

Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»

В. И. Иевлев

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебное пособие  
*2-е издание, стереотипное*

Научный редактор – доц. канд. техн. наук Г. П. Менщиков

Рекомендовано Региональным отделением УрФО учебно-методического объединения вузов Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 210300 – Радиотехника в УрФО

Екатеринбург

2007

УДК 621.396.6.001/.002  
ББК 32.85  
И 30

Рецензенты:  
кафедра общетехнических дисциплин  
Уральского технического института связи и информатики;  
проф. д-р техн. наук А. М. Медведев (Московский авиационный ин -т)

Автор: В. И. Иевлев

И 30 КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ: учебное пособие / В.И. Иевлев. 2-е изд., стереотипн.  
Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2007. 217 с.

ISBN 5-321-00523-3

Изложены основные положения системы разработки и постановки на производство электронных средств (ЭС). Отмечена роль стандартизации в создании и освоении новой техники. Рассмотрены типовые конструктивные и технологические решения современных ЭС.

Для студентов специальностей: 220100 – Вычислительные машины, комплексы, системы и сети; 210406 – Сети связи и системы коммутации, а также специальностей направлений: 210300 – Радиотехника и 210200 – Проектирование и технология электронных средств.

Библиогр.: 35 назв. Табл. 11. Рис. 136. Прил.

УДК 621.396.6.001/.002  
ББК 32.85

ISBN 5–321–00523-3

© ГОУ ВПО «Уральский государственный  
технический университет – УПИ», 2007  
© В.И. Иевлев, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Под электронным средством (ЭС) в дальнейшем будем понимать радиоэлектронное или электронно-вычислительное средство, проектирование (особенно конструирование) и изготовление которых имеет много общего.

Современные ЭС (в т. ч. ЭВМ) относятся к сложным наукоемким изделиям. При их создании используются новейшие достижения многих отраслей науки и техники.

Научно-технический прогресс требует не только постоянного совершенствования технических характеристик ЭС, но и существенного сокращения сроков их проектирования, изготовления и введения в эксплуатацию.

Основными стадиями жизненного цикла (ЖЦ) любого изделия являются: проектирование (разработка); изготовление (производство); эксплуатация; утилизация.

Согласно данным Европейской организации по качеству, при оценке причин отказов действует правило «70 – 20 – 10», по которому 70% отказов происходят из-за недостатков проектирования, 20% – из-за некачественного изготовления и 10% – из-за нарушения правил эксплуатации.

В последние годы (в условиях рынка) во многих отраслях большое внимание стали уделять сокращению времени и стоимости, затрачиваемых на создание новых изделий.

Важным инструментом в решении этой проблемы является стандартизация как общей организации работ по созданию новой техники, единых правил в представлении информации о конструкции и технологии изготовления, так и отдельных технических (конструктивных и технологических) решений.

ЭС как технические изделия характеризуются большим количеством внутренних и внешних характеристик (параметров). Числовые значения этих параметров в основном определяются заказчиком ЭС и содержатся в технических требованиях (ТТ). Многие из этих требований являются противоречивыми (например, высокая надежность при невысокой стоимости и т.д.). Поэтому разработчику приходится решать сложные задачи не только по обеспечению требований заказчика, но и по выбору наиболее оптимального решения с учетом минимальных затрат на разработку, изготовление, эксплуатацию, ремонт и утилизацию. Применение стандартных решений в значительной степени способствует общей оптимизации работ по созданию и освоению новой техники.

Конструирование и технология ЭС является быстро развивающимся направлением. Так, например, согласно эмпирическому закону

Мура, количество транзисторов, которые можно разместить в одном чипе, удваивается каждые 18 месяцев. С повышением степени интеграции увеличивается (по правилу Рента) количество внешних выводов интегральных схем (ИС). Это, в свою очередь, требует применения более совершенных средств коммутации, что в итоге приводит к постоянному росту функциональных возможностей ЭС на единицу объема. Такой прогресс возможен только при постоянном совершенствовании конструкций и технологии изготовления.

В последнее десятилетие наблюдается дефицит учебной литературы, освещающей современные достижения в области конструирования и технологии ЭС. Особенно остро его ощущают студенты дистанционных форм обучения. Предлагаемое учебное пособие ставит своей целью в какой-то степени восполнить этот пробел.

В пособии не затронуты такие важные темы, как:

- конструирование и технология СВЧ-устройств;
- автоматизация конструкторских и технологических работ, а также производства ЭС.

Каждое из этих направлений заслуживает отдельного рассмотрения.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей: 220100 – Вычислительные машины, комплексы, системы и сети; 210406 – Сети связи и системы коммутации, а также специальностей направлений: 210300 – Радиотехника и 210200 – Проектирование и технология электронных средств.

# 1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. НОРМАТИВНАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

## 1.1. Общая характеристика стандартизации

В процессе трудовой деятельности специалистам часто приходится решать систематически повторяющиеся задачи: проектирование и изготовление деталей и узлов ЭС, составление технической и управленческой документации, измерение параметров технологических операций, контроль готовой продукции, упаковка поставляемой продукции и т. д. В разных регионах страны, отраслях и на предприятиях могут существовать различные варианты решения этих задач.

Цель стандартизации – выявление наиболее рационального и экономичного варианта, т.е. нахождение оптимального решения в определенной области стандартизации. Для превращения этой возможности в действительность необходимо, чтобы найденное решение стало достоянием большого числа предприятий (организаций) и специалистов. Только при всеобщем и многократном использовании этого решения существующих и потенциальных задач возможен экономический, технический, информационный или социальный эффект.

Объектами стандартизации в РФ являются:

- 1) продукция (сырье, материалы, готовые изделия);
- 2) процессы (работы);
- 3) услуги (производственные и бытовые),

а также отдельные аспекты этих групп: термины, обозначения, параметры и размеры, технические требования, методы и правила контроля, приемки, маркировки, транспортирования, хранения и т.д. Непосредственным результатом стандартизации является нормативный документ (НД). Термин «нормативный документ» охватывает такие понятия, как стандарты, правила, рекомендации, нормы, регламенты, общероссийские классификаторы, технические условия (ТУ).

### Цели и методы стандартизации

Общей целью стандартизации является защита интересов потребителей и государства по вопросам качества продукции, процессов и услуг. Согласно Закону РФ «О стандартизации», стандартизация как деятельность направлена на достижение следующих целей:

– безопасность продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;

- безопасность хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций;
- обороноспособность и мобилизационная готовность страны;
- техническая и информационная совместимость, а также взаимозаменяемость продукции;
- единство измерений;
- качество продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии;
- экономия всех видов ресурсов.

