассировки, например номера трассируемой цепи. Индекс I указывает на номер отрезка в списке.

Общее число отрезков по каждому направлению x , y и z хранится в массиве $NSM(K)$. Координата отрезка «номер слоя» хра-

нтся в массиве $TSM(I, K)$, где K — номер направления по осям x , y и z , а I — номер слоя. В этом массиве для каждого слоя указан номер отрезка из массива SM , который является первым из отрезков, находящихся в этом слое.

Количество слоев по каждому направлению x , y и z записывается в массив $NTSM(K)$. Для иллюстрации машинной ОКМ на рис. 4.5 показана объемная коммутационная модель микросборки. Модель учитывает следующие конструктивные и технологические требования, предъявляемые к микросборке. На каждой из двух боковых поверхностей можно нанести 17 магистралей, расположенных вдоль оси x , и 20 магистралей вдоль оси z . Соединение между боковыми поверхностями осуществляется посредством плоских перемычек. Каждая перемычка моделируется решеткой, состоящей из девяти проводников, расположенных вдоль оси y , и семи — вдоль оси z . Перемычка может иметь внешние выводы, которые моделируются продолжением соответствующих проводников на две координаты вниз. Между перемычками устанавливаются микросхемы, имеющие по 14 выводов. Места подсоединения выводов микросхем в микросборку показаны на модели точками на магистралях. Ма-

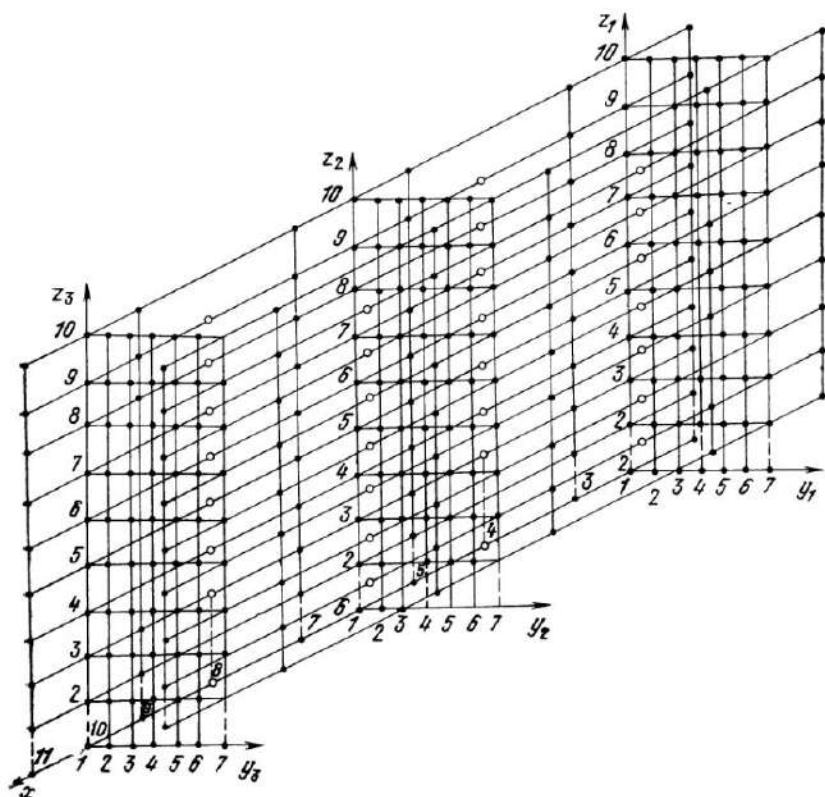


Рис. 4.5. Пример объемной коммутационной модели

тематическое описание моделей массивов $SM(I, J, 1)$, $SM(I, J, 3)$, $SM(I, J, 2)$ и $TSM(I, K)$ показано в табл. 4.1—4.4. В табл. 4.1—4.3 значение $J=1$ соответствует началу моделируемого отрезка, $J=2$ — концу отрезка, $J=3$ — уровню размещения отрезка на плоскости и $J=4$ резервируется для меток и признаков, используемых в работе алгоритмов трассировки.

Таблица 4.1

J	I																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0

Таблица 4.2

J	I								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	2	2	1	1	2	1	1	2
2	10	10	10	10	10	10	10	10	10
3	1	7	1	2	3	4	5	6	7
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 4.2

J	I																																
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33									
1	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2								
2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10									
3	1	7	1	7	1	2	3	4	5	6	7	1	7	1	7	1	2	3	4	5	6	7	1	7									
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									

Таблица 4.3

J	I																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
3	2	6	10	2	6	10	2	6	10	2	6	10	2	6	10	2	6	10	2	6	10	2	6	10	2	6	10
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4.4

Массив	I												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$TSM(I, 1)$	1	10	10	10	10	10	10	10	19	0	0	0	0
$TSM(I, 2)$	1	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	0	0
$TSM(I, 3)$	1	3	10	12	12	14	21	23	23	25	32	34	0

С помощью такой модели можно легко описать большинство конструкций существующих микроэлектронных устройств, если их соединительные проводники образуют ортогональную или квази-ортогональную решетку.

Объемная коммутационная модель МЭА должна учитывать конструктивные и технологические особенности проектируемого устройства. Это значит, что для каждого нового конструктивного решения требуется разработка новой коммутационной модели, что

является трудоемкой задачей. Надо учитывать и тот факт, что при кодировке модели и подготовке исходных данных используется ручной труд, что не исключает ошибок. Поэтому формирование объемной коммутационной модели осуществляется с помощью алгоритма автоматической генерации ОКМ.

Для того чтобы по построенной модели можно было однозначно восстановить топологию соединений, необходимо фактически сформировать две модели:

- модель занятых участков, которая учитывает технологические, конструктивные ограничения на узел, размещенные элементы и соединения схемы;

- модель свободных участков, которая учитывает ресурс свободных для трассировки магистралей.

Соответственно и алгоритм генерации объемной коммутационной модели состоит из двух частей. На основании заданных исходных данных (размеры монтажной платы, шаг координатной сетки и другие конструктивные и технологические требования) формируется первичная модель свободных магистралей. Под первичной моделью понимается в данном случае модель, которая учитывает только потенциальную возможность укладки проводника на каком-то участке монтажной платы и не учитывает занятость этого участка. Формирование окончательной модели свободных магистралей

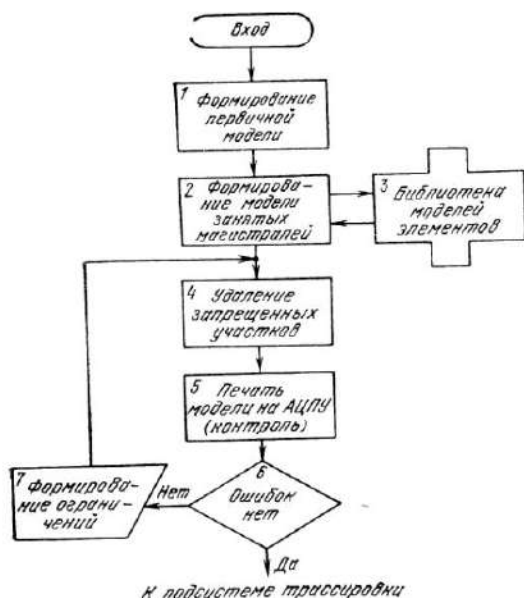


Рис. 4.6. Алгоритм построения объемной коммутационной модели

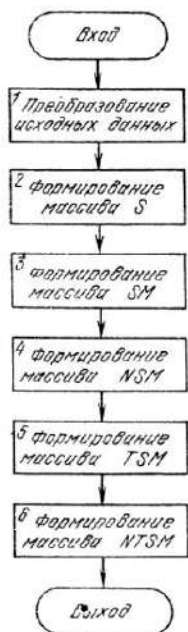


Рис. 4.7. Алгоритм построения первичной модели свободных магистралей

как исходной для алгоритма трассировки происходит после удаления из первичной модели занятых участков, информация о которых в виде моделей элементов хранится в библиотеке АСК, организованной на магнитном диске или ленте. Модель занятых участков представляет собой некоторую совокупность моделей элементов, таких, как микросхемы, микросборки, переходные отверстия, контактные площадки, разъемы и т. п. Укрупненная логическая схема алгоритма генерации модели представлена на рис. 4.6.

После блока удаления запрещенных участков возможен вывод модели послойно на АЦПУ или дисплей для визуального контроля полученного рисунка конструктором. Если в модели есть неточности и не все требования к конструкции были учтены, в модель можно занести или удалить свободные или запрещенные концевые пары. После генерации модели и ее проверки она может быть использована для трассировки.

Рассмотрим алгоритм автоматического формирования первичной объемной коммутационной модели свободных участков, логическая схема которого представлена на рис. 4.7.

Блок 1. преобразует абсолютные значения исходных данных (размер монтажной платы, шаг координатной сетки, минимальное расстояние между центрами контактных площадок и т. п.) в относительные, выраженные в шагах координатной сетки.

Блок 2 формирует массив S , где содержатся значения минимальных и максимальных размеров конкретного узла по осям Ox , Oy , Oz , выраженные в шагах координатной сетки.

Блок 3 формирует массив SM , т. е. рассчитывает координаты отрезков (начало, конец и уровень).

Блок 4 определяет количество проводников, параллельных определенной координатной плоскости, т. е. формирует массив NSM .

Блок 5 распределяет проводники по слоям и записывает координату «номер слоя» в массив TSM .

Блок 6 определяет количество слоев для каждой из трех координатных плоскостей, т. е. формирует массив $NTSM$.

4.4. Методы и алгоритмы автоматизированного конструирования соединений МЭА

Исходной информацией для подсистемы трассировки являются: объемная коммутационная модель конструктивного решения, данные по размещению элементов и список цепей $\{V_c\}$, в котором указываются координаты x , y , z точек, соединяемых цепью. Задача трассировки соединений заключается в построении связывающих деревьев.

Порядок трассировки соединений определяется по следующему алгоритму [4.7]. Каждая цепь в зависимости от расположения на монтажной плате и числа узлов, содержащихся внутри описывающего ее параллелепипеда, может характеризоваться некоторым весом W_i . Вес W_i зависит от взаимных перекрытий параллелепипеда P_i этой цепи с параллелепипедами P_j (где $i, j=1, 2, \dots, n$ и

$i \neq j$) всех остальных цепей и величины D_i — числа оптимальных связывающих деревьев для $\{V_c\}_i$, которое определяется так:

$$D_i = (x_{\max i} - x_{\min i} + 1)(y_{\max i} - y_{\min i} + 1)(z_{\max i} - z_{\min i} + 1),$$

где $x_{\max i}$, $x_{\min i}$, $y_{\max i}$, $y_{\min i}$, $z_{\max i}$ и $z_{\min i}$ — максимальные и минимальные координаты параллелепипеда соответственно по осям Ox , Oy и Oz , т. е. D_i пропорционально объему стягивающего параллелепипеда. Величина перекрытий характеризуется M_i , которая по мере нахождения новых пересечений P_i с P_j изменяется. Таким образом, вес W_i можно записать как $W_i = (\alpha/D_i) + \beta M_i$, где α и β — коэффициенты, учитывающие конструктивно-технологические особенности конструктива.

Полученный таким образом вес W_i выражает относительную сложность трассировки i -й цепи в зависимости от загрузки места ее расположения на объемной коммутационной модели и числа возможных оптимальных решений. В дальнейшем цепи должны трассироваться в порядке убывания их весов W_i .

Далее из коммутационной модели исключаются все вершины, принадлежащие списку цепей $\{V_c\}$. Это необходимо для того, чтобы избежать пересечения деревьев при трассировке, так как для каждой i -й цепи $\{V_c\}$ все вершины, принадлежащие j -й цепи ($j = 1, 2, \dots, n; i < j$), являются запрещенными. При трассировке вершины очередной i -й трассируемой цепи последовательно включаются в модель. В общем случае сформированная коммутационная модель для каждой i -й цепи $\{V_c\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) является избыточной. Поэтому для увеличения быстроты действия непосредственно лучевого алгоритма трассировки предусмотрен ряд алгоритмов, сокращающих избыточность модели. Таких алгоритмов в данной подсистеме три.

Первый — формирование минимального стягивающего параллелепипеда, характеризующегося шестью координатами $Px_{\min}$, $Px_{\max}$, $Pu_{\min}$, $Pu_{\max}$, $Pz_{\min}$, $Pz_{\max}$. Определение этих точек происходит по следующим правилам:

$$Px_{\min} = \min\{V_c\}_{xi} - K, \quad Px_{\max} = \max\{V_c\}_{xi} + K,$$

$$Pu_{\min} = \min\{V_c\}_{yi} - K, \quad Pu_{\max} = \max\{V_c\}_{yi} + K,$$

$$Pz_{\min} = \min\{V_c\}_{zi} - K, \quad Pz_{\max} = \max\{V_c\}_{zi} + K,$$

где K — константа.

Далее из коммутационной модели «вырезается» участок с вышеуказанными координатами, т. е. в рабочей модели сохраняется информация об отрезках, принадлежащих выбранному участку. В последующем параллелепипед может увеличиться в размерах в том случае, когда трассировка i -й цепи невозможна на данном участке коммутационной модели. Расширение происходит до тех пор, пока объем параллелепипеда не станет равным объему модели. В этом случае цепь протрассировать таким методом нельзя и необходима дотрассировка.

Следующий алгоритм — алгоритм выделения связного комплекса. Для очередной i -й цепи каждой вершине из $\{V_c\}_i$ присваивается произвольная метка из некоторого упорядоченного набора ме-

ток $\{S\}$, при котором $\{S\} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ и $S_1 < S_2 < S_3 < \dots < S_n$. Соседними вершинами в графе $G \perp$ будем считать вершины, принадлежащие одной концевой паре, так как все вершины, находящиеся в «прямой видимости» из некоторой вершины, являются соседними.

Из каждой вершины $\{V_c\}_i$ соответствующая метка передается соседним с ней вершинам. Распространение меток происходит по трем направлениям одновременно за счет того, что применяется объемная коммутационная модель. Если происходит встреча меток, то старшая метка поглощается младшей во всех вершинах графа, содержащих в данный момент старшую метку. Затем на следующем шаге таким же образом передаются метки из всех вершин, получивших метки на предыдущем шаге. Процедура заканчивается, когда по завершении очередного шага в графе содержится только одна младшая метка или если хотя бы одна из меток не была распространена; в этом случае в графе не существует связывающего дерева для $\{V_c\}$.

Если для цепи $\{V_c\}$ связывающее дерево существует, начинает работать алгоритм сокращения избыточности. Для описания этого алгоритма необходимо ввести некоторые определения.

Концевые пары $L^k_x(L^k_y, L^k_z)$ и $L^l_x(L^l_y, L^l_z)$ эквивалентны, если выполняются соотношения

$$L^k_x \cap \{L\}_y = L^l_x \cap \{L\}_y \text{ или } L^k_x \cap \{L\}_z = L^l_x \cap \{L\}_z,$$

т. е. если две концевые пары из одного множества концевых пар пересекают одни и те же концевые пары в другом ортогональном множестве.

Концевая пара $L^k_x(L^k_y, L^k_z)$ мажорирует концевую пару $L^l_x(L^l_y, L^l_z)$, если

$$L^k_x \cap \{L\}_y = \{P\}_1, \quad L^l_x \cap \{L\}_y = \{P\}_2$$

или

$$L^k_x \cap \{L\}_z = \{P\}_1, \quad L^l_x \cap \{L\}_z = \{P\}_2$$

и при этом $\{P\}_1 \cap \{P\}_2 = \{P\}_2 \neq \{P\}_1$.

Исключение из модели концевых пар (отрезков) в алгоритме происходит по следующим правилам. Если

$$\begin{aligned} L^l_x \cap \{L\}_y &= \{P\}_1^l, & L^l_x \cap \{L\}_z &= \{P\}_2^l, \\ L^k_x \cap \{L\}_y &= \{P\}_1^k, & L^k_x \cap \{L\}_z &= \{P\}_2^k, \end{aligned}$$

то:

1. $\{P\}_1^k = \emptyset, \{P\}_2^k = \emptyset$. Исключить $L^k_x(L^k_y, L^k_z)$.
2. $\{P\}_1^k = \emptyset, \{P\}_1^l = \emptyset, \{P\}_2^k \neq \emptyset, \{P\}_2^l \neq \emptyset$
 - а) $\{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l = \{P\}_2^k = \{P\}_2^l$. Исключения не происходит;
 - б) $\{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l \neq \{P\}_2^k = \{P\}_2^l$. Исключить $L^l_x(L^l_y, L^l_z)$;
 - в) $\{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l \neq \{P\}_2^k = \{P\}_2^l$. Исключить $L^k_x(L^k_y, L^k_z)$.

$$3. \{P\}_1^k \neq \emptyset, \{P\}_1^l \neq \emptyset, \{P\}_2^k = \emptyset, \{P\}_2^l = \emptyset$$

а) $\{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l = \{P\}_2^l = \{P\}_2^k$. Исключения не происходит;

б) $\{P\}_1^k \cap \{P\}_1^l \neq \{P\}_1^k = \{P\}_1^l$. Исключить $L_x^l(L_y^l, L_z^l)$;

в) $\{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l = \{P\}_2^k \neq \{P\}_2^l$. Исключить $L_x^k(L_y^k, L_z^k)$.

$$4. \{P\}_1^k \neq \emptyset, \{P\}_1^l \neq \emptyset, \{P\}_2^k \neq \emptyset, \{P\}_2^l \neq \emptyset$$

а) $\{P\}_1^k \cap \{P\}_1^l = \{P\}_1^k = \{P\}_1^l, \{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l = \{P\}_2^k = \{P\}_2^l$. Исключения не происходит;

б) $\{P\}_1^k \cap \{P\}_1^l = \{P\}_1^k \neq \{P\}_1^l, \{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l = \{P\}_2^k \neq \{P\}_2^l$. Исключить $L_x^k(L_y^k, L_z^k)$;

в) $\{P\}_1^k \cap \{P\}_1^l = \{P\}_1^l \neq \{P\}_1^k, \{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l = \{P\}_2^l \neq \{P\}_2^k$. Исключить $L_x^l(L_y^l, L_z^l)$;

г) $\{P\}_1^k \cap \{P\}_1^l \neq \{P\}_1^l \neq \{P\}_1^k, \{P\}_2^k \cap \{P\}_2^l \neq \{P\}_2^l \neq \{P\}_2^k$. Исключения не происходит.

Для каждой концевой пары определяется множество пересекаемых ими концевых пар, и попарным сравнением этих множеств находятся по условиям 1—4 исключаемые концевые пары. После исключения процедура повторяется, так как возможно появление новых исключаемых концевых пар. Процедура заканчивается, когда невозможно исключить ни одной концевой пары. В результате получаем из графа $G_{\perp}$ сокращенный граф $G'_{\perp}$.

Для восстановления множества всех возможных деревьев графа $G'_{\perp}$ представление модели и процесс построения дерева должны осуществляться одним из способов представления графа в «точках». В данном случае используется метод представления графа в «точках» цепным списком.

В ортогональном графе $G'_{\perp}$ все вершины, соседние с некоторой вершиной V_i , могут быть упорядочены по направлениям относительно этой вершины, а их может быть для объемной модели не более шести. Таким образом, ортогональный граф $G_{\perp}$ может быть представлен цепным списком с числом элементов списка, равным числу вершин графа. Каждый элемент списка содержит следующую информацию: координаты (x, y, z) вершины графа на модели; адреса элементов в списке, содержащих вершины, соседние с данной вершиной; адреса и направления прихода меток к данной вершине в процессе построения связывающего дерева.

Для удобства работы алгоритма весь цепной список представлен тремя массивами $KT(I, N)$, $SOS(I, K)$ и $KOV(I, J, K)$, структура которых показана на рис. 4.8.

В массиве KT хранится информация о координатах элементов списка. Индекс N меняется от 1 до 3. При $K=1$ выбираем координату x , при $K=2$ — координату y и при $K=3$ — координату z . Индекс I указывает на номер элемента в списке.

Массив SOS предназначен для хранения информации о номерах элементов, содержащих вершины, соседние с выбранной. С помощью индекса K определяем расположение «соседа» относитель-

но рассматриваемой вершины. При $K=1$ сосед расположен слева по оси x от вершины, при $K=2$ — справа по оси x , при $K=3$ — слева по оси y , при $K=4$ — справа по оси y , при $K=5$ — сверху по оси z и при $K=6$ — снизу по оси z . Индекс I также указывает на номер элемента в списке.

Номер элемента I	Координата $N=1...3$		
	x	y	z
1			
2			
3			
⋮			
⋮			

a

Рис. 4.8. Структура массивов математической коммутационной модели:

a — массив $KT(I, K)$; b — массив $SOS(I, K)$;
 v — массив $KOV(I, J, K)$

Номер элемента I	Адрес соседа					
	$K = 1...6$					
	Слева по оси X ←	Справа по оси X →	Слева по оси Y ←	Справа по оси Y →	Сверху по оси z ↑	Снизу по оси z ↓

b

Номер элемента I	1						2						3						...	NC					
	Метка 1						Метка 2						Метка 3						...	Метка NC					
	x	x	y	y	z	z	x	x	y	y	z	z	x	x	y	y	z	z		x	x	y	y	z	z
	←	→	←	→	↑	↓	←	→	←	→	↑	↓	←	→	←	→	↑	↓		←	→	←	→	↑	↓
	1	2	3	4	5	6																			
				I																					

Массив KOV необходим для записи адреса и указания направления прихода какой-то I -й метки к вершине при работе лучевого алгоритма построения связывающего дерева, причем он состоит из NC массивов (где NC — число точек в трассируемой цепи). В зависимости от того, какая метка в данный момент распространяется, изменяется K . Для каждого фиксированного K структура массива не отличается от структуры массива SOS , но принцип построения (заполнения) другой. Если в массиве SOS указаны все соседи вершины, то в массиве KOV указывается только тот сосед, от которого данная вершина получила K -ю метку. Причем вершина может получить любую из меток, но только один раз. Другими словами, вершина V_h может получить метку J на I -м шаге распространения в том случае, если она на $(I-1)$ -м шаге этой метки еще не получила.

Алгоритм преобразования графа $G'_\perp$ от множества $\{R\}_x$, $\{R\}_y$ и $\{R\}_z$ концевых пар к цепному списку, основан на использовании процедуры выделения точек пересечения концевых пар. Например,

необходимо найти соседей для точки 5 на рис. 4.9. Последовательно применяя процедуру пересечения отрезка x_1 с отрезками y_1 и z_3 , находим, что сосед слева по x — вершина 8, а сосед справа — вершина 2. Далее, применяя процедуру пересечения для отрезков y_2-x_3 и z_2-x_2 , получаем соответственно, что вершина 6 — сосед справа по y , а вершина 13 — сосед сверху по z . Аналогично находим соседей и для всех остальных вершин графа. Для удобства работы и повышения быстродействия алгоритма элементы в массиве **КТ** упорядочиваются по возрастанию координат сначала по z , затем по y и далее по x .

Задача построения по графу $G'_{\perp}$ связывающего дерева с оптимальным значением выбранного критерия качества может быть решена таким способом. С помощью некоторого алгоритма строятся все возможные деревья для i -й трассируемой цепи. Обозначим совокупность этих деревьев как $\{d_n\}_i$. Затем полным перебором $\{d_n\}_i$ определяется дерево $d_{ni\min}$ с оптимальной характеристикой $Hd_i = H_{\min}$. Построение деревьев ведется таким образом. Каждой вершине очередной трассируемой цепи присваивается метка, например, 1, 2, 3, ..., NC . Затем эти метки передаются соседним с ними вершинам по шести направлениям. В данном случае соседними вершинами будем считать вершины, принадлежащие одной концевой паре. Распространение меток начинается с первой из списка **KOV**, и последовательно просматриваются все точки списка. Но при этом распространение определенной метки от выбранной вершины происходит только в том случае, если она уже получила эту метку на предыдущем шаге. После просмотра всего списка проверяется условие наличия в массиве **KOV** хотя бы одного частного корня, т. е. вершины, которая имеет все метки. Если такой вершины нет, делается еще один просмотр, и так до тех пор, пока не будет найден частный корень. В этом случае считаем, что массив **KOV** полностью сформирован, и переходим к построению деревьев $\{d_n\}_i$. Количество деревьев равно количеству частных корней в массиве **KOV**. Построение дерева состоит в восстановлении путей прихода меток от вершин трассируемой цепи до частного корня. Это происходит с помощью зафиксированных в массиве **KOV** адресов и направлений соседних вершин, передавших соответствующие метки. Далее производится вычисление критерия качества для каждого построенного дерева и выбор дерева с минимальной характеристикой. Такое дерево запоминается для последующей обработки.

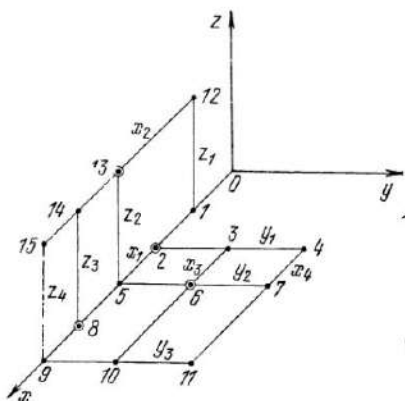


Рис. 4.9. Пример поиска соседних вершин в алгоритме построения цепного списка

Для того чтобы не произошло пересечение деревьев для различных цепей, необходимо дерево для i -й трассируемой цепи исключить из МСУ. Процедура исключения аналогична процедуре исключения концевых пар при генерации модели.

Укрупненная логическая схема подсистемы трассировки на объемной коммутационной модели представлена на рис. 4.10.

Блок 1 осуществляет ввод исходных данных (информация о размещении элементов, конструктивные и технологические требования, размер монтажной платы и т. п.).

Блок 2 производит построение объемной коммутационной модели по заданным условиям.

Блок 3 производит упорядочивание цепей по выбранному алгоритму для последующей трассировки.

Блок 4 исключает вершины (точки трассируемых цепей) из объемной коммутационной модели для исключения пересечения проводников, принадлежащих разным цепям.

Блок 5 выбирает из упорядоченного списка цепей очередную трассируемую цепь.

Блок 6 включает вершины очередной трассируемой цепи в объемную коммутационную модель.

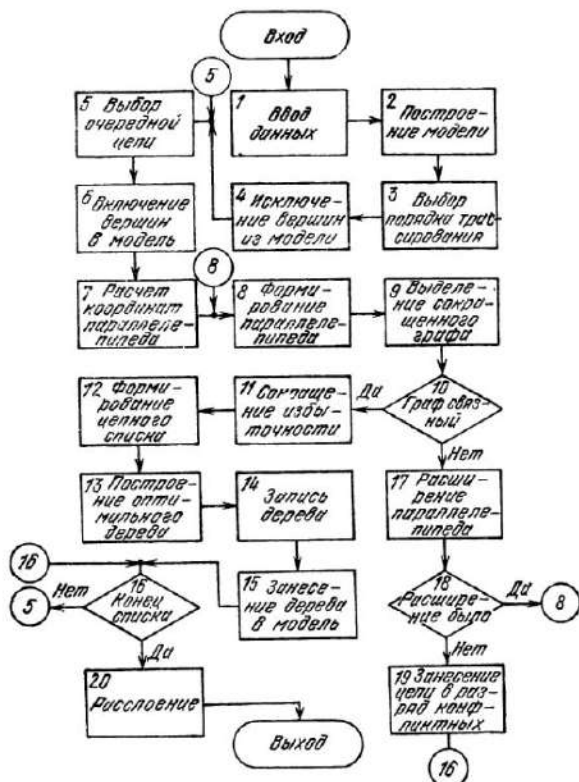


Рис. 4.10. Логическая схема подсистемы трассировки

Блок 7 определяет координаты стягивающего параллелепипеда.

Блок 8 формирует стягивающий параллелепипед из объемной коммутационной модели по заданным координатам.