Метод стандартизации – это прием или совокупность приемов, с помощью которых достигаются цели стандартизации. В работах по стандартизации наиболее широко применяются следующие методы:

- упорядочение объектов стандартизации;
- параметрическая стандартизация;
- унификация продукции;
- агрегатирование;
- комплексная стандартизация;
- опережающая стандартизация.

*Упорядочение объектов стандартизации.* Упорядочение связано прежде всего с сокращением многообразия. Упорядочение как универсальный метод состоит из отдельных приемов: систематизации, селекции, симплификации, типизации и оптимизации.

*Систематизация* объектов стандартизации заключается в научно обоснованном последовательном классифицировании и ранжировании совокупности конкретных объектов стандартизации. Примером результата работы по систематизации продукции может служить Общероссийский классификатор промышленной и сельскохозяйственной продукции (ОКП), который систематизирует всю товарную продукцию (прежде всего по отраслевой принадлежности) в виде различных классификационных группировок и конкретных наименований продукции.

*Селекция и симплификация* – виды деятельности, заключающиеся в определении конкретных объектов, которые признаются целесообразными (селекция), либо нецелесообразными (симплификация) для дальнейшего производства и применения. Оба этих процесса осуществляются параллельно. Им предшествуют классификация и ранжирование объектов, специальный анализ перспективности и сопоставления объектов с будущими потребностями.

*Типизация объектов стандартизации* – деятельность по созданию типовых (образцовых) объектов – конструкций, технологических процессов (ТП), форм документации. В отличие от селекции отобранные конкретные объекты подвергают каким-либо техническим преоб-

разованиям, направленным на повышение их качества и универсальности. Например: типовые несущие конструкции ЭС, типовые технологические процессы изготовления микросхем, печатных плат и т.д.

*Оптимизация объектов стандартизации* заключается в нахождении оптимальных главных параметров (параметров назначения), а также значений всех других показателей качества и экономичности.

*Параметрическая стандартизация* заключается в выборе и обосновании целесообразной номенклатуры и числовых значений параметров, определяющих назначение продукции и условия ее использования: габариты, масса, производительность машин и приборов, энергетические параметры и т.д. Параметрические ряды размеров машин, приборов, режущего инструмента, крепежа и т.д. строят согласно системе предпочтительных чисел.

*Унификация продукции* – рациональное сокращению числа объектов одинакового функционального назначения. Унификация базируется на классификации и ранжировании, селекции и симплификации, типизации и оптимизации элементов готовой продукции. Основными направлениями унификации являются:

- разработка параметрических и типоразмерных рядов изделий, машин, оборудования приборов, узлов и деталей;
- разработка типовых изделий в целях создания унифицированных групп однородной продукции;
- разработка унифицированных технологических процессов, включая ТП для специализированных производств продукции межотраслевого применения;
- ограничение целесообразным минимумом номенклатуры разрешаемых к применению изделий и материалов.

В зависимости от области проведения унификация изделий может быть межотраслевой (унификация изделий и их элементов одинакового или близкого назначения, изготавливаемых двумя или более отраслями промышленности), отраслевой и заводской (унификация изделий, изготавливаемых одной отраслью промышленности или одним предприятием).

В зависимости от методических принципов осуществления унификация может быть внутривидовой (семейств однотипных изделий) и межвидовой или межпроектной (узлов, агрегатов, деталей разнотипных изделий).

Степень унификации характеризуется уровнем унификации продукции – насыщенностью продукции унифицированными, в том числе стандартизированными деталями и сборочными единицами. Производство унифицированных изделий позволяет повысить их серийность, снизить трудоемкость производства, повысить качество (за счет

неоднократных проверок в эксплуатации). Унифицированные изделия, как правило, имеют более высокое качество,

*Агрегатирование* – это метод создания машин, приборов и оборудования из отдельных стандартных унифицированных узлов, многократно используемых при создании различных изделий на основе геометрической и функциональной взаимозаменяемости. Агрегатирование очень широко применяется в машиностроении и радиоэлектронике. Например, унифицированные электронные модули в виде микросхем, функциональных узлов и т.д. позволяют создавать большое число ЭС различного назначения.

*Комплексная стандартизация.* Отражает комплексный (системный) подход к объектам стандартизации.

*Опережающая стандартизация* заключается в установлении повышенных по отношению к уже достигнутому на практике уровню норм и требований к объектам стандартизации, которые согласно прогнозам будут оптимальными в последующее время.

Стандарты не могут только фиксировать достигнутый уровень развития науки и техники, так как из-за высоких темпов морального старения многих видов продукции они могут стать тормозом технического прогресса. Для того чтобы стандарты не тормозили технический прогресс, они должны устанавливать перспективные показатели качества с указанием сроков (по годам) их обеспечения промышленным производством. Перебегающие стандарты должны стандартизировать перспективные виды продукции, серийное производство которых еще не начато или находится в начальной стадии.

## **1.2. Государственная система стандартизации России (ГСС РФ)**

Основой ГСС является фонд законов, подзаконных актов, нормативных документов по стандартизации, представляющий четырехуровневую систему.

*Нормативные документы I уровня* являются правовой основой ГСС. К ним относят совокупность законов РФ, подзаконных актов по стандартизации (постановлений Правительства РФ, приказов федеральных органов исполнительной власти), применяемых для государственного регулирования качества продукции, работ и услуг. По существу, это технические регламенты I уровня, т.е. – НД обязательного исполнения.

*Нормативные документы II уровня* представлены:

- государственными стандартами РФ (ГОСТ Р);
- межгосударственными стандартами;
- государственными стандартами бывшего Союза ССР (ГОСТ);
- правилами, нормами и рекомендациями по стандартизации;



– общероссийскими классификаторами технико-экономической и социальной информации.

Техническими регламентами II уровня (т.е. обязательными к исполнению) являются: государственные и межгосударственные стандарты (далее – государственные стандарты), содержащие обязательные требования; правила по стандартизации, метрологии, сертификации; общероссийские классификаторы.

*Нормативные документы III уровня* представлены стандартами, сфера применения которых ограничена определенной отраслью народного хозяйства – отраслевыми стандартами (ОСТ) или сферой деятельности – стандартами научно-технических и инженерных обществ (СТО).