Блок 9 выделяет из графа $G_{\perp}$ сокращенный граф. Здесь же вырабатывается признак, позволяющий судить о наличии хотя бы одного связывающего дерева для выбранной цепи.

Блок 10 проверяет, связный граф или нет. Если да, управление передается блоку 11, в противном случае — блоку 17.

Блок 11 сокращает избыточность в графе, т. е. окончательно формирует сокращенный граф $G'_{\perp}$.

Блок 12 представляет граф $G'_{\perp}$ цепным списком.

Блок 13 строит все возможные связные деревья для очередной трассируемой цепи и выбирает из них оптимальное по заданному критерию качества.

Блок 14 записывает выбранное оптимальное дерево для последующей обработки в массив занятых отрезков.

Блок 15 заносит выбранное оптимальное дерево в объемную коммутационную модель для исключения пересечения деревьев, принадлежащих различным цепям.

Блок 16 проверяет, все ли цепи были просмотрены. Если нет — управление передается блоку 5, если да — блоку 20.

Блок 17 изменяет соответствующие координаты параллелепипеда в меньшую или большую сторону на единицу, если это возможно.

Блок 18 проверяет, была ли изменена хотя бы одна координата стягивающего параллелепипеда. Если да — управление передается блоку 8, в противном случае — блоку 19.

Блок 19 заносит цепь в разряд конфликтных, т. е. запоминает координаты точек цепи для последующей дотрассировки (ручной или автоматической).

Блок 20 производит расслоение массива занятых отрезков по оси для последующего вывода слоев на АЦПУ. Формирует исходные данные для подсистемы выпуска документации.

Данный алгоритм позволяет производить трассировку соединений МЭА любой конструкции, в которой проводники можно представить ортогональной или квазиортогональной сетью.

Список литературы

4.1. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств. — М.: Сов. радио, 1977. — 384 с.

4.2. Основы проектирования микросистемной аппаратуры / А. Г. Алексенко, С. С. Бадулин, Л. Г. Барулин и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977. — 352 с., гл. 9.

4.3. Ступаченко А. А. Человек и ЭВМ в процессе инженерного проектирования. — Электрон. пром-сть, 1973, вып. 4, с. 7—14.

4.4. Преснухин В. В., Елшин Ю. М. Автоматизированное рабочее место разработчика радиоэлектронной аппаратуры. — Обмен опытом в радиопромышленности НИИЭИР. — 1976, вып. 12, с. 10—19.

4.5. Методы разбиения схем на конструктивно законченные части/ К. К. Морозов, А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн и др.; Под ред. К. К. Морозова. — М.: Сов. радио, 1978. — 136 с.

4.6. Преснухин Л. Н., Шахнов В. А., Кустов В. А. Основы конструирования микросборочных вычислительных машин. — М.: Высшая школа, 1976. — 408 с.

4.7. Штейн М. Е., Штейн Б. Е. Методы машинного проектирования цифровой аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1973. — 296 с.

5. ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ БГИС И МИКРОСБОРОК

Микросборка состоит из стандартизированной подложки с пассивными пленочными элементами и коммутационными соединениями, нанесенными методами тонкопленочной или толстопленочной технологии, и навесных бескорпусных компонентов. Следовательно, надежность и технологическая воспроизводимость микросборок, как и больших гибридных ИС, будет в основном определяться технологической воспроизводимостью и надежностью пленочной части микросборок и полупроводниковых бескорпусных ИС.

Опыт производства и эксплуатации ИС показывает, что качество технологического процесса и процент выхода годных тесно связаны с надежностью ИС. Эта взаимосвязь достаточно устойчива, хотя она и меняется в зависимости от вида ИС (полупроводниковая с биполярной или МДП-структурой, гибридная тонкопленочная или толстопленочная), от типа приборов и конкретного предприятия. Эти обстоятельства обусловили взаимосвязь методов расчета надежности с методами анализа и расчета их количественных характеристик: технологической воспроизводимости и безотказности.

5.1. Надежность БГИС и микросборок

Особенности оценки надежности ИС. Рассмотрение надежности БГИС и микросборок (МСБ) и их компонентов начнем с анализа надежности полупроводниковых ИС. Современный уровень надежности изделий электронной техники характеризуется кривой распределения интенсивности отказов (рис. 5.1) [5.8]. Из рисунка видно, что уровень надежности ИС достаточно высокий и оценивается в настоящее время интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

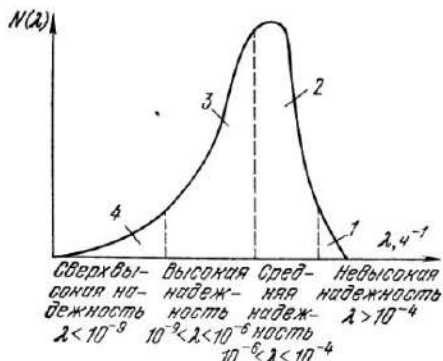


Рис. 5.1. Типовое распределение изделий электронной техники по интенсивности отказов:

1 — мощные и крупногабаритные приборы; 2 — приборы среднего уровня мощности; 3 — интегральные микросхемы и маломощные приборы; 4 — простейшие приборы, элементы приборов и ИС

При изменении надежности по экспоненциальному закону этой интенсивности отказов соответствует средняя наработка ИС до первого отказа

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{(10^{-7} \dots 10^{-8}) (365 \text{ дн} \times 24 \text{ ч})} \approx 1000 \dots 10\,000 \text{ лет.}$$

При таком уровне надежности ИС статистические методы количественной оценки интенсивности отказов, применявшиеся ранее, оказались неэффективными, так как для получения достоверных статистических данных за приемлемый интервал времени необходимо провести чрезвычайно трудоемкий эксперимент на огромном количестве образцов. Реализация указанного эксперимента сопряжена с большими экономическими затратами, не оправдывающими себя на практике.

Например, для оценки интенсивности отказов λ изделий с достоверностью $\gamma=0,95$ по результатам статистических испытаний N образцов в течение t часов (если надежность изменяется по экспоненциальному закону) можно принять, что вероятность безотказной работы всех N образцов $P(t)=0,05=e^{-N\lambda t}$, откуда $N\lambda t \approx 3$, а при обеспечении достоверности результатов статистических испытаний $\gamma \geq 0,95$ $N\lambda t \geq 3$.

Пользуясь полученным соотношением, определяем требуемую продолжительность испытаний партии ИС в количестве $N=300$ шт. для проверки их надежности при верхнем уровне $\lambda=10^{-7} \text{ ч}^{-1}$:

$$t \geq \frac{3}{N\lambda} = \frac{3}{300 \cdot 10^{-7}} = 10^6 \text{ ч.}$$

Для простоты расчетов принимаем $1 \text{ год} \approx 10^4 \text{ ч}$, отсюда $t \geq 10$ лет. Для испытаний в течение 1 года необходимо брать партию

$$N \geq \frac{3}{\lambda t} = \frac{3}{10^{-7} \cdot 10^4} = 3000 \text{ шт.}$$

При статистической проверке надежности ИС с $\lambda=10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ те же показатели возрастают на порядок, т. е. $t=100$ лет и $N=30\,000$ шт.

Приведенные расчеты показывают, что при $\lambda=10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ получение достоверных статистических данных о надежности ИС уже требует значительных экономических затрат, а при более высоком уровне надежности ИС, когда $\lambda < 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, получение таких данных практически неосуществимо, так как требующийся размер выборки оказывается равным объему производства или больше него, а продолжительность испытаний превышает время разработок ИС и освоение их в серийном производстве.

Непригодность статистических методов оценки надежности РЭА на дискретных элементах для оценки надежности ИС привела к необходимости развития физико-статистических методов, позволяющих устанавливать причинно-следственные связи, определяющие надежность ИС. Тесная взаимосвязь качества технологии ИС и надежности, высокая степень однородности и контроли-

руемости технологических операций позволяют повышать надежность ИС путем изучения причин отказов и совершенствования конструкции и технологии ИС.

В настоящее время испытания надежности ИС строятся на исследовании механизма отказов, т. е. вместо длительных испытаний или параллельно с ними проводятся небольшие по объему ускоренные испытания на разрушение с целью выявления причин отказов и разработки практических мер для исключения или уменьшения вероятности отказов.

Метод исследования механизма отказов основан на том, что независимо от абсолютного значения надежности того или иного элемента ИС всегда остается возможность ее дальнейшего повышения. Анализ механизма отказов играет в настоящее время основную роль в комплексе мероприятий, обеспечивающих надежность ИС, поскольку позволяет определить виды их отказов.

Полезность рассмотрения каждого отказа и попыток изучения параметров надежности каждой ИС обусловлена тем, что каждая схема представляет совокупность вполне определенных технологических циклов, например планарного процесса, монтажа, цикла проверок и т. д. Отказ каждого элемента ИС содержит полезную информацию о недостатках конструкции, технологии или оборудования. Поэтому результаты анализа отказов могут успешно использоваться для улучшения конструкции и технологии изготовления ИС, а также при выборе эффективных критериев отработки для производственного контроля и различного рода испытаний.

Основным недостатком данного метода пока является то, что он не позволяет получать численных значений интенсивностей отказов, по которым можно было бы вести расчет.

Оптимальный подход к проблеме надежности должен использовать лучшие стороны как метода исследования механизма отказов, так и метода получения интенсивности отказов, так как задача состоит в том, чтобы знать надежность ИС и повышать ее. Однако существующие статистические методы не позволяют эффективно решать эту задачу.

В связи с изложенным вполне понятен интерес к различного рода косвенным методам оценки надежности ИС и ускоренным испытаниям, проводимым при форсированных режимах: ступенчатом изменении электрической нагрузки, механических перегрузках и при температурах, существенно превышающих рабочую. В ряде работ доказывается, что связь между распределениями долговечности и рабочей температурой ИС для большинства механизмов отказов описывается уравнением Аррениуса [5.1, 5.3]. В основу этих испытаний положено известное положение о том, что в физических процессах, форсируемых температурой, зависимость скорости процесса от температуры выражается уравнением Аррениуса $R = R_0 \exp(-E_a/kT)$, где R — скорость реакции; R_0 — постоянная; E_a — энергия активации, эВ; k — постоянная Больцмана ($8,63 \times 10^{-5}$ эВ/К); T — абсолютная температура, К.

Предполагается, что и время отказа должно подчиняться температурной зависимости уравнения Аррениуса, хотя и скорость реакции связана с временем отказа некоторой неопределенной функцией. Скорость физических и химических процессов, лежащих в основе ряда механизмов отказов, согласно закону Аррениуса примерно удваивается на каждые 10° повышения температуры, что позволяет сократить либо продолжительность испытаний, либо число образцов.

Однако данный метод не является полноценным решением проблемы: во-первых, трудно доказать, что с повышением температуры не появляются новые, специфические причины отказов и, во-вторых, по мере уменьшения интенсивности отказов даже ускоренные испытания будут недостаточно быстрыми.

Все существующие в настоящее время методики ускоренных испытаний нуждаются в дальнейшем совершенствовании и уточнении границ применимости, так как на практике наблюдаются значительные расхождения между теоретическими и эмпирическими коэффициентами ускорения отказов, часто в несколько раз и даже на порядок. Это осложняет получение достаточно достоверных сведений об интенсивности отказов ИС.

Ускоренные испытания оказались наиболее эффективными не для количественной оценки интенсивности отказов ИС, а для стимулирования отказов. Анализ механизмов отказов, происходящих при повышенных температурах, позволил изготовителям ИС добиться в течение четырех лет (с 1970 по 1975 гг.) снижения интенсивности отказов на один-два порядка. Но и эта величина, по их мнению, не является пределом.

Кроме того, температурные испытания оказались наиболее эффективным средством выявления дефектных ИС. Поэтому в настоящее время непременным условием получения высоких показателей надежности ИС считается проведение электротренировки в ужесточенных режимах и отбраковка дефектных ИС по ее результатам.

2. **Характеристика отказов ИС и микросборок.** Среди бескорпусных ИС, используемых в микросборках, наибольшее распространение получили кремниевые ИС. Это объясняется двумя причинами: 1) кремниевые ИС имеют более высокие рабочие температуры ($T \approx +150^\circ\text{C}$) по сравнению с германиевыми ($T \approx +80^\circ\text{C}$) и на два-три порядка меньшие обратные токи p - n -переходов из-за большей ширины запрещенной зоны у кремния; 2) отработанность планарной технологии на кремнии позволяет достаточно легко получать термическим окислением высококачественные маскирующие и пассивирующие пленки двуокиси кремния SiO_2 .

Базовыми активными элементами в рассматриваемых ИС являются диоды, биполярные транзисторы и полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы). Опыт эксплуатации и испытаний кремниевых ИС выявил наиболее характерные виды отказов [5.1—5.3]. Установлено, что им свойственны внезапные отказы, обусловленные качеством изготовления (технологиче-

скими дефектами). Основные виды отказов указанных выше элементов в ИС совпадают с видами отказов дискретных полупроводниковых приборов. Наиболее характерными для них являются три вида отказов: обрывы металлизации и выводов, короткое замыкание (к. з.) $p-n$ -переходов и уход величин электрических параметров за установленные допуски.

Некачественные соединения являются одним из основных источников отказов ИС и составляют более 50% всех отказов. Недостатками металлизации, контактов и внешних выводов в значительной мере объясняется тот факт, что прогнозируемая высокая надежность, присущая собственно ИС, в настоящее время реализована не полностью.

Обрывы выводов наиболее часто происходят по двум причинам: 1) в результате сдвиговых усилий в местах контактов, возникающих при колебаниях температуры, вследствие различия коэффициентов температурного расширения выводов и защитного покрытия бескорпусных ИС из эпоксидного компаунда, смолы или эмали и 2) в результате пережима мягкого вывода вблизи контакта в процессе термокомпрессии, ведущего к сужению поперечного сечения проводника, перегреву и расплавлению его при большом токе.

Отказы металлизации чаще всего возникают под влиянием токов повышенной плотности, высоких температур, а также в результате длительного воздействия температурных и электрических нагрузок. Основные виды отказов металлизации следующие:

— обрывы металлизации в результате электродиффузии (электромиграции) металла и выгорания мест повышенной плотности тока, образующихся в местах утончения металлической пленки при переходах через ступеньки окисла, при изменении конфигурации токоведущих дорожек и др.;

— обрывы, вызванные электролитической и химической коррозией алюминия при некачественном защитном покрытии и загрязнении поверхности кристалла;

— к. з. металлизации через отверстия в окисле или в результате образования «мостиков» между токоведущими дорожками в процессе электролитической коррозии.

Короткие замыкания $p-n$ -переходов в диодах и биполярных транзисторах возникают в результате:

— проплавления металлизации через диффузионные слои в кремнии при высоких уровнях рассеиваемой мощности;

— электродиффузии кремния в алюминий при высоких плотностях тока ($\approx 10^6$ А/см²) с одновременным проникновением алюминия в диффузионные слои;

— миграции алюминия по поверхности кремния между алюминиевыми контактными площадками при наличии разности потенциалов и повышенных температурах ($\geq +150^\circ\text{C}$).

Наиболее часто имеют место пробой $p-n$ -переходов, вызванные перегрузкой по току и напряжению. Эти перегрузки возникают в результате неправильного (с отклонениями от ТУ) использова-

ния ИС в микросборках. При пробоях рассеиваются большие мощности, приводящие к нагреву кристалла вплоть до расплавления металлизации и проникновения металла через диффузионные слои в эмиттере и базе. В результате происходит к. з. p — n -переходов эмиттер—база и база—коллектор. Асимметричные вольт-амперные характеристики p — n -переходов вырождаются при этом в прямые линии с наклонами, равными величинам малого сопротивления между замкнутыми электродами.

Для ИС с МДП-транзисторами наиболее характерными отказами являются к. з. перехода исток—затвор вследствие пробоя диэлектрика, разрывы металлизации на контактных площадках истока и стока в результате механических деформаций, коррозия и явления пробоя в кремнии между диффузионными областями истока и стока.

Постепенные отказы ИС проявляются в результате изменения во времени величин электрических параметров у элементов: обратных токов и пробивного напряжения диодов, обратных токов, коэффициента усиления по току и пробивных напряжений транзисторов в ИС с биполярной структурой; порогового напряжения, тока стока и крутизны МДП-транзисторов в ИС с МДП-транзисторами.

Постепенные отказы проявляются в ухудшении параметров ИС во времени и выходе их за пределы установленных допусков. Такого рода деградационные изменения электрических параметров у элементов ИС в основном обусловлены влиянием ионизированных примесей внутри и на поверхности пассивирующего окисла и влаги в корпусе. При наличии в кристалле кремния повышенного содержания ионов быстро диффундирующих примесей золота, меди или железа постепенные отказы вызываются также диффузией примесей в объеме активных элементов.

Практика показывает, что указанные выше факторы, вызывающие постепенные отказы ИС, проявляются при высокотемпературных испытаниях под электрической нагрузкой в течение 500 ... 1000 ч. Поэтому универсальным средством отбраковки потенциально ненадежных схем с дефектами, ведущими к внезапным или постепенным отказам, является применяющаяся в настоящее время электротермотренировка.

Кроме того, постепенные (деградационные) отказы появляются в результате изменения внутренних свойств материалов (старения), используемых в ИС, которые в принципе исключить невозможно. Но изучение физики старения ИС открывает возможности прогнозирования времени появления таких отказов, а следовательно, их предотвращения.

С течением времени, по мере совершенствования технологии и устранения причин возникновения внезапных отказов предполагается, что процентный состав постепенных отказов будет возрастать при одновременном уменьшении абсолютного количества отказов всех видов. Приведенные обстоятельства вызывают повышенный интерес к изучению постепенных отказов, причин их появления и возможностей прогнозирования.

Представляет интерес эволюция отказов кремниевых ИС по мере роста степени интеграции. С этой целью на рис. 5.2 представлены обобщенные результаты анализа отказов биполярных ИС, проведенного на основе большого числа отказов в условиях эксплуатации. На рисунке даны относительные распределения по видам отказов для ИС I, II, III степени интеграции, позволяющие сделать некоторые выводы:

— по мере роста степени интеграции происходит увеличение удельного веса отказов, связанных с металлизацией, диффузией и инородными частицами; этот рост обусловлен уменьшением геометрических размеров компонентов;

— с ростом сложности ИС наблюдается уменьшение доли отказов, связанных с неправильным применением приборов, что объясняется освоением радиопредприятиями методов производства МЭА на ИС и ростом стоимости такого рода ошибок.

Наиболее характерными отказами элементов тонкопленочной части МСБ являются: разрывы соединений между контактной зоной на поверхности подложки ИС и выводом корпуса; разрывы металлизированных соединительных линий, вызванные царапинами (кроме того, эти разрывы могут возникать при пересечении металлизированных соединений с оксидным слоем в местах, где толщина слоя мала; в связи с этим возникает местный перегрев, который влечет за собой расплавление металла и обрыв); короткое замыкание металлизированных соединительных линий вследствие дефектов травления при изготовлении соединений и контактных площадок.

Основными пленочными элементами МСБ являются резисторы. Отказы пленочных резисторов определяются большей частью технологическими дефектами: механическими поврежденными резистивного слоя и загрязнением резистивных пленок. Наблюдающийся иногда положительный дрейф сопротивлений тонкопленочных резисторов определяется окислением резистивного слоя из-за некачественного защитного покрытия. Однако опыт эксплуатации и испытаний БГИС и МСБ показывает высокую надежность пленочной части МСБ. Согласно [5.3] основная часть отказов БГИС и

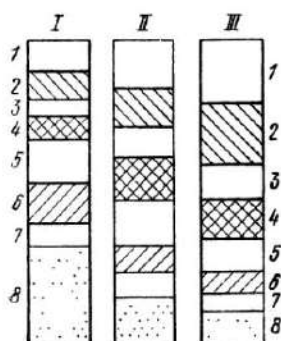


Рис. 5.2. Диаграмма относительного распределения отказов ИС первого, второго и третьего уровня интеграции:

1 — нарушение металлизации; 2 — дефекты диффузии; 3 — попадание инородных частиц; 4 — невыявленные механизмы отказов; 5 — нарушение слоя оксида; 6 — дефекты микромонтажа; 7 — некачественный монтаж кристалла; 8 — неправильное применение

МСБ связана с дефектами бескорпусных навесных элементов и контактных соединений. В ряде источников [5.1, 5.4] подчеркивается, что надежность БГИС определяется качеством контактов и проволочных связей.

Анализ отказов ИС показывает, что преобладающие виды отказов могут изменяться в широких пределах не только в зависимости от вида ИС, но и в зависимости от типа прибора, партии и завода-изготовителя, что необходимо учитывать при анализе надежности МЭА и ее отказов. Изучению физики отказов ИС в настоящее время уделяется большое внимание. Разработаны сложные и тонкие физические методы для распознавания механизмов и определения причин отказов: электронная микроскопия со сканированием, световая микроскопия, рентгеновский анализ, метод ионной бомбардировки и др.

Выявление причин отказов и распознавание «ранних» признаков их появления служат хорошим фактическим материалом для дальнейшего развития причинной (физической) теории надежности и создания методов расчета параметров надежности на основе данных, характеризующих типовые технологические процессы, конструктивные решения и оборудование. Раскрыв механизмы отказов ИС, можно создать и методы ускоренных испытаний, позволяющие получать количественную оценку надежности ИС и оперативную информацию для постоянного совершенствования их технологии. Решение этих вопросов позволит вооружить разработчиков методами достоверного расчета параметров надежности МЭА при ее проектировании.

3 Влияние эксплуатационных условий. Широкое использование ИС в электронной аппаратуре космических летательных аппаратов вынуждает проводить анализ надежности ИС в условиях воздействия нестационарного ядерного излучения, влияния на микросхемы потоков быстрых нейтронов, коротких импульсов рентгеновского и гамма-излучения. Нестационарное ядерное излучение характеризуется кратковременной (до 1 мкс) дозой гамма-радиации. Такая доза облучения слишком мала, чтобы вызвать стойкое повреждение. Нестационарная радиация вызывает ионизацию воздуха и материалов компонентов, в результате чего повышается проводимость сопротивлений и утечка в конденсаторах, изолирующих материалах и других компонентах [5.5, 5.10]. Кроме того, нестационарная радиация приводит к наведению токов в активных и пассивных компонентах ИС. Это особенно опасно для транзисторов, так как наводимые токи в области базы транзисторов усиливаются в соответствии с его коэффициентом усиления. Влияние нестационарного ядерного излучения на интегральные схемы проявляется также в виде перераспределения зарядов, что вызывает импульсы тока и напряжения, спад которых определяется постоянной времени схемы. Следовательно, результирующее воздействие излучения может оказаться значительно продолжительнее радиационных импульсов и вызывать стойкие повреждения, которые приводят к выходу ИС из строя.

Анализ радиационной стойкости ИС показывает, что БГИС, в которых компоненты разделены на изолирующей подложке, выдерживают наибольшие дозы гамма-облучения по сравнению с другими ИС — порядка $10^7 \dots 10^8$ рад/с. Граничная зона облучения полупроводниковых ИС определяется шириной базы транзисторов, так как влияние излучения понижается с уменьшением ширины базы. В среднем они выдерживают гамма-облучения до 10^6 рад/с.

Суммарное воздействие на ИС облучения быстрыми нейтронами складывается из атомных и электронных процессов, которые ведут к уменьшению коэффициента усиления каждого транзистора по току: $\delta(1/\alpha) \approx 0,2 \Phi / \dot{f}_\alpha K$, где α — коэффициент усиления транзистора по току; Φ — поток нейтронов; $\dot{f}_\alpha$ — граничная частота усиления транзистора по току; $K = f(\rho_b, E_n)$ — коэффициент, зависящий от ρ_b — удельного сопротивления базы; E_n — энергия падающего потока нейтронов.

Приведенное соотношение позволяет приблизительно оценить ожидаемую степень влияния той или иной дозы облучения быстрыми нейтронами. Кроме потери усиления по току, нейтронное облучение вызывает увеличение тока утечки и увеличение объемного удельного сопротивления, сопровождающееся повышением пробивного напряжения. Чтобы уменьшить это воздействие радиации, уменьшают размеры активных приборов, проводят мелкую диффузию базы, заменяют диффузионные резисторы тонкопленочными из нихрома или тантала. Однако в решении проблемы обеспечения надежности ИС при ядерном облучении пока сделаны только первые шаги, и она еще ждет своего решения.

Надежность ИС в сильной степени зависит от электрической нагрузки и температуры окружающей среды. Однако разработка ИС для конкретных напряжений и токов питания предусматривает, чтобы рассеиваемая ими мощность была мала, а предельная рабочая температура не вызывала перенапряжений на $p-n$ -переходах. Поэтому несмотря на критичность ИС к электрическим перегрузкам правильное применение ИС в МЭА в соответствии с техническими условиями гарантирует высокий уровень их надежности.

Вследствие малых размеров и монокристаллической структуры ИС обладают большой механической прочностью. Редко встречающиеся отказы при механических испытаниях с нагрузками, значительно превышающими реальные механические нагрузки, в виде разрушения кристалла, отслоения контактных площадок, разрыва выводов и нарушения спаев даже не позволяют установить их связь со ступенчато-возрастающей механической нагрузкой.

Накопленный материал по результатам испытаний и эксплуатации показывает также, что надежность ИС слабо зависит от числа компонентов, тогда как увеличение числа технологических операций и объема технологической обработки бесспорно ведет к увеличению вероятности возникновения отказов. Это лишний раз указывает на взаимосвязь технологического процесса с надеж-

ностью ИС и на эффективность производственного контроля, при котором более сложные ИС имеют такую же надежность, как и более простые. Фирма ARink установила, что надежность ИС, независимо от их сложности, равна надежности транзисторов или даже выше нее. Следовательно, при проектировании МЭА желательно применять ИС с высоким уровнем интеграции, позволяющим существенно повышать надежность проектируемой аппаратуры.

Результаты анализа работы ИС, изучение причин и механизма их отказов, влияния на них внешних воздействий, ядерного облучения показывают, что автоматизация производственного процесса, дальнейшее повышение уровня интеграции, повышение надежности соединений за счет перехода от биметаллических к монометаллическим соединениям, а также накопление опыта и появление новых идей, материалов и технологических приемов является убедительным залогом дальнейшего роста надежности ИС.

Изготовители ИС предсказывают быстрое уменьшение интенсивности отказов полупроводниковых ИС до $10^{-9} \dots 10^{-11} \text{ ч}^{-1}$, что позволит увеличить надежность БГИС и микросборок, использующих бескорпусные полупроводниковые ИС [5.5].

5.2. Методы расчета надежности БГИС и микросборок

Расчет надежности БГИС и МСБ в большинстве случаев ограничивается расчетом интенсивности отказов. Разработка методов расчета интенсивности отказов БГИС и МСБ, учитывающих их специфические особенности, ведется в настоящее время в двух направлениях:

— на базе изучения физики и механизма отказов ИС и БГИС, взаимосвязи физических явлений в ИС с их надежностью.

— на базе анализа отказов ИС и приспособления существующей статистической теории надежности к расчету интенсивности отказов ИС и БГИС.

Физические методы расчета надежности получили значительное развитие и используются при проектировании полупроводниковых ИС. Разработаны математические модели для некоторых видов механизмов отказов ИС, математические модели, устанавливающие взаимосвязь отдельных электрических и конструктивных параметров ИС с их надежностью, что облегчает проектирование и разработку высоконадежных микросхем.

Однако физические методы интегральной (общей) оценки интенсивности отказов ИС с учетом реальных эксплуатационных условий пока не разработаны. Поэтому при расчетах надежности МЭА наибольшее применение получили пока статистические методы расчета интенсивности отказов ИС, БГИС и МСБ.

Статистический метод. В основу этого метода положено предположение о том, что любая микросхема может рассматриваться как обычный функциональный узел, состоящий из разнородных дискретных элементов. Правомерность такого допущения обосно-

ываается тем, что в настоящее время преобладающее развитие получила дискретная микроэлектроника и современные ИС представляют собой совокупность дискретных элементов. Следовательно, и здесь справедлив экспоненциальный закон надежности. Указанные допущения позволяют рассчитывать интенсивность отказов ИС простым суммированием интенсивностей отказов элементов, составляющих схему.