*Нормативные документы IV уровня* представлены НД, сфера действия которых ограничена рамками организации (предприятия) — стандартами предприятий (СТП) и техническими условиями (ТУ).

Важнейшими структурными элементами ГСС являются органы и службы стандартизации; комплекс стандартов, система контроля за внедрением и соблюдением стандартов.

## **Государственные стандарты Российской Федерации**

Государственные стандарты содержат требования к продукции, работам и услугам, необходимость в которых имеет отраслевой характер. Эти стандарты принимает Госстандарт России. К объектам ГОСТ Р относят:

- организационно-методические и общетехнические объекты межотраслевого применения;
- продукцию, работы и услуги, имеющие межотраслевое значение.

В ГОСТ Р содержатся обязательные и рекомендательные требования.

К обязательным требованиям относятся:

- безопасность продукта, услуги, процесса для здоровья человека, окружающей среды, имущества, а также производственная безопасность и санитарные нормы;
- техническая и информационная совместимость и взаимозаменяемость изделий;
- единство методов контроля и единство маркировки.

К рекомендательным требованиям относятся:

- основные потребительские характеристики продукции и методы их контроля;
- требования к упаковке, транспортировке, хранению и утилизации продукта;

– правила и нормы, касающиеся разработки производства и эксплуатации;

– правила оформления технической документации.

Обозначение государственного стандарта состоит из индекса «ГОСТ Р», регистрационного номера и отделенных тире двух последних цифр года принятия.

Применение государственных стандартов – это прежде всего реализация содержащихся в них обязательных требований. Согласно Закону РФ «О стандартизации» заказчик и исполнитель обязаны включать в договор условие о соответствии продукции (работ, услуг) обязательным требованиям стандартов. Если такое условие не включено в договор, то это не снимает с партнеров по договору обязанности обеспечить выполнение обязательных требований стандартов.

Рекомендательные требования государственных стандартов подлежат обязательному соблюдению субъектами хозяйственной деятельности при условии их включения: а) в договор; б) в техническую документацию изготовителя (поставщика продукции, исполнителя работ или услуг).

### **Межгосударственные стандарты**

Эту категорию составляют действующие ГОСТы бывшего СССР, которые признаны Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). Членами МГС являются руководители национальных органов по стандартизации, метрологии и сертификации 12 государств – бывших союзных республик СССР. Пример: ГОСТ 21552–84 (Межгосударственный стандарт). Средства вычислительной техники. Общие технические требования, приемка, методы испытаний, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение.

### **Межотраслевые системы (комплексы) стандартов**

В общем объеме национальных стандартов (ГОСТ и ГОСТ Р) особое место занимают комплексы стандартов общетехнических систем (табл. 1.1).

Создание взаимоувязанных систем стандартов на основе комплексного подхода к проблемам в свое время стало одним из важных достижений советской и российской стандартизации. Указанные системы и требования их стандартов являются структурообразующими во всем комплексе национальных стандартов.

Таблица 1.1

Перечень систем межгосударственных и государственных стандартов

Наименование систем	Аббревиатура в обозначении стандарта	Шифр в обозначении	Категория стандартов
Государственная система стандартизации Российской Федерации	ГСС	1	ГОСТ Р
Единая система конструкторской документации	ЕСКД	2	ГОСТ
Единая система технологической документации	ЕСТД	3	ГОСТ
Система показателей качества продукции	СПКП	4	ГОСТ
Унифицированная система документации	УСД	6	ГОСТ, ГОСТ Р
Система информационно-библиографической документации	СИБИД	7	ГОСТ
Государственная система обеспечения единства измерений	ГСИ	8	ГОСТ, ГОСТ Р
Единая система защиты от коррозии и старения	ЕСЗКС	9	ГОСТ
Система стандартов безопасности труда	ССБТ	12	ГОСТ, ГОСТ Р
Единая система технологической подготовки производства	ЕСТПП	14	ГОСТ
Система разработки и постановки продукции на производство	СРПП	15	ГОСТ, ГОСТ Р
Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов	-	17	ГОСТ, ГОСТ Р
Единая система программных документов	ЕСПД	19	ГОСТ
Расчеты и испытания на прочность	-	25	ГОСТ
Надежность в технике	-	27	ГОСТ
Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения	-	29	ГОСТ
Информационная технология	-	34	ГОСТ Р
Система сертификации	-	40	ГОСТ Р

В обозначении государственных стандартов, входящих в комплекс (систему) стандартов, в регистрационном номере первые цифры с точкой определяют шифр комплекса государственных стандартов. Например, ГОСТ Р 15.201–2000. СРПП. Производство продукции производственно-технического назначения. Порядок разработки и поставки на производство.

### **Отраслевые стандарты**

Отраслевые стандарты разрабатываются применительно к продукции определенной отрасли. Их требования не должны противоречить обязательным требованиям государственных стандартов, а также правилам и нормам безопасности, установленным для отрасли. Отраслевые стандарты регламентируют:

- продукцию, процессы и услуги, применяемые в отрасли;
- правила, касающиеся организации работ по отраслевой стандартизации;
- типовые конструкции изделий отраслевого применения;
- правила метрологического обеспечения в отрасли.

Обозначение стандарта отрасли состоит из индекса «ОСТ», условного обозначения министерства (ведомства), регистрационного номера и отделенных тире двух последних цифр года утверждения стандарта. Например, ОСТ 4.010.030–81. Установка навесных элементов на печатные платы.

Примерами продукции отраслевого значения как объекта ОСТ являются: корпуса микросхем частного применения, изготавливаемые и применяемые только в данной отрасли (в то время как корпуса микросхем межотраслевого применения являются объектами ГОСТа). ОСТ применяют (в смысле – соблюдают) предприятия, подведомственные государственному органу управления, принявшему стандарт. Но условием обязательного исполнения требований ОСТа является включение ссылки на него в договор или техническую документацию изготовителя (поставщика) продукции. Иные субъекты хозяйственной деятельности применяют ОСТы на добровольной основе. Например, вышеназванный ОСТ широко используется предприятиями нескольких отраслей.

### **Стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений**

Объектами СТО являются; 1) принципиально новые виды продукции и услуг; 2) новые методы испытаний; 3) нетрадиционные тех-

нологии разработки, изготовления, хранения и новые принципы организации и управления видами деятельности.

СТО разрабатываются для динамического отражения и распространения полученных в определенных областях знаний и сферах профессиональных интересов результатов фундаментальных и прикладных исследований.

Требования СТО не должны быть ниже уровня обязательных требований государственных стандартов.

По мере применения СТО на новые виды продукции (услуги) и технологии и их апробации как стандартов происходит отработка требований к объектам стандартизации. В результате в ряде случаев возникает необходимость разработки на базе зарекомендовавших себя СТО государственных стандартов.

### **Стандарты предприятий**

СТП разрабатываются и применяются самим предприятием. СТП регламентируют:

- деятельность составляющих частей предприятия;
- управление производством;
- качество производимой продукции;
- общие технологические нормы процесса производства продукции.

СТП утверждает руководитель предприятия (объединения предприятий). СТП **обязателен** для работников данного предприятия. Основное назначение СТП – решение внутренних задач, например регламентация оптимальных процессов организации и управления производством. Обозначение СТП состоит из индекса «СТП», регистрационного номера и отделенных тире двух последних цифр года утверждения стандарта.

### **1.3. Общая характеристика стандартов разных видов**

В зависимости от назначения и содержания разрабатываются стандарты следующих видов:

- основополагающие;
- на продукцию и услуги;
- на работы (процессы);
- на методы контроля.

*Основополагающий стандарт* – это НД, имеющий широкую область распространения или содержащий общие положения для определенной области.

Основополагающие общетехнические стандарты устанавливают научно-технические термины, многократно используемые в науке, технике, производстве; условные обозначения различных объектов стандартизации – коды, метки, символы; требования к построению, изложению, оформлению и содержанию различных видов документации (например, ГОСТ Р 15.000–94. СРПП. Основные положения); общетехнические величины, требования и нормы, необходимые для технического обеспечения производственных процессов (предпочтительные числа, параметрические и размерные ряды, классы точности оборудования); требования технической эстетики и эргономики (например, ГОСТ 8.417. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин).

*Стандарты на продукцию (услугу)* устанавливают требования к группам однородной продукции (услуги) или конкретной продукции (услуге).

На продукцию (услугу) разрабатывают следующие основные разновидности стандартов; стандарт общих технических условий; стандарт технических условий. В первом случае стандарт содержит общие требования к группам однородной продукции, во втором – к конкретной продукции. Например, ГОСТ 23752–79. Платы печатные. Общие технические условия. Указанные стандарты в общем случае включают следующие разделы: классификация, основные параметры и (или) размеры; общие технические требования; правила приемки; маркировка, упаковка, (транспортирование, хранение. По группам однородной продукции могут разрабатываться стандарты узкого назначения: стандарты технических требований; стандарты правил приемки; стандарты правил маркировки, упаковки, транспортирования и хранения. Например, ГОСТ Р 50622–93 (МЭК 326–5–80). Платы печатные двусторонние с металлизированными отверстиями. Общие технические требования.

*Стандарты на работы (процессы)* устанавливают требования к выполнению различного рода работ на отдельных этапах жизненного цикла продукции (услуги) – разработка, изготовление, хранение, транспортирование, эксплуатация, утилизация для обеспечения их технического единства и оптимальности.

Типичным объектом стандартов отрасли являются типовые технологические процессы. Пример: ОСТ 4.054.060–82. Платы печатные. Типовые технологические процессы.

Стандарты на работы (процессы) должны содержать требования безопасности для жизни и здоровья населения и охраны окружающей природной среды при проведении технологических операций.

На современном этапе большое значение приобретают стандарты, регламентирующие управленческие процессы в рамках систем

обеспечения качества продукции (услуг): управление документацией, закупками продукции, подготовкой кадров и пр. Управленческий процесс — типичный объект СТП на предприятии, где действует система качества.

*Стандарты на методы контроля (испытания, измерения, анализ)* должны в первую очередь обеспечивать всестороннюю проверку всех обязательных требований к качеству продукции (услуги). Устанавливаемые в стандартах методы контроля должны быть объективными, точными и обеспечивать воспроизводимые результаты. Выполнение этих условий в значительной степени зависит от наличия в стандарте сведений о погрешности измерений.

Для каждого метода в зависимости от специфики его проведения устанавливают: а) средства испытаний и вспомогательные устройства; б) порядок подготовки к проведению испытаний; в) порядок проведения испытаний; г) правила обработки результатов испытаний; д) правила оформления результатов испытаний; е) допустимую погрешность испытаний.

Государственные и отраслевые стандарты не являются объектом авторского права.

### **Технические условия**

ТУ могут выступать в роли технических и нормативных документов. Как технический документ ТУ разрабатываются по решению разработчика (изготовителя) или по требованию заказчика (потребителя) продукции и являются неотъемлемой частью КД или другой технической документации на продукцию. ТУ разрабатывают на:

- одно конкретное изделие, материал, вещество и т.п.;
- несколько конкретных изделий, материалов, веществ и т.п. (групповые ТУ).

К НД относятся те ТУ, на которые делаются ссылки в договорах на поставляемую продукцию (оказываемые услуги).

В отличие от стандартов ТУ разрабатываются в более короткие сроки, что позволяет оперативно организовать выпуск новой продукции. Типичными объектами ТУ среди товаров являются: изделия, выпускаемые мелкими сериями; изделия, осваиваемые промышленностью; продукция, выпускаемая на основе новых рецептур и (или) технологий.

ТУ содержат вводную часть и разделы, расположенные в определенной последовательности: технические требования; требования безопасности; требования охраны окружающей среды; правила приемки; методы контроля; транспортирование и хранение; указания по эксплуатации; гарантии изготовителя.

Требования, установленные ТУ, не должны противоречить обязательным требованиям государственных стандартов, распространяющимся на данную продукцию.

Обозначение ТУ формируется:

- из кода «ТУ»;
- кода группы продукции по классификатору продукции «ОКП»;
- кода предприятия-разработчика ТУ по классификатору предприятий и организаций «ОКПО»;
- двух последних цифр года утверждения документа.

В некоторых случаях роль ТУ может выполнять образец-эталон и его техническое описание (ТО). Образцом-эталоном следует считать готовое изделие (комплекс изделий), утвержденное в качестве представителя конкретной продукции и предназначенное для сличения с ним выпущенной продукции по внешнему виду и другим признакам, определяемым органолептическими методами. ТО составляют на одно или несколько конкретных изделий, для которых предусмотрены образцы-эталоны. В ТО указывают: краткое описание изделия (внешний вид, цвет, масса, отделка и т.п.); параметры, а также требования к форме, конструкции, модели, размеру изделия; обозначение материалов, применяемых при изготовлении данного изделия (при необходимости); транспортирование, хранение, гарантии изготовителя. В ТО при необходимости помещают рисунок, эскиз или фото изделия.