Различие существующих методик расчета интенсивностей отказов ИС состоит лишь в степени учета факторов, влияющих на надежность ИС и уровень надежности элементов. Приведем одну из них, используемую для ориентировочной оценки интенсивности отказов ИС. В основу расчетов этой методики положены следующие предположения: имеют место только внезапные отказы; коэффициенты нагрузки элементов ИС равны единице; коэффициенты режима работы a ИС являются функцией лишь положительной температуры окружающей среды, при которой проводимость ИС и мощность, рассеиваемая на ней, растут, т. е. $a=f(T)$.

Методика учитывает особенности образования R - и C - структур в полупроводниковых ИС. Так как резисторы и конденсаторы в них образуются прямыми и обратно смещенными p — n -переходами, то интенсивность их отказов берется такой же, что и у диодов.

Расчет интенсивности отказов корпусированных полупроводниковых ИС ведется по формуле

$$\lambda_{ИС} = [N_T a_T \lambda_T + N_{д(R, C)} a_d \lambda_d + (3N_T + 2N_{д(R, C)} + N_B) \lambda_{соед}] K_B, \quad (5.1)$$

где N_T — количество условных транзисторных переходов; $N_{д(R, C)}$ — количество условных диодных переходов (общее число диодов, резисторов и конденсаторов); a_T и a_d — коэффициенты режима работы соответственно транзисторных и диодных переходов; N_B — число внешних выводов; λ_T , λ_d , $\lambda_{соед}$ — интенсивность отказов соответственно транзисторного перехода, диодного перехода и соединения для нормальных условий; K_B — коэффициент вибраций.

У бескорпусных ИС соединения контактных площадок с выводами корпуса отсутствуют, поэтому при расчете их интенсивности отказов принимают $N_B=0$. Средние статистические значения интенсивностей отказов, рекомендуемые для расчетов, следующие: $\lambda_T=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{д(R, C)}=0,6 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{соед}=0,1 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

Значения коэффициентов режима работы, рекомендуемые для различной температуры окружающей среды, приведены в табл. 5.1.

Полупроводниковые ИС общего применения универсальны и предназначены для многоцелевого использования. В конкретном

Коэффициент режима работы	Температура, °C						
	20	30	40	50	60	70	80
a_T	1,0	1,35	1,85	2,60	3,60	4,90	6,20
a_d	1,0	1,27	1,68	2,00	2,60	3,40	4,10

схемном включении некоторые цепи и внешние выводы ИС могут не использоваться, а следовательно, они не будут влиять и на надежность данного устройства. Поэтому расчет интенсивности отказов полупроводниковых ИС при проектировании МСБ проводится с учетом их реального включения в электрическую схему МСБ, отсеивания цепей и внешних выводов ИС, отказы которых не будут влиять на надежность работы данной МСБ. Следовательно, в зависимости от конкретных включений в схемы одна и та же ИС может иметь различные уровни надежности.

При расчете интенсивности отказов БГИС и микросборок по изложенной выше методике учитываются возможности использования в них бескорпусных транзисторов, диодов и ИС, пленочных резисторов и конденсаторов, а также навесных микроминиатюрных компонентов. Расчет корпусированных БГИС и МСБ ведется по формуле

$$\lambda_{\text{МСБ}} = \left\{ \sum_{i=1}^k \lambda_{\text{ИС } i} + N_{\text{т}} a_{\text{т}} \lambda_{\text{т}} + N_{\text{д}} a_{\text{д}} \lambda_{\text{д}} + N_{\text{Р}} a_{\text{Р}} \lambda_{\text{Р}} + N_{\text{С}} a_{\text{С}} \lambda_{\text{С}} + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N_{\text{н}}} \lambda_{\text{н } j} + \left[\sum_{i=1}^k N_{\text{ИС } i} + N_{\text{в}} + 3N_{\text{т}} + 2(N_{\text{д}} + N_{\text{Р}} + N_{\text{С}} + N_{\text{н}}) \right] \lambda_{\text{соед}} \right\} K_{\text{в}}. \quad (5.2)$$

Здесь k — количество бескорпусных ИС; $N_{\text{т}}$, $N_{\text{д}}$, $N_{\text{Р}}$, $N_{\text{С}}$, $N_{\text{н}}$ — число соответственно бескорпусных транзисторов и диодов, пленочных резисторов и конденсаторов, навесных пассивных компонентов; $N_{\text{ИС}}$ — количество выводов ИС; $a_{\text{Р}}$ и $a_{\text{С}}$ — коэффициенты режима работы пленочных резисторов и конденсаторов; $\lambda_{\text{ИС } i}$ — интенсивность отказов i -й полупроводниковой бескорпусной ИС; $\lambda_{\text{н } j}$ — интенсивность отказов навесного пассивного j -го элемента; $\lambda_{\text{Р}}$ и $\lambda_{\text{С}}$ — интенсивности отказов пленочных резисторов и конденсаторов.

Остальные обозначения те же, что и в предыдущей формуле.

Рекомендуемые значения коэффициентов режима работы пленочных резисторов и конденсаторов в зависимости от температуры окружающей среды даны в табл. 5.2.

Из таблицы видно, что пленочные конденсаторы обладают недостаточной надежностью, особенно при повышенных температурах, когда происходит интенсивная диффузия металла обкладок по порам диэлектрика, ведущая к коротким замыканиям. Это обстоя-

Таблица 5.2

Коэффициент режима работы	Температура, °C						
	20	30	40	50	60	70	80
$a_{\text{Р}}$	1,0	1,15	1,40	1,95	2,80	3,50	4,40
$a_{\text{С}}$	1,0	1,26	1,71	2,20	3,35	5,70	12,40

тельство явилось одной из причин снижения количества пленочных конденсаторов, применяющихся в МСБ.

Средние статистические значения интенсивностей отказов пленочных резисторов, конденсаторов и соединений в БГИС и МСБ следующие: $\lambda_R=0,1 \cdot 10^{-8} \text{ч}^{-1}$; $\lambda_C=0,5 \cdot 10^{-8} \text{ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{соед}}=0,1 \times 10^{-8} \text{ч}^{-1}$.

Расчет интенсивности отказов пассивных навесных компонентов БГИС и микросборок с учетом электрического режима работы и эксплуатационных условий ведется известными методами, используемыми при расчете РЭА на дискретных элементах. При расчете интенсивности отказов бескорпусных микросборок, так же, как и при расчете бескорпусных полупроводниковых ИС, полагают $N_B=0$.

Рассмотренная методика при высокой достоверности исходных данных о надежности элементов позволяет получать приемлемую точность расчетов надежности ИС и МСБ. Однако очевидны ее слабые стороны.

Во-первых, она базируется на традиционном представлении, характерном для радиоаппаратуры на дискретных элементах, что ИС и МСБ представляют собой совокупность разнородных деталей. Исследования показывают, что степень функциональной сложности ИС слабо отражается на их надежности. Она не учитывает характерных для ИС и МСБ конструктивных и технологических особенностей, определяемых интегральной технологией.

Во-вторых, эта методика опирается на статистику фиксации отказов отдельных элементов ИС без анализа механизмов и причин их отказов. Поэтому она является временной и нуждается в совершенствовании по мере изучения физики отказов ИС. В настоящее время эта методика применяется для сравнительной, ориентировочной оценки надежности альтернативных решений при выборе варианта проектируемой МЭА, а также для сравнения надежности проектируемого изделия с имеющимися аналогами. При этих расчетах абсолютная ошибка расчета не играет большой роли и не предъявляется жестких требований к достоверности исходной информации о надежности элементов ИС.

Причинный (физический) метод. Этот метод разработан на основе причинного (физического) подхода к проблеме надежности. Из числа существующих статистических методов оценки надежности причинный метод расчета наиболее полно отражает конструктивные и технологические особенности ИС и базируется на статистическом анализе физики и причин отказов ИС. При разработке данного метода учтены следующие особенности, характерные для ИС:

— при современном уровне надежности ИС и высоких темпах разработок функциональных структур ИС, совершенствования и производства изделий электронной техники, непрерывном росте уровня интеграции невозможно получить данные о надежности всех видов ИС путем прямых статистических испытаний. Получе-

ние таких данных требует больших экономических затрат, а приобретаемая информация быстро устаревает;

— накопленный материал по результатам испытаний ИС показывает, что надежность ИС слабо зависит от числа элементов (степени интеграции), но в значительной мере определяется качеством технологического процесса: качеством технологического оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры, числом технологических операций и объемом технологической обработки;

— базовые технологические процессы изготовления ИС (биполярная технология, технология МДП ИС и др.) отличаются сравнительным постоянством. Консерватизм и однотипность структуры базовых технологических процессов связаны с большими капитальными затратами и стандартизацией технологического оборудования и процессов.

Постоянство базовых технологических процессов изготовления ИС указывает на целесообразность перехода от оценки надежности ИС с одинаковой функциональной структурой к оценке надежности технологически однотипных ИС. Это позволит уменьшить объем статистических испытаний, а полученная информация о их надежности будет достаточно устойчивой и достоверной до смены технологического оборудования.

Отмеченные выше особенности и положены в основу причинного метода расчета интенсивности отказов ИС. Он базируется на предположении относительного постоянства базовых технологических процессов и тесной связи качества производства ИС с их надежностью. Метод ориентирован на расчет надежности технологически однотипных ИС.

При таком подходе к проблеме надежности ИС открываются возможности изучения причин, физики и механизмов отказов ИС и установления их связей с базовой технологией с целью совершенствования системы управления качеством ИС, а также ускоренного выявления потенциально дефектных и ненадежных экземпляров ИС.

Анализ отказов ИС в МЭА показывает, что основными их источниками являются невыявленные нарушения технологического процесса изготовления ИС и их использования. При этом преобладают внезапные отказы. Для оценки интенсивности отказов ИС возникает необходимость систематизировать отказы и выделить в них компоненты ненадежности. При этом руководствуются правилом, что компонентами надежности могут быть те составные части ИС, которые обладают определенной конструктивной или технологической независимостью, допускают изготовление с помощью сравнительно замкнутой последовательности технологических операций и имеют количественные показатели, удобные для контроля и анализа отказов.

Расчленение ИС на компоненты ненадежности носит условный характер и определяется возможностями и удобствами получения статистической информации об уровне их надежности.

Анализ и систематизация данных по отказам полупроводниковых ИС показывает, что их надежность определяется четырьмя компонентами ненадежности: внешними соединениями, включая выводы корпусов ИС и соединения их с контактами печатной или пленочной платы; внутренними контактными устройствами, обеспечивающими соединение легированных областей полупроводника с металлизацией (сюда же относятся затворы МДП-структур), корпусами ИС, площадью кристаллов.

Отсюда при экспоненциальном законе надежности обобщенную модель интенсивности отказов ИС можно представить в следующем виде:

$$\lambda_{\text{ИС}} = \lambda_{\text{с}} + \lambda_{\text{КУ}} + \lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{п}}, \quad (5.3)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ — интенсивность отказов внешних соединений; $\lambda_{\text{КУ}}$ — интенсивность отказов внутренних контактных устройств; $\lambda_{\text{к}}$ — интенсивность отказов корпусов ИС, обеспечивающих герметизацию схемы; $\lambda_{\text{п}}$ — интенсивность отказов кристалла, определяемая его поверхностью.

Приведенная модель положена на данном этапе в основу причинного метода расчета интенсивности отказов ИС. Причинный метод объединяет по существу две методики расчета: прогнозирования надежности технологически однотипных ИС с различной функциональной структурой по известной надежности одной ИС и расчет интенсивности отказов ИС с учетом качества производства и эксплуатационных условий.

Прогнозирование надежности технологически однотипных ИС с различной функциональной структурой по известной надежности одной ИС. На основе проведенных выше рассуждений можно утверждать, что уровень надежности ИС различной функциональной сложности, изготавливаемых по одной и той же базовой технологии, будет определяться лишь различным количеством компонентов ненадежности. А компонент ненадежности, общий для любой ИС, будет иметь постоянный уровень надежности, определяемый качеством базового технологического процесса.

На основе этих предположений будем считать, что по результатам испытаний партии ИС одного типа определена ее интенсивность отказов. Испытываемая ИС имеет: $N_{\text{с}0}$ — число внешних соединений; $N_{\text{КУ}0}$ — число внутренних контактных устройств (и затворов) при использовании МДП ИС; $N_{\text{к}0}$ — усредненное число корпусов на один кристалл (при совместном использовании корпусированных и бескорпусных ИС $N_{\text{к}0} < 1$, при применении корпусированных ИС $N_{\text{к}0} = 1$); $N_{\text{п}0}$ — среднюю активную площадь.

С учетом этих данных математическую модель надежности испытываемой ИС можно представить в следующем виде:

$$\lambda_0 = \lambda_{\text{с}1} N_{\text{с}0} + \lambda_{\text{КУ}1} N_{\text{КУ}0} + \lambda_{\text{к}1} N_{\text{к}0} + \lambda_{\text{п}1} N_{\text{п}0}, \quad (5.4)$$

где $\lambda_{\text{с}1}$ — интенсивность отказов, приведенная к одному внешнему соединению; $\lambda_{\text{КУ}1}$ — интенсивность отказов одного внутреннего КУ;

$\lambda_{к1}$ — интенсивность отказов, приведенная к одному корпусу ИС;
 $\lambda_{п1}$ — интенсивность отказов, приведенная к единице активной поверхности кристалла, т. е. его топологической площади за вычетом внешних контактных зон, зазоров на скрайбирование, тестовых структур и знаков совмещения и маркировки.

Из уравнения (5.4) нетрудно определить количественное распределение отказов ИС по компонентам ненадежности:

$$\xi_c = \frac{\lambda_{c1} N_{c0}}{\lambda_0}; \quad \xi_k = \frac{\lambda_{k1} N_{k0}}{\lambda_0}; \quad \xi_{кУ} = \frac{\lambda_{кУ1} N_{кУ0}}{\lambda_0}; \quad \xi_{п} = \frac{\lambda_{п1} N_{п0}}{\lambda_0} \quad (5.5)$$

Коэффициенты ξ_c , $\xi_{кУ}$, ξ_k и $\xi_{п}$ характеризуют количественное распределение отказов по компонентам ненадежности. В табл. 5.3 приведены эти величины для биполярных и МДП ИС на основании статических материалов, систематизированных Даммером [5.1] Очевидно, что

$$\xi_c + \xi_{кУ} + \xi_k + \xi_{п} = 1. \quad (5.6)$$

Таблица 5.3

Основные виды отказов	Распределение отказов	
	Биполярные ИС	МДП ИС
Отказы внешних соединений	0,33	0,20
Нарушения, зависящие от площади и числа контактов (затворов) металлизации (включая отказы внутренних КУ, плохую адгезию и неоднородность толщины пленок, царапины и микроотверстия, микротрещины в проводящих пленках на „ступеньках“ окисных слоев)	0,26	0,32
Отказы, определяемые нарушениями герметичности корпусов и прочими причинами, пропорциональными числу герметизации в МЭА	0,16	0,20
Отказы, зависящие от площади активной поверхности подложки ИС и определяемые нарушениями при фотолитографии, диффузии и механической обработке или загрязненности	0,25	0,28

Имея в виду сравнительное постоянство базового технологического процесса, можно предположить, что приведенные в табл. 5.3 коэффициенты будут сохраняться и при выпуске по той же базовой технологии ИС другой функциональной сложности.

Пусть новая ИС, характеризующаяся показателями сложности N_c , $N_{кУ}$, N_k и $N_{п}$, имеет интенсивность отказов $\lambda = \lambda_{c1} N_{c1} + \lambda_{кУ1} N_{кУ} + \lambda_{k1} N_k + \lambda_{п1} N_{п}$. Подставив в это уравнение вместо интенсивностей отказов λ_{c1} , $\lambda_{кУ1}$, λ_{k1} , $\lambda_{п1}$ их значения из равенств (5.5), получим

$$\lambda = \lambda_0 \left[\xi_c \frac{N_c}{N_{c0}} + \xi_{кУ} \frac{N_{кУ}}{N_{кУ0}} + \xi_k \frac{N_k}{N_{k0}} + \xi_{п} \frac{N_{п}}{N_{п0}} \right]. \quad (5.7)$$

Пользуясь формулой (5.7), можно по известной надежности ИС одного типа прогнозировать уровень надежности ИС любой функциональной сложности, изготавливаемой по той же базовой технологии.

Пример 5.1. По интенсивности отказов $\lambda_0=30 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, полученной в результате испытаний биполярной ИС дифференциального усилителя, и его показателям сложности $N_{c0}=14$; $N_{KY_0}=100$; $N_{K0}=1$; $N_{n0}=0,6 \text{ мм}^2$ определить интенсивность отказов биполярной ИС полусумматора, имеющего $N_c=14$; $N_{KY}=180$; $N_K=1$; $N_n=0,8 \text{ мм}^2$.

Решение. По данным задачи и табл. 5.3 по формуле (5.7)

$$\lambda = 30 \cdot 10^{-8} \left[0,33 \frac{14}{14} + 0,26 \frac{180}{100} + 0,16 \frac{1}{1} + 0,25 \frac{0,8}{0,6} \right] = 39 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}.$$

Изложенный выше подход позволяет также получить оценку интенсивности отказов компонентов ненадежности для технологически однотипных ИС, которая может быть использована при расчетах надежности ИС с учетом воздействия окружающей среды. Действительно, из выражений (5.5) имеем

$$\lambda_{c1} = \frac{\xi_c \lambda_0}{N_{c0}}; \lambda_{K1} = \frac{\xi_K \lambda_0}{N_{K0}}; \lambda_{KY1} = \frac{\xi_{KY} \lambda_0}{N_{KY0}}; \lambda_{n1} = \frac{\xi_n \lambda_0}{N_{n0}}. \quad (5.8)$$

Пример 5.2. По данным испытаний ИС дифференциального усилителя и его показателям сложности, приведенным в примере 5.1, определить интенсивности отказов компонентов ненадежности биполярных ИС.

Решение. На основании данных примера 5.1 и табл. 5.3 по формулам (5.8) находим

$$\lambda_{c1} = \frac{0,33 \cdot 30 \cdot 10^{-8}}{14} = 0,7 \cdot 10^{-8} [\text{ч} \cdot \text{шт.}]^{-1}; \lambda_{KY1} = 0,078 \cdot 10^{-8} [\text{ч} \cdot \text{шт.}]^{-1};$$

$$\lambda_{K1} = 4,8 \cdot 10^{-8} [\text{ч} \cdot \text{шт.}]^{-1}; \lambda_{n1} = 12,5 \cdot 10^{-8} [\text{ч} \cdot \text{мм}^2]^{-1}.$$

Расчет интенсивности отказов ИС с учетом качества производства и эксплуатационных условий требует более подробного рассмотрения факторов, влияющих на компоненты ненадежности ИС. В этом случае, полагая закон распределения экспоненциальным, обобщенную надежностную модель ИС удобнее представить в таком виде:

$$\lambda_{ИС} = \lambda_c + \lambda_{KY} + \lambda_n. \quad (5.9)$$

Вводить в модель интенсивность отказов корпуса нет необходимости, так как нарушение герметизации влияет на надежность внутренних контактных устройств и кристалла, где и целесообразно учесть этот фактор. Рассмотрим порядок расчета интенсивностей отказов каждой из составляющих.

Расчет интенсивности отказов внешних соединений производится с учетом производственного контроля качества внешних контактных соединений и эксплуатационных условий. Зависимость интенсивности отказов совокупности внешних соединений от их количества и эксплуатационных условий определяется по формуле

$$\lambda_c = \lambda_{c1} N_c. \quad (5.10)$$

Интенсивность отказов одного внешнего соединения определяется как функция вида

$$\lambda_{c1} = \lambda_{c10} a_{K1} a_n. \quad (5.11)$$

Здесь λ_{c10} — интенсивность отказов одного внешнего соединения в лабораторных условиях. Ее величина для различных методов контактирования равна: при ультразвуковой сварке алюминиевых

проводников $0,7 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$, при термокомпрессионном соединении с золотыми проволоочными проводниками $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$.

Коэффициент $a_{к1}$ характеризует систему производственного контроля качества и определяется из табл. 5.4. Коэффициент a_z учитывает условия эксплуатации и определяется из табл. 5.5.

Таблица 5.4

Характеристика систем контроля качества	$a_{к1}$
Оптимальная система контроля качества (уровень А): 100%-ный многоступенчатый контроль ИС в процессе производства; периодическая аттестация технологических процессов и условий производства; сквозная 100%-ная паспортизация ИС в процессе производства и многоступенчатого контроля готовой продукции, включая контроль электротермотренировки в крайних режимах и термоудары; текущая надежностная обратная связь от испытаний к технологическим операциям	1
Система высшего класса (уровень В): выборочные периодические граничные испытания, определение главных механизмов отказов, 100%-ный контроль ИС по этим механизмам отказов; 100%-ные испытания в крайних режимах, электротермотренировки, термоудары; надежностная обратная связь по результатам граничных испытаний	2
Система среднего класса (уровень С): выборочный контроль электрических параметров и герметичности при комнатной температуре, 100%-ный контроль основных параметров	15
Система получения годных ИС (уровень D): контроль, основанный на 100%-ной разбраковке по важнейшим параметрам ТУ при комнатной температуре	30

Таблица 5.5

Области и условия применения приборов МЭА	a_z
Лабораторные условия	1,0
Орбитальные спутники	1,5
Стационарное наземное оборудование	2,0
Возимое наземное оборудование	5,0
Переносное или портативное наземное оборудование	7,0
Оборудование отсеков для экипажей самолетов	5,0
Приборные отсеки самолетов	7,0
Оборудование ступеней выведения спутников на орбиту	8,0
Ракеты	10,0

Пример 5.3. Определить интенсивность отказов паяных ($\lambda_{с10}=10^{-9} \text{ ч}^{-1}$) внешних соединений функциональной ячейки из 30 ИС, герметизированных в стандартных корпусах с 14 выводами, если при изготовлении ИС осуществлялся производственный контроль качества высшего класса. Функциональная ячейка предназначена для портативной системы.

Решение. Согласно условиям задачи из табл. 5.4 и 5.5 имеем $a_{K1}=2$ и $a_3=7$. Далее, на основе формул (5.10) и (5.11) находим $\lambda_c=\lambda_{c10}N_c a_{K1} a_3=$
 $=10^{-9} \cdot 14 \cdot 30 \cdot 2 \cdot 7=5,88 \cdot 10^{-6}$ ч⁻¹.

Расчет интенсивности отказов внутренних контактных устройств, в отличие от внешних соединений, дополняется учетом качества герметизации ИС и температурного режима работы.

Под внутренними контактными устройствами (КУ) полупроводниковых биполярных ИС понимаются соединения между диффузионным слоем и межсоединениями (металлизациями), наносимыми на поверхность подложки. Соединения, образующие внутренние КУ, осуществляются через окна в слое окисла, защищающего подложку ИС.

В интегральных МДП-структурах количество внутренних КУ складывается из числа тонких окисных зон (затворов) и числа межсоединений, осуществляемых через окна в слое диэлектрика. Число тонких окисных зон соответствует количеству МДП-элементов. Количество внутренних КУ можно приблизительно определить по принципиальной схеме ИС.

Зависимость интенсивности отказов $\lambda_{КУ}$ внутренних КУ от их количества и эксплуатационных условий определяется выражениями

$$\lambda_{КУ} = \lambda_{КУ1} N_{КУ}, \quad (5.12)$$

где $N_{КУ}$ — количество внутренних КУ; $\lambda_{КУ1}$ — интенсивность отказов одного внутреннего КУ, равная

$$\lambda_{КУ1} = \lambda_{КУ10} a_{K1} a_{K2} a_T a_3. \quad (5.13)$$

Здесь $\lambda_{КУ10}$ — интенсивность отказов одного внутреннего КУ для лабораторных условий; a_{K1} и a_3 — те же коэффициенты, что и в формуле (5.11); a_{K2} — коэффициент ненадежности корпусов ИС; a_T — коэффициент температурного ускорения.

Величина коэффициента ненадежности корпусов ИС в зависимости от их конструкции определяется выражениями:

для остеклованных кристаллов в герметичной конструкции

$$a_{K2}=1+0,05Q; \quad (5.14)$$

для плоских корпусов с неостеклованными кристаллами

$$a_{K2}=4+0,05Q; \quad (5.15)$$

для пластмассовых корпусов с двумя рядами выводов

$$a_{K2}=6+0,05Q, \quad (5.16)$$

где Q — превышение выводов корпуса над числом десять.

Зависимость интенсивности отказов одного внутреннего КУ от температуры подложки, равной

$$T_{\pi}=T_0+\Delta T, \quad (5.17)$$

определяется функцией $a_T=f(T_{\pi})$, приведенной на рис. 5.3.

Превышение ΔT температуры подложки ИС над температурой окружающей среды определяется по графикам рис. 5.4 в зависимости от температуры окружающей среды и мощности P , рассеиваемой схемой при комнатной температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Пример 5.4. Определить интенсивность отказов в лабораторных условиях одного внутреннего КУ биполярных ИС по результатам испытаний биполярной ИС дифференциального усилителя при $T=75^\circ\text{C}$, если $N_{\text{КУ}}=100$, $\lambda_0=30 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, $P=75 \text{ мВт}$. Кристалл ИС остеклован и помещен в стандартном герметичном корпусе с 14 выводами. При изготовлении испытуемой партии ИС производственный контроль качества осуществлялся по системе среднего класса.

Решение. Из табл. 5.3 имеем $\xi_{\text{КУ}}=0,26$. По формуле (5.8) находим $\lambda_{\text{КУ}} = \xi_{\text{КУ}} \lambda_0 / N_{\text{КУ}} = (0,26 \cdot 30 \cdot 10^{-8}) / 100 = 7,8 \cdot 10^{-10} [\text{ч} \cdot \text{шт.}]^{-1}$. Для $P=75 \text{ мВт}$ и $T_0=75^\circ\text{C}$ по графику рис. 5.4 определяем $\Delta T=20^\circ\text{C}$. Отсюда температура подложки согласно формуле (5.17) равна $T_{\text{п}}=T_0+\Delta T=75+20=95^\circ\text{C}$. Для нее по графику рис. 5.3 $a_T=5$. Из табл. 5.4 и 5.5 находим $a_{\text{К1}}=15$, $a_0=1$. По формуле (5.14) определяем коэффициент ненадежности корпуса:

$$a_{\text{К2}} = 1 + 0,05 \cdot 4 = 1,2.$$

Теперь по формуле (5.13) определяем искомую интенсивность отказов:

$$\lambda_{\text{КУ10}} = \frac{\lambda_{\text{КУ1}}}{a_{\text{К1}} a_{\text{К2}} a_T a_0} = \frac{7,8 \cdot 10^{-10}}{15 \cdot 1,2 \cdot 5 \cdot 1} = 0,86 \cdot 10^{-11} [\text{ч} \cdot \text{шт.}]^{-1}.$$

Расчет интенсивности отказов кристалла ИС базируется на следующих физических предпосылках. При изготовлении ИС в нее вносится определенное количество дефектов — участков с повышенной скоростью протекания физико-химических процессов старения. Улучшением чистоты материалов и качества технологического процесса можно лишь уменьшить число дефектов, но не устранить их полностью.

Согласно закону термодинамики при выращивании кристалла в нем всегда возникают дефекты. В окисле дефектами являются микроканалы, в металлизации — границы между зернами, по которым наиболее активно идет процесс окисления и т. д. Сочетание большого числа таких микродефектов образует дефект, приводящий к отказу ИС.