#### **1.4. Международная и региональная стандартизация**

Для успешного осуществления торгового, экономического и научно-технического сотрудничества различных стран первостепенное значение имеет международная стандартизация. Необходимость разработки международных стандартов (МС) становится все более очевидной, так как различия национальных стандартов на одну и ту же продукцию, предлагаемую на мировом рынке, являются барьером на пути развития международной торговли. Основной задачей международного научно-технического сотрудничества в области стандартизации является гармонизация, т.е. согласование национальной системы стандартизации с международной, региональными и прогрессивными национальными системами стандартизации зарубежных стран в целях повышения уровня российских стандартов, качества отечественной продукции и ее конкурентоспособности на мировом рынке. В практике международной стандартизации основной упор при разработке стандартов на продукцию делается на установление единых методов испытаний продукции, требований к маркировке, терминологии, т.е. на те аспекты, без которых невозможно взаимопонимание изготовителя и потребителя независимо от страны, где производится и используется



продукция. В МС также устанавливаются требования к продукции в части безопасности ее для жизни и здоровья людей, окружающей среды, взаимозаменяемости и технической совместимости.

Международное сотрудничество осуществляется по линии международных и региональных организаций по стандартизации.

Наиболее крупными международными организациями по стандартизации считаются:

Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная электротехническая комиссия (МЭК).

*Международная организация по стандартизации* функционирует с 1947 г. Сфера деятельности ИСО охватывает стандартизацию во всех областях, за исключением электроники и электротехники, которые относятся к компетенции МЭК.

К значительным достижениям ИСО относят разработку международной системы единиц измерения (СИ), принятие метрической системы резьбы, системы стандартных размеров и конструкции контейнеров для перевозки грузов всеми видами транспорта. К одному из приоритетных направлений в деятельности ИСО относят информационные технологии.

*Международная электротехническая комиссия* разрабатывает стандарты в области электротехники, радиоэлектроники, связи. Она была создана в 1906 г., т.е. задолго до образования ИСО. Разновременность образования и разная направленность МЭК и ИСО определили факт параллельного существования двух крупных международных организаций. С учетом общности задач ИСО и МЭК, а также возможности дублирования деятельности отдельных технических органов между этими организациями заключено соглашение, которое направлено, с одной стороны, на разграничение сферы деятельности, а с другой — на координацию технической деятельности.

В мире действует несколько региональных организаций по стандартизации. Для России наиболее интересен опыт стандартизации в *Европейском союзе (ЕС)*, в котором достигнуты наибольшие успехи в области интеграции экономики и создании объединенного регионального рынка. Такой единый рынок был сформирован к 1 января 1993 г. Он обслуживает в общей сложности 320 млн жителей 12 стран – членов Европейского экономического сообщества (Англии, Бельгии, Германии, Греции, Дании, Италии, Испании, Ирландии; Люксембурга, Нидерландов, Португалии, Франции). При этом первоочередное значение в устранении национальных барьеров придается развитию европейской стандартизации.

Еще в 1972 г. Советом ЕС была принята Генеральная программа устранения технических барьеров в торговле в пределах Сообщества. В рамках этой программы ставилась задача создания системы

обязательных для ЕС единых стандартов – «из сотен национальных стандартов в каждой европейской стране сделать несколько тысяч единых стандартов». Единые стандарты должны были лишить страны-члены ЕС возможности отказа от иностранных продуктов из государств Сообщества. Огромное внимание предполагалось уделить нормам по показателям качества продукции, устанавливаемым едиными стандартами. В этой части предполагалось брать за образец стандарты ФРГ – ДИНЫ (DIN), дающие гарантию высокого технического уровня стандартизируемой продукции.

Важную роль сыграла разработка Комиссией ЕС программы «Зеленая книга Европы» (Развитие европейской стандартизации для ускорения технической интеграции в Европе), где был изложен план перестройки и развития стандартизации на континенте. Основное в «Зеленой книге» то, что *евростандарты* должны отражать новейшие достижения техники и технологии, а *директивы* – содержать эффективные меры против проникновения в Сообщество продукции, небезопасной или вредной для населения и окружающей среды.

Продукция, отвечающая требованиям директивы, маркируется знаком «С€» и имеет право свободного перемещения внутри объединенного рынка. В качестве евростандартов широко используются многие стандарты ИСО и МЭК.

### **1.5. Применение международных и региональных стандартов в отечественной практике**

Одним из важнейших направлений эффективного участия нашей страны в работах по международной стандартизации является своевременное и наиболее полное использование МС в отраслях народного хозяйства.

Существует три варианта применения в Российской Федерации международных, региональных, национальных стандартов других стран в зависимости от степени использования международного документа и формы его представления.

1. Принятие государственного стандарта, представляющего аутентичный (т.е. равноправный с оригиналом и полностью ему соответствующий) текст на русском языке соответствующего международного документа. Обозначение государственного стандарта РФ в этом случае состоит: из индекса «ГОСТ Р», обозначения соответствующего международного стандарта (без указания года его принятия), отделенных тире двух последних цифр года утверждения ГОСТ Р. Пример: ГОСТ Р ИСО 10303–1–99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными.

2. Принятие государственного стандарта, представляющего аутентичный текст на русском языке соответствующего документа с дополнительными требованиями, отражающими специфику потребностей России. В этом случае содержание ГОСТа несколько отличается от зарубежного аналога. Обозначение таких стандартов состоит из обычного обозначения ГОСТа и обозначения МС, приводимого в скобках. Например, ГОСТ Р 50044–92 (МЭК 191–6–90). Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые для поверхностного монтажа.

В ряде случаев по тексту стандарта выделяют (шрифтом или другим способом) требования, учитывающие национальные особенности России или СНГ.

3. Принятие ОСТ, СТП, СТО на основе международного документа до принятия их в качестве государственных стандартов. Этот метод состоит в локальном использовании международного документа или в рамках отрасли, или в рамках предприятия, или в рамках научно-технического (инженерного) общества, поскольку государственные органы и субъекты хозяйственной деятельности России в целом еще не подготовлены к применению международного стандарта.