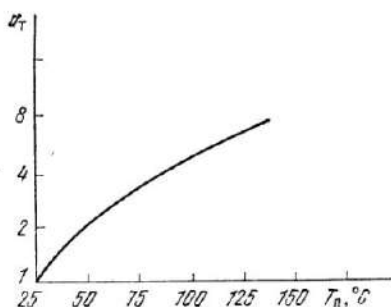


Рис. 5.3. Зависимость коэффициента температурного ускорения от температуры подложки

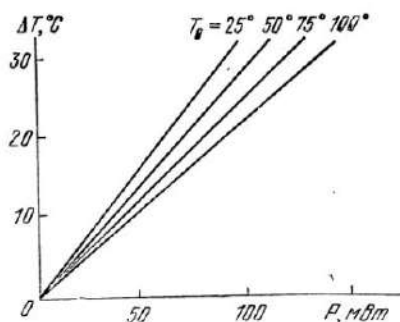


Рис. 5.4. Зависимость перегрева подложки от температуры окружающей среды и мощности, рассеиваемой ИС

Естественно, что чем больше площадь кристалла и сложней его структура, тем больше вероятность появления сочетаний дефектов, ведущих к отказу. Однако аналитической зависимости надежности кристалла от его площади, базирующейся на физике явлений, происходящих в кристалле, пока не получено — произведена лишь статистическая оценка относительного роста интенсивности отказов ИС от величины активной площади кристалла. График этой зависимости приведен на рис. 5.5.

На основании изложенного интенсивность отказов кристалла, входящего в МСБ или ИС, в зависимости от его сложности и степени освоения ИС в производстве определяется по формулам

$$\lambda_{\pi} = \lambda_{\pi 10} N_{\pi}, \quad (5.18)$$

$$\lambda_{\pi 1} = \lambda_{\pi 10} a_{K1} a_{K2} a_T a_a a_c, \quad (5.19)$$

где $\lambda_{\pi 1}$ — интенсивность отказов единицы площади кристалла; N_{π} — количество единиц площади кристалла; $\lambda_{\pi 10}$ — интенсивность отказов единицы площади кристалла в нормальных условиях; a_{K1} , a_{K2} , a_T , a_a — те же коэффициенты, что и в формуле (5.13); a_{π} — показатель степени освоенности ИС в производстве; a_c — показатель сложности кристалла.

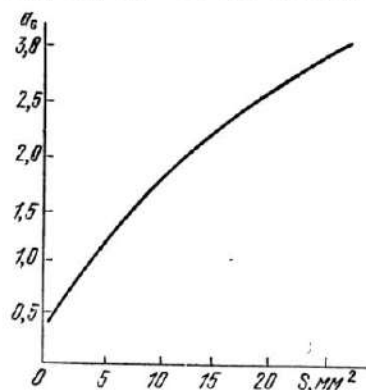


Рис. 5.5. Относительный рост интенсивности отказов кристалла в зависимости от площади его активной части

Показатель a_{π} характеризует надежность кристалла в зависимости от степени освоения технологии изготовления ИС в производстве. В первый год освоения новой ИС берется $a_{\pi}=10$, а далее его величина резко уменьшается и в последующие годы принимается $a_{\pi}=1$.

Величина показателя сложности кристалла a_c определяется по графику зависимости, приведенному на рис. 5.5. Используемая на рисунке мера активной площади кристалла включает в себя поверхность, на которой расположены все элементы топологии, кроме кромок с контактными площадками, тестовыми элементами и полем допуска на скрайбирование.

Ориентировочный удельный расход поверхности кристалла на 1 бит информации или один вентиль для МДП БИС различного функционального назначения дан в табл. 5.6.

Для биполярных ИС, изготовленных по стандартной базовой технологии, единичная площадь в 5...10 раз больше, чем у МДП БИС. Приведенные удельные характеристики позволяют проводить прикидочную оценку надежности кристаллов при проектировании ИС. При оценке надежности МЭА и МСБ, выполненных на корпусированных или бескорпусных ИС, размеры кристалла обычно даются в ТУ на ИС.

Для расчета надежности БГИС и МСБ по рассмотренной методике необходима исходная информация о величине интенсивности отказов компонентов ненадежности $\lambda_{с10}$, $\lambda_{кУ10}$, $\lambda_{к10}$, $\lambda_{п10}$ в нормальных условиях по каждому базовому технологическому процессу, т. е. отдельно для биполярных ИС, МДП ИС, КМОП ИС и т. д. Указанные интенсивности отказов называют «базовыми» интенсивностями отказов.

Таблица 5.6

Тип БИС	Единичная площадь
Комбинационные структуры	0,016 $\frac{\text{мм}^2}{\text{вентиль}}$
Оперативные статические запоминающие устройства	0,026 $\frac{\text{мм}^2}{\text{бит}}$
Сдвиговые регистры	0,032 $\frac{\text{мм}^2}{\text{бит}}$

Причинный подход к расчету надежности ИС позволяет получить эту статистическую информацию без больших экономических затрат потому, что эксперимент может быть осуществлен на дешевых ИС с простой функциональной структурой. В то же время причинный метод обеспечивает высокую точность расчетов надежности, так как получаемая статистическая информация отражает качество конкретного технологического процесса и возможности его технологического оборудования.

Рассмотрим возможность получения данных о «базовой» интенсивности отказов компонентов ненадежности ИС по результатам эксперимента.

Пример 5.5. Определить «базовые» интенсивности отказов компонентов ненадежности биполярных ИС по результатам лабораторных испытаний при температуре $+75^\circ\text{C}$ биполярной ИС двухтактного усилителя напряжения с параметрами: $P=100$ мВт, $N_{с0}=14$, $N_{кУ0}=100$, $N_{п0}=0,8$ мм², $\lambda_0=12 \cdot 10^{-8}$ ч⁻¹. Кристалл ИС остеклован и помещен в герметичном корпусе. При изготовлении испытуемой партии ИС осуществлялся производственный контроль качества высшего класса. Предприятие специализировано на изготовлении биполярных ИС и выпускает испытуемые схемы три года.

Решение. По табл. 5.3 — 5.5 находим $\xi_c = 0,33$; $\xi_{кУ} = 0,26$; $\xi_n = 0,25$ $a_{к1} = 2$; $a_2 = 1$; $a_n = 1$.

По формуле (5.14) определяем $a_{к2} = 1 + 0,05Q = 1 + 0,05 \cdot 4 = 1,2$. По графику рис. 5.5 для $N_{п0} = 0,8$ мм² находим $a_c = 0,6$.

Для $P=100$ мВт и $T_0 = +75^\circ\text{C}$ по графику рис. 5.4 находим $\Delta T = 25^\circ\text{C}$. Отсюда по формуле (5.17) определяем температуру подложки: $T_n = T_0 + \Delta T = 75 + 25 = 100^\circ\text{C}$. Для этой температуры по графику рис. 5.3 находим $a_T = 5$.

Для определения «базовых» интенсивностей отказов в формулы (5.11), (5.13) и (5.19) подставим соответственно выражения $\lambda_{с1}$, $\lambda_{кУ1}$, $\lambda_{п1}$ из фор-

мул (5.8). В результате после расчета получим

$$\lambda_{c10} = \frac{\xi_c \lambda_0}{N_{c0} a_{K1} a_3} = \frac{0,33 \cdot 12 \cdot 10^{-8}}{14 \cdot 2 \cdot 1} = 0,14 \cdot 10^{-8} [\text{ч} \cdot \text{шт.}]^{-1};$$

$$\lambda_{KY10} = \frac{\xi_{KY} \lambda_0}{N_{KY0} a_{K1} a_{K2} a_3 a_T} = \frac{0,26 \cdot 12 \cdot 10^{-8}}{100 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 5} = 2,6 \cdot 10^{-11} [\text{ч} \cdot \text{шт.}]^{-1};$$

$$\lambda_{n10} = \frac{\xi_n \lambda_0}{N_{n0} a_{K1} a_{K2} a_3 a_T a_c} = \frac{0,25 \cdot 12 \cdot 10^{-8}}{0,8 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 5} = 0,52 \cdot 10^{-8} [\text{ч} \cdot \text{мм}^2]^{-1}.$$

Известно, что по мере развития интегральной техники непрерывно растет степень интеграции ИС и уменьшаются геометрические размеры элементов. За период с 1973 г. по 1980 г. геометрические размеры элементов ИС уменьшились в 16 ... 20 раз [5,2, 5.10]. Рассмотрим на примере, как влияют эти факторы на надежность МЭА.

Пример 5.6. Положим, что на предприятии, выпускавшем ИС с данными, указанными в примере 5.5, плотность упаковки элементов ИС возросла на порядок, что привело к увеличению $N_{KY} = 1000$ при неизменных площади кристаллов, рассеиваемой мощности и корпусе ИС. Требуется оценить надежность этой ИС по базовым интенсивностям отказов, полученным в примере 5.5, и сравнить ее с надежностью равноценного функционального устройства, выполняемого на ИС, эквивалентных микросхеме примера 5.5.

Решение. По данным примера 5.5 находим λ_c и λ_n , так как они будут такими же и у новых ИС:

$$\lambda_c = \lambda_0 \xi_c = 12 \cdot 10^{-8} \cdot 0,33 = 3,96 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1},$$

$$\lambda_n = \lambda_0 \xi_n = 12 \cdot 10^{-8} \cdot 0,25 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}.$$

По формулам (5.13) и (5.14) и данным примеров 5.5 и 5.6 имеем

$$\lambda_{KY} = \lambda_{KY10} N_{KY} a_{K1} a_{K2} a_T a_3 = 2,6 \cdot 10^{-11} \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 1 = 31,2 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}.$$

По формуле (5.19) находим интенсивность отказов ИС с повышенной степенью интеграции:

$$\lambda_{ИС} = \lambda_c + \lambda_{KY} + \lambda_n = (3,96 + 31,2 + 3) \cdot 10^{-8} = 38,16 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}.$$

Интенсивность отказов функционального устройства, выполненного на микросхемах, эквивалентных ИС примера 5.5, будет равна интенсивности отказов десяти таких ИС:

$$\lambda_{\PhiУ} = 10 \lambda_0 = 10 \cdot 12 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1} = 120 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}.$$

Отсюда выигрыш в надежности функционального устройства за счет роста степени интеграции ИС составляет

$$x = \frac{\lambda_{\PhiУ}}{\lambda_{ИС}} = \frac{120 \cdot 10^{-8}}{38,16 \cdot 10^{-8}} = 3,2.$$

Таким образом, за счет роста степени интеграции ИС на порядок надежность функционального устройства в данном случае возросла более чем в три раза. Приведенный пример наглядно показывает справедливость сделанного ранее утверждения, что рост степени интеграции ИС является одним из важнейших резервов повышения надежности МЭА.

5.3. Перспективы повышения надежности и технологической воспроизводимости БГИС и микросборок

Известно [5.4, 5.7], что при производстве БГИС и микросборок в процессе очистки подложек, окисления, диффузии, металлизации, нанесения резистивных и проводящих пленок и т. д. появляется определенное количество дефектов. Под дефектами понимаются участки с повышенной скоростью протекания физико-химических процессов старения. Улучшением чистоты материалов и качества технологического процесса можно лишь уменьшить количество дефектов, но нельзя устранить их полностью, так как согласно закону термодинамики уже при выращивании кристалла в нем всегда возникают дефекты (по Френкелю или по Шоттки) в количестве $n = n_0 e^{-W/kT}$, где n_0 — число Авогадро; W — энергия образования дефекта, равная 2 ... 4 эВ; k — постоянная Больцмана; T — температура, К.

Характеристика плотности распределения дефектов ИС (a) в зависимости от их величины (A) представлена на рис. 5.6. Кривые характеризуют качество технологических процессов изготовления ИС двумя предприятиями. Из рисунка видно, что с уменьшением величины дефектов плотность их возрастает. Ордината, соответствующая точке A_0 , характеризует уровень производственного контроля качества ИС. Явные дефекты от ∞ до A_0 определяют процент выхода годных ИС, а скрытые дефекты величиной $A_i < A_0$ определяют надежность ИС [5.7]. В данном случае появление отказа ИС рассматривается как результат образования дефекта из-за сочетания большого числа микродефектов. При такой трактовке отказа ИС из графика рис. 5.6 просматривается тесная связь между надежностью и технологической воспроизводимостью ИС, характеризуемой процентом выхода годных.

Очевидно также, что чем меньше микродефекты, то, при прочих равных условиях, для образования дефектов, ведущих к отказу ИС, потребуется более продолжительное время физико-химического старения, т. е. надежность ИС возрастает. Но для этого, как видно из рис. 5.6, необходимо ужесточить контроль качества ИС, что приведет к сдвигу границы A_0 в сторону меньших значений A_i , скрытые дефекты станут явными, а процент выхода годных упадет. Поэтому разумный уровень контроля качества ИС должен выбираться исходя из экономической целесообразности повышения надежности за счет снижения процента выхода годных при данном уровне производительности и качества технологического

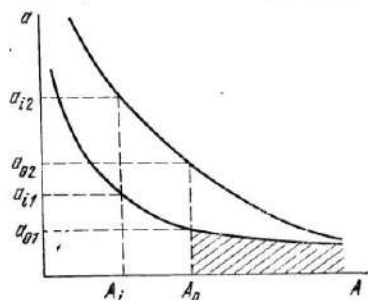


Рис. 5.6. Зависимость средней плотности дефектов от их величины для двух предприятий

процесса. Все приведенные здесь рассуждения справедливы и для МСБ.

Из изложенного можно сделать вывод, что при качественной разработке конструкции и технологии изготовления ИС и МСБ основной причиной их отказов будет медленная деградация элементов в результате физико-химических процессов старения. Большая доля внезапных отказов (до 80%) в ИС и МСБ на современном этапе объясняется недостатками современной технологии БГИС и микросборок и тем, что накопленные данные испытаний и эксплуатации отражают надежность преимущественно логических схем. Эти схемы наиболее широко применяются в настоящее время, но они не столь критичны к уходу параметров за пределы установленных допусков, как линейные ИС и МСБ, и отказы их фиксируются при полном отказе в работе одного из элементов.

Экстенсивное развитие микроэлектроники («вширь») привело к созданию большого класса линейных интегральных схем (ЛИС), чувствительных к постепенным отказам в виде ухода рабочих параметров за пределы установленных допусков. Поэтому при расчете надежности ЛИС и линейных МСБ особую важность приобретает учет отказов этого вида. Хотя скорость протекания деградационных процессов в современных ЛИС при нормальных условиях эксплуатации и незначительна, в сложных системах МЭА, с большим количеством элементов, суммарные изменения в состоянии элементов вследствие медленной деградации могут оказаться значительными и наложить заметный отпечаток на работу МЭА и ее надежность.

В условиях форсированных электрических, температурных и климатических нагрузок физико-химические процессы деградации ИС ускоряются, вызывая рост постепенных отказов. Особенность этого вида отказов заключается в том, что такие отказы, отражающие внутренние свойства, присущие материалам ИС, в принципе исключить невозможно, в то время как причины внезапных отказов по мере развития технологии могут быть в значительной мере устранены. Совершенствование методов физико-химического анализа позволит прогнозировать некоторые отказы, воспринимаемые как внезапные, т. е. предупреждать их, обнаруживая как постепенные.

Предполагается, что с течением времени доля постепенных отказов ИС и МСБ будет возрастать, хотя абсолютное количество отказов всех видов будет уменьшаться. Этим и объясняется растущий интерес к постепенным отказам ИС и МСБ.

Эволюция отказов ИС и МСБ с совершенствованием их конструкции и технологии изготовления ведет к необходимости дополнить соответствующие методы расчета надежности при внезапных отказах методами расчета надежности, учитывающими постепенные отказы. Разработка таких методов должна базироваться на физико-химическом изучении деградационных процессов, установлении связи изменений электрических характеристик ИС и МСБ с атомными и молекулярными процессами. Полученные на этой

основе математические модели надежности должны отражать функциональную зависимость основных причинных и деградиционных механизмов отказов от времени, температуры, электрической нагрузки и других эксплуатационных факторов, а также особенности взаимодействия этих механизмов в рамках данного устройства. Получение математических моделей откроет возможности прогнозирования надежности ИС и МСБ при постепенных отказах, их работоспособности и долговечности.

Задача прогнозирования надежности при постепенных отказах БГИС и МСБ, как и любых других радиоустройств, состоит в определении возможного ухода их электрических параметров в течение заданного интервала времени с требуемой достоверностью или в определении интервала времени, при котором уход параметров не превысит допустимые пределы (заданных допусков).

Анализ поведения элементов ИС и МСБ показывает, что постепенные изменения их параметров во времени вследствие физико-химической деградации имеют случайно детерминированный характер, обусловленный случайными колебаниями температуры и влажности окружающей среды, нестабильностью напряжения питания и т. д.

Изложенное позволяет сделать вывод, что при наличии математических моделей старения ИС и МСБ для прогнозирования и расчета их надежности при постепенных отказах могут использоваться известные методы параметрической чувствительности и вероятностные методы теории точности и расчета электрических допусков [5.9]. При этом необходимо учитывать, что критический допуск следует определять по элементу, влияние которого на выходную характеристику наиболее значительно, поскольку однотипные элементы в ИС и МСБ, изготовленные методом групповой технологии, имеют приблизительно одинаковый разброс и одинаковые скорости деградиционных процессов.

Вероятностные методы теории точности и расчета допусков используются и при расчетах технологической воспроизводимости проектируемых ИС и МСБ. Под технологической воспроизводимостью ИС и МСБ понимают их свойство повторять свои электрические, физические, механические и другие параметры в пределах норм, оговариваемых техническими условиями (ТУ), от изделия к изделию в процессе их изготовления и испытаний. Количественным показателем технологической воспроизводимости является процент выхода годных — процент изделий, параметры которых находятся в пределах, установленных ТУ.

Расчет технологической воспроизводимости ИС и микросборок заключается в следующем:

- определяется требуемая точность параметров элементов ИС и конструктивных параметров по заданной точности выходных параметров;

- оцениваются технологические возможности обеспечения требуемой точности выходных параметров и выбора методов ее достижения;

— определяется рациональная система пооперационных допусков, обеспечивающая оптимальный процент выхода годных;

— выбирается оптимальная система контроля качества в условиях серийного производства, обеспечивающая эффективный контроль по минимальной номенклатуре контролируемых параметров.

В ряде случаев при обеспечении технологической воспроизводимости МСБ и высокого уровня их надежности по постепенным отказам стремятся расширить допуски на выходные параметры.

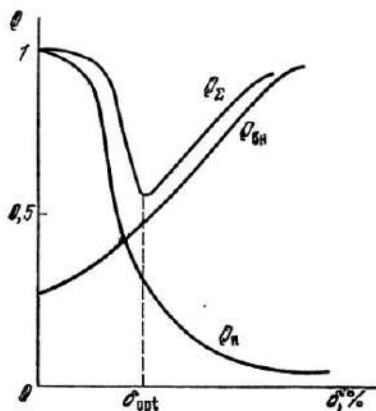


Рис. 5.7. Зависимость вероятности отказа микросборки от величины допусков на элементы

ботки сигналов, так как, например, в триггерах, при расширении допусков на сопротивления резисторов цепей питания и напряжения, и увеличении уровня мощности потребуется дополнительная энергия для их запуска. Это обстоятельство в сложных системах может привести к необходимости включения дополнительных схем запуска и значительному увеличению числа элементов в схеме.

Приведенные рассуждения позволяют сделать вывод, что с расширением полей допусков на параметры элементов схемы радиоустройств вероятность появления постепенных отказов $Q_{\text{п}}$ уменьшается, как показано на рис. 5.7, а вероятность появления внезапных отказов $Q_{\text{вн}}$ увеличивается вследствие увеличения на ряде элементов рассеиваемой мощности. Следовательно, существует расчетная точка с оптимальным в отношении надежности значением допусков при внезапных и постепенных отказах, которая для каждой схемы по известным $Q_{\text{п}}$ и $Q_{\text{вн}}$ может быть найдена из выражения $Q_{\text{с}}(t, \delta) = 1 - [1 - Q_{\text{п}}(t, \delta)][1 - Q_{\text{вн}}(t, \delta)]$.

Из рисунка также видно, что выбор допусков больше оптимальных (за оптимальной точкой) приведет к снижению надежности, несмотря на увеличение допусков на отдельные элементы схемы.

Таким образом, для поддержания заданной надежности сложного радиооборудования необходимо брать меньший разброс пара-

Однако такое решение ведет к снижению надежности МЭА. Действительно, при проектировании, например, усилительного устройства на интегральных усилителях с большим разбросом коэффициента усиления разработчик вынужден при выборе ИС ориентироваться на минимальное значение коэффициента их усиления, чтобы требуемый уровень усиления сигнала обеспечивался проектируемым устройством во всех случаях. Это, в свою очередь, потребует включения в схему большего количества ИС, из-за чего снизится надежность проектируемого изделия.

Аналогичная картина наблюдается и в схемах цифровой обра-

метров элементов (более жесткие допуски) и меньшую интенсивность внезапных отказов за счет уменьшения нагрузки. Оба эти требования можно облегчить, если для преодоления неизбежных внезапных отказов ввести избыточность.

Список литературы

- 5.1. Алексенко А. Г. Основы микросхемотехники. — М.: Сов. радио, 1977. — 405 с.
- 5.2. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/ А. Г. Алексенко, С. С. Бадулин, Л. Г. Барулин и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977, — 352 с, гл. 6.
- 5.3. Физические основы надежности интегральных схем/ В. Ф. Сыдоров, Л. П. Пивоварова, Б. К. Петров и др.; Под ред. Ю. Г. Миллера. — М.: Сов. радио, 1976. — 320 с.
- 5.4. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. — М.: Высшая школа, 1977. — 416 с.
- 5.5. Васенков А. А., Сретенский В. Н., Федотов Я. А. Три проблемы электроники твердого тела. — Микроэлектроника и полупроводниковые приборы/ Под ред. А. А. Васенкова и Я. А. Федотова. — М.: Сов. радио, 1977, вып. 2, с. 3—19.
- 5.6. Васенков А. А., Борисов Б. С., Лаврищев В. П. Микроэлектроника 70-х годов. — Электрон. пром-сть, 1973, № 6, с. 69—71.
- 5.7. Костычев Г. И. Физический метод оценки надежности ИС. — Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1974, т. XVII, № 5, с. 86—90.
- 5.8. Пролейко В. М., Сретенский В. Н. Некоторые проблемы надежности изделий электронной техники. — Электрон. пром-сть, 1977, вып. 6, с. 20—27.
- 5.9. Фомин А. В., Борисов В. Ф., Чермошенский В. В. Допуски в РЭА. — М.: Сов. радио, 1973. — 130 с.
- 5.10. Четвериков Н. И. Надежность в микроэлектронике. — М.: Знание, 1975. — 64 с.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
В.1. Динамика развития микроэлектронной аппаратуры	5
В.2. Некоторые определения и классификация функциональной сложности современной микроэлектронной аппаратуры	6
1. ЭТАПЫ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ И РАСЧЕТЕ МСБ И МЭА НА ИХ ОСНОВЕ	14
1.1. Общая характеристика метода синтеза МЭА и МСБ	14
1.1.1. Системная иерархия, разделение данных и методы синтеза	14
1.1.2. Показатели качества	19
1.2. Основные задачи и порядок внешнего проектирования устройства МЭА и микросборок	27
1.2.1. Обоснование исходных данных	27
1.2.2. Особенности конструирования МСБ, критерии и правила	30
1.2.3. Порядок оптимального проектирования (синтеза)	36
1.3. Порядок внутреннего проектирования микросборок	44
1.3.1. Анализ исходных данных	44
1.3.2. Схемотехническая отработка конструкции МСБ	46
Список литературы	53
2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ БГИС И МИКРОСБОРКОВ	53
2.1. Особенности расчета и конструирования аналоговых БГИС и микросборок	54
2.1.1. Характеристика элементной базы аналоговых МСБ	54
2.1.2. Обеспечение помехоустойчивости и электромагнитной совместимости аналоговых МСБ	59
2.1.3. Особенности схемотехнической отработки конструкций аналоговых БГИС и МСБ	63
2.1.4. Расчет и оптимизация конструктивных характеристик аналоговых трактов на МСБ	74
2.2. Конструирование микросборок цифровых устройств	78
2.2.1. Краткая характеристика элементной базы	78
2.2.2. Обеспечение помехоустойчивости МСБ	81
2.3. Особенности конструирования цифровых МСБ и устройств на базе БИС микропроцессора	83
2.3.1. БИС микропроцессора — элементная база цифровых вычислительных устройств с программируемой логикой	83
2.3.2. Программируемая логика и особенности конструирования микро-ЭВМ	87
2.3.3. Оптимизация выбора и пример конструкторского расчета ЭВМ на МСБ	90
2.4. Разработка конструкции и топологии БГИС и МСБ	99
2.4.1. Разработка схемы соединений	99
2.4.2. Расчет геометрических размеров пленочных элементов	99
2.4.3. Разработка эскиза топологии	107
2.4.4. Оценочный расчет паразитных распределенных параметров	108
2.4.5. Методы защиты МСБ от внешних воздействий	109
2.4.6. Оценочный расчет и обеспечение тепловых режимов микросборок	110
Список литературы	116
3. КОНСТРУИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА БГИС И МИКРОСБОРКАХ	116
3.1. Основные направления конструирования микроэлектронной аппаратуры на БГИС и микросборках	117
3.1.1. Конструктивная иерархия МЭА	117
3.1.2. Компоновочные схемы БГИС и микросборок	119
3.1.3. Компоновочные схемы функциональных ячеек МЭА	124

3.1.4. Компоновочные схемы моноблоков МЭА на БГИС и микросборках	129
3.1.5. Коэффициенты дезинтеграции конструктивов МЭА	132
3.2. Основные показатели и особенности выбора и расчета конструкций МЭА на БГИС и микросборках	134
3.2.1. Основные показатели конструкций микроэлектронной аппаратуры и критерии их сравнения	134
3.2.2. Влияние объема и формы блоков МЭА на удельные показатели компоновки	136
3.2.3. Выбор оптимального объема блока МЭА по нескольким критериям конструирования	141
3.3. Количественная оценка массы комплекса микроэлектронной аппаратуры на этапе технического предложения	147
3.4. Способы обеспечения тепловых режимов, вибропрочности и герметичности конструкций МЭА	150
3.5. Основные тенденции развития конструкций МЭА на микросборках	154
Список литературы	159
4. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ БГИС И МИКРОСБОРОК	159
4.1. Организация и состав средств автоматизированной системы конструирования БГИС и микросборок	160
4.2. Разбиение схемы МЭА на конструктивно законченные части	168
4.3. Математическое моделирование соединений МЭА	171
4.4. Методы и алгоритмы автоматизированного конструирования соединений МЭА	178
Список литературы	185
5. ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ БГИС И МИКРОСБОРОК	186
5.1. Надежность БГИС и микросборок	186
5.2. Методы расчета надежности БГИС и микросборок	195
5.3. Перспективы повышения надежности и технологической воспроизводимости БГИС и микросборок	209
Список литературы	213

Георгий Васильевич Алексеев, Валентин Федорович Борисов, Татьяна Леонтьевна Воробьева, Богдан Федорович Высоцкий, Андрей Сергеевич Назаров, Виктор Андреевич Сорокопуд, Михаил Николаевич Ушкар, Игорь Борисович Федюк, Алексей Васильевич Фомин.

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ БОЛЬШИХ ГИБРИДНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, МИКРОСБОРОК И АППАРАТУРЫ
НА ИХ ОСНОВЕ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ

Редакторы И. М. Волкова и Л. В. Голованова

Художественный редактор Н. А. Игнатьев

Художник В. В. Волков

Технический редактор Г. З. Кузнецова

Корректор И. Г. Зыкова

ИБ № 438

Сдано в набор 17.10.80

Подписано в печать 05.03.81

T-00765

Формат 60×90/16

Бумага книжно-журнальная

Гарнитура литературная

Печать высокая Усл. п. л. 13,5

Уч.-изд. л. 15,55

Усл. кр-отг. 13,68

Тираж 24 000 экз.

Изд. зак. № 19594

Зак. 835

Цена 65 к.

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

Московская типография № 10 «Союзполиграфпрома»

Государственного Комитета СССР

по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