## **1.6. Техническая документация**

К основным видам технической документации относят конструкторскую и технологическую документацию. Виды и формы документов, порядок их разработки, оформления, заполнения, обращения, внесения изменений, хранения и т.д. отражены в соответствующих системах стандартов ЕСКД и ЕСТД.

### **Конструкторская документация (КД)**

К КД относят графические и текстовые документы, которые в отдельности или в совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

Устанавливаются следующие виды изделий: а) детали; б) сборочные единицы; в) комплексы; г) комплекты.

К графическим конструкторским документам относятся:

*чертеж детали* – изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;

*сборочный чертеж* – изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для сборки и контроля;

*чертеж общего вида* – определяет конструкцию изделия, взаимодействие его основных частей и поясняет принцип работы изделия;

*теоретический чертеж* – геометрическая форма (обводы) изделия и координаты расположения основных частей;

*габаритный чертеж* – контурное изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;

*электромонтажный чертеж* – данные для электрического монтажа изделия;

*монтажный чертеж* – контурное изображение изделия и данные для его установки на месте эксплуатации;

*установочный чертеж* – данные для установки изделия;

*схема* — составные части изделия в виде условных изображений или обозначений и связи между ними.

К текстовым конструкторским документам относятся:

*спецификация* – определяет состав сборочной единицы, комплекса, комплекта;

*ведомость спецификаций* – перечень всех спецификаций составных частей изделия с указанием их количества и входимости;

*ведомость ссылочных документов* – перечень документов, на которые имеются ссылки в КД на изделие;

*ведомость покупных изделий* – перечень покупных изделий, примененных в разрабатываемом изделии;

*ведомость согласования применения покупных изделий* – перечень покупных изделий, применение которых согласовано;

*ведомость держателей подлинников* – перечень организаций-хранителей подлинников примененных в изделии документов;

*ведомость технического предложения* – перечень документов, вошедших в техническое предложение;

*ведомость эскизного проекта* – перечень документов, вошедших в эскизный проект;

*ведомость технического проекта* – перечень документов, вошедших в технический проект;

*пояснительная записка* – описание устройства и принципа действия разработанного изделия, а также обоснование разработки;

*технические условия* – требования к изделию, его изготовлению, контролю качества, приемке и поставке;

*программа и методика испытаний* – технические данные, подлежащие проверке при испытании изделия, порядок и методы их контроля;

*таблица* – данные, сведенные в таблицу;

*расчет* – расчеты параметров и величин (расчет размерных цепей, расчет на прочность, расчет теплового режима, расчет надежности и т.д.);

*эксплуатационные документы* – документы для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации;

*ремонтные документы* – данные для проведения ремонтных работ на специализированных предприятиях;

*инструкция* – указания и правила, используемые при изготовлении изделия (сборке, регулировке, контроле и т. п.);

*патентный формуляр* – документ, содержащий результаты патентного поиска, осуществленного при разработке изделия. В нем содержится оценка патентоспособности, патентная чистота и технический уровень разработанного изделия, материала, процесса, метода.

В общем объеме КД ЭС существенное место занимает схемная документация.

*Схема* – графический конструкторский документ, на котором в виде условных изображений или обозначений показаны составные изделия и связи между ними. Схемы применяют при изучении принципа действия устройства, при его изготовлении, наладке и ремонте, а также для понимания связи между составными частями изделия без уточнения особенностей их конструкции. Схемы являются исходным базисом для последующего конструирования отдельных частей и всего изделия в целом. Составляющими частями схем являются:

*элемент схемы* – составная часть схемы, которая выполняет определенную функцию в изделии и не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное значение (микросхема, резистор, трансформатор и др.);

*устройство* – совокупность элементов, представляющая единую конструкцию (блок, модуль). В ряде случаев устройство может не иметь определенного функционального назначения;

*функциональная группа* – совокупность элементов, выполняющих определенную функцию и не объединенных в единую конструкцию;

*функциональная часть* – элемент, устройство или функциональная группа, имеющие строго определенное функциональное назначение;

*функциональная цепь* – линия, канал на схеме, указывающие на наличие связи между функциональными частями изделия ;

*линия взаимосвязи* – отрезок линии на схеме, указывающий на наличие связи между функциональными частями изделия;

*линия электрической связи* – линия на схеме, указывающая путь прохождения тока, сигнала и т.д.

При проектировании ЭС используются следующие виды схем:

*структурные схемы* (Э1), определяющие основной состав ЭС и его функциональные части, их назначение и взаимосвязи. Их разраба-

тывают на начальных стадиях проектирования ЭС и используют как для разработки схем других типов, так и для общего ознакомления с ЭС;

*функциональные схемы* (Э2), поясняющие процессы, происходящие в отдельных функциональных частях и узлах ЭС. Они являются основой для разработки принципиальных схем и применяются при наладке, ремонте и эксплуатации ЭС;

*принципиальные схемы* (Э3), определяющие полный состав элементов и связей между ними и дающие полное представление о принципе работы отдельных узлов и устройств ЭС. Эти схемы являются основой для разработки полного комплекта КД ЭС.

*схемы соединений* (Э4), показывающие соединения составных частей ЭС и определяющие провода, жгуты, кабели и другие соединительные изделия, а также места их присоединения и ввода. Их используют как при выпуске КД на ЭС, так и при ее ремонте и эксплуатации;

*схемы подключений* (Э5), показывающие внешние подключения ЭС. Эти схемы используют при монтаже ЭС на месте эксплуатации и при ее ремонте;

*общие схемы* (Э6), определяющие составные части ЭА и соединения их между собой на месте эксплуатации;

*схемы расположения* (Э7), устанавливающие взаимное расположение отдельных устройств ЭС, а также соединяющих их жгутов, кабелей и т. д.

КД разрабатывается поэтапно. ГОСТ 2.103-68 устанавливает следующие стадии разработки КД.

*Техническое предложение* – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия на основании анализа технического задания заказчика и различных вариантов возможных решений изделий, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий и патентные исследования. Техническое предложение разрабатывается с целью выявления дополнительных или уточненных требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.), которые не могли быть указаны в техническом задании, и это целесообразно сделать на основе предварительной конструкторской проработки и анализа различных вариантов изделия. КД присваивается литера «П».

*Эскизный проект* – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные пара-

метры и габаритные размеры разрабатываемого изделия. Эскизный проект разрабатывают с целью установления принципиальных (конструктивных, схемных и др.) решений изделия, дающих общее представление о принципе работы и (или) устройстве изделия, когда это целесообразно сделать до разработки технического проекта или рабочей документации. КД присваивается литера «Э».

*Технический проект* – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации. Технический проект разрабатывают с целью выявления окончательных технических решений, дающих полное представление о конструкции изделия, когда это целесообразно сделать до разработки рабочей документации. КД присваивается литера «Т».

*Рабочая КД опытного образца* – КД, предназначенная для изготовления и испытания опытного образца (или партии). Представляет собой полный комплект КД без литеры.

*Разработка КД серийного (массового) производства* – КД, предназначенная для изготовления и испытания установочной серии. Представляет собой полный комплект КД с литерой «О» («О<sub>1</sub>» или «О<sub>2</sub>»).

Виды конструкторских документов, разрабатываемых на каждой из стадий, определены ГОСТ 2.102–68.

### **Технологическая документация (ТД)**

Государственные стандарты, входящие в ЕСТД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения ТД, разрабатываемой и применяемой на предприятиях всех отраслей промышленности страны.

*Технологические документы* – текстовые и графические документы, в отдельности или в совокупности определяющие порядок изготовления изделия, проведения процессов и содержащие необходимые данные для контроля и приемки изделий.

Виды и правила проектирования ТД определяются видом производства, на котором будут изготавливаться или ремонтироваться изделия и его составные части. Машино– и приборостроительные производства классифицируют следующим образом:

- по назначению – основное, вспомогательное, опытное;
- по типу – единичное, серийное, массовое;
- и т.д.

В зависимости от назначения ТД подразделяют на основные и вспомогательные. Основные технологические документы содержат различную информацию:

- о комплектующих составных частях изделия и применяемых материалах;
- о действиях, выполняемых исполнителями при проведении технологических процессов и операций;
- о средствах технологического оснащения производства;
- о наладке средств технологического оснащения и применяемых данных по технологическим режимам;
- о расчете трудозатрат, материалов и средств технологического оснащения;
- о технологическом маршруте изготовления и ремонте;
- о требованиях к рабочим местам, экологии окружающей среды и т.п.

Виды основных ТД:

а) *технологическая инструкция* – описание часто повторяющихся приемов работы, действий по наладке и настройке средств технологического оснащения, приготовлению растворов, электролитов, смесей и др., а также отдельных типовых и групповых технологических процессов (операций);

б) карты:

*маршрутная карта* – является обязательным документом. Она предназначена для маршрутного и маршрутно-операционного описания технологического процесса или указания полного состава технологических операций при операционном описании изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия), включая контроль и перемещения по всем операциям различных технологических методов в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах;

*операционная карта* – содержит описание технологической операции с указанием переходов, режимов обработки и данных о средствах технологического оснащения;

*карта эскизов* – графический документ, содержащий эскизы, схемы и таблицы и предназначенный для пояснения выполнения технологического процесса, операции или перехода;

*карта технологического процесса* – предназначена для операционного описания технологического процесса изготовления или ремонта изделия (составных частей) в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов, технологических режи-



мов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах;

*карта типового технологического процесса (операции)* – используется для описания типового технологического процесса (операции) изготовления или ремонта деталей и сборочных единиц;

и т.д.;

в) ведомости:

*ведомость технологических маршрутов* – сводная информация по технологическому маршруту изготовления изделия и его составных частей;

*ведомость оборудования* – полный состав оборудования, применяемого при изготовлении (ремонте) изделия;

*ведомость материалов* – сводные поддетальные нормы расхода материалов (основных и вспомогательных) на изделие;

и другие.

Стадии разработки ТД, применяемой для технологических процессов изготовления изделий (составных частей изделий), определяются в зависимости от стадий разработки используемой КД и могут быть следующими:

*предварительный проект* – разработка ТД, предназначенной для изготовления и испытания макета изделия и (или) его составных частей с присвоением литеры «П», на основании КД, выполненной на стадиях «Эскизный проект» и «Технический проект»;

*разработка документации: а) опытного образца (опытной партии), б) серийного (массового) производства* – разработка ТД для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) или изделий серийного (массового) производства по соответствующей конструкторской документации.

## 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ПОСТАНОВКИ ЭС НА ПРОИЗВОДСТВО

### 2.1. Общая характеристика ЭС

#### Требования, предъявляемые к ЭС

Современные ЭС эксплуатируются в самых разнообразных условиях: в закрытых помещениях (специальных комнатах, лабораториях, в цехах) и на открытом воздухе (испытательных площадках и т.д.), на подвижных объектах, а также в условиях, где присутствие человека затруднено (глубины океана, космическое пространство, ядерные реакторы и т.п.). Во всех случаях ЭС должно надежно функционировать и отвечать предъявляемым требованиям.

Примерные требования, предъявляемые к разрабатываемому электронному средству:

*Функциональное назначение* (приемная или передающая аппаратура, управляющая или персональная ЭВМ и т.д.).

*Основные параметры и их значения* (мощность излучения, полоса пропускания, быстродействие, объемы оперативной, постоянной и внешней памяти, разрядность команд и данных и т.д.).

*Категория, класс и группа*, к которым относится разрабатываемое ЭС. Категории, классы и группы подразделяют ЭС по продолжительности функционирования (однократного, многократного, непрерывного, смешанного действия), по зонам использования (наземная, морская, бортовая), а также по объекту установки (стационарная, носимая, возимая, корабельная, авиационная, космическая и т.д.).

*Климатическое исполнение*. Определяется соответствующими стандартами в зависимости от области (одной из зон, на которые условно разделена поверхность земного шара) использования ЭС.

*Массогабаритные характеристики и присоединительные размеры*. Ограничения по массе и габаритам наиболее важны для транспортируемых ЭС. Присоединительные размеры определяются объектом установки.

*Требования по надежности* включают конкретные количественные характеристики: вероятность безотказной работы за определенный отрезок времени, среднюю наработку на отказ, среднее время восстановления работоспособности, срок службы и др.

*Требования безопасности*. В общем случае перечисляются требования к обеспечению безопасности персонала при монтаже, эксплуатации, защите от высоких напряжений, тепловых, радиационных, СВЧ и др. воздействий. Определяются с учетом соответствующих стандартов.

*Эстетические и эргономические требования* направлены на уменьшение числа ошибок операторов электронных систем и улучшение условий их труда. К ним относят: требования к индикаторам, переключателям и иным устройствам управления; требования к цветной гамме помещений, мебели, аппаратуры; требования к конструкции и организации рабочего места операторов. Они также определяются с учетом соответствующих стандартов.

*Требования к технологичности.* Различают производственную и эксплуатационную технологичность. Производственная технологичность характеризуется трудоемкостью, материалоемкостью и себестоимостью (т.е. оценивается количественно), а эксплуатационная - доступностью, контролепригодностью, взаимозаменяемостью и т.д. (т.е. оценивается в основном качественно).

*Прочие требования* – к стандартизации и унификации, маркировке, упаковке, транспортированию, хранению, к патентной чистоте разработки и т.д.

Многие из вышеперечисленных требований указываются в техническом задании (ТЗ) на разрабатываемое ЭС.

### Конструкция ЭС как большая система

Современные сложные ЭС принято рассматривать как большие системы, характеризуемые следующими принципами:

– иерархичностью (т. е. каждая подсистема или элемент системы может рассматриваться как система) – рис. 2.1;

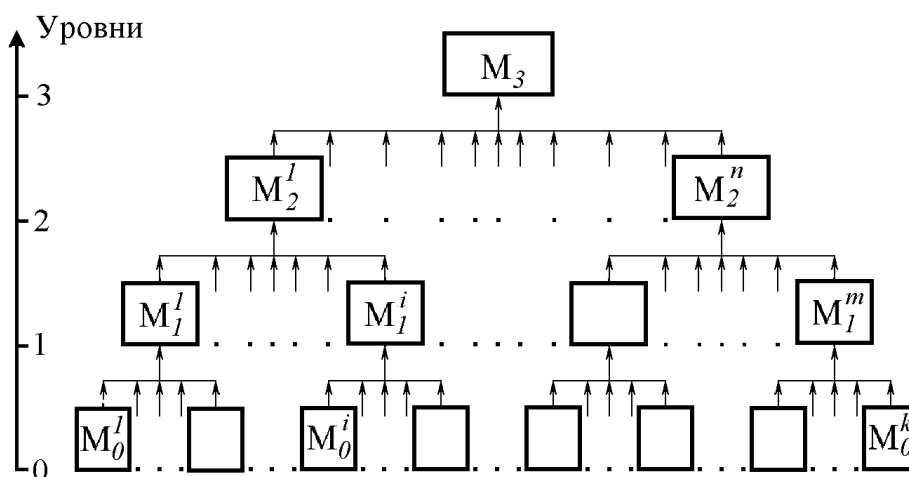


Рис. 2.1. Схема четырехуровневой иерархической системы

– целостностью изучаемой системы (т. е. свойства целого не могут быть поняты и оценены без знания свойств частей этого целого, но

само целое принципиально не может быть сведено к сумме свойств составляющих его элементов);

- структурностью (т. е. возможностью описания системы с помощью сети связей между ее элементами);

- множественностью описания (т. е. система может быть описана множеством математических моделей, каждая из которых охватывает определенный ее аспект);

- взаимозависимостью системы и среды (т. е. свойства системы проявляются только при взаимодействии с окружающей ее средой).

Конструкция любого ЭС условно может быть представлена как система элементов<sup>1</sup> по меньшей мере трех типов:

- функциональных элементов (ФЭ);

- линий связи (ЛС);

- конструктивных элементов (КЭ).

Каждая из этих подсистем также может рассматриваться в качестве многоуровневой иерархической системы: система ФЭ (СФЭ), система ЛС (СЛС) и система КЭ (СКЭ).

СФЭ осуществляет функции преобразования, хранения, обработки, передачи, приема и отображения информации. ФЭ располагают на нижнем (нулевом) уровне СФЭ. ФЭ подразделяют на:

- пассивные и активные;

- дискретные и интегральные<sup>2</sup>;

- бескорпусные и корпусированные;

- поставляемые или собственного изготовления;

- общего применения или специального (например, для СВЧ-диапазона);

и т.д.

К пассивным ФЭ относят резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.п., а к активным – усилительные лампы, полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы), элементы так называемой функциональной электроники и др.

---

<sup>1</sup> Элемент может выполнять одну элементарную функцию; так, например, заклепка скрепляет два листа металла, радиатор обеспечивает отвод тепла, проводник и резистор обеспечивают двустороннее протекание электрического тока и имеют линейную вольт-амперную характеристику (ВАХ), а диод – одностороннее протекание тока и имеет нелинейную ВАХ и т.д.

<sup>2</sup> Термин «интегральные ФЭ» соответствует в приложении термину «элемент ИС».

Дискретные ФЭ<sup>3</sup> обычно изготавливаются по соответствующим ТУ специализированными предприятиями, где их производство отлажено.

СЛС осуществляет обмен информацией между ФЭ. Нижний (нулевой) уровень СЛС составляют межэлементные соединения. Они связывают пассивные и активные ФЭ в схему с определенными функциями. В современных ЭС применяются электрические и волоконно-оптические ЛС. СЛС электрического типа иногда называют электро-монтажом.

СКЭ может быть представлена в виде следующих составляющих:

– подсистемы несущих конструкций (предпочтительно – базовых (БНК));

– подсистем, обеспечивающих функционирование ФЭ и ЛС в условиях воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов (механических воздействий, тепловых полей, воздействий влаги, пыли, электростатических и магнитных полей, различного рода излучений и т.д.).

Некоторые элементы могут одновременно выполнять разные функции (т.е. рассматриваться в составе разных систем). Так, например, диэлектрическая подложка ИС является несущей конструкцией для пленочных элементов и навесных компонентов, обеспечивая изоляцию между ними, а также выполняет роль теплоотвода. Печатная плата также является несущей конструкцией для устанавливаемых на нее компонентов и, кроме того, выполняет функции линий связи, изоляции, теплоотвода (правда, неважного), демпфирующего элемента. Металлические несущие конструкции кроме основных функций обычно выполняют роль теплоотвода и цепей заземления.

ФЭ, соединенные по специальным правилам и технологии (с использованием ЭС и КЭ), образуют функциональные узлы и устройства различной сложности (или другими словами – электронные модули (ЭМ) различных уровней иерархии): интегральные микросхемы (ИС), микросборки (МСБ), блоки, микроблоки и т.д.

Совокупность дискретных ФЭ, входящих в ЭС и располагаемых на нулевом уровне иерархической структуры, часто называется элементной базой (ЭБ).

В зависимости от уровня развития ЭБ, на которой строятся ЭС, последние обычно подразделяют на поколения: 1-е поколение – на радиолампах; 2-е – на дискретных полупроводниковых приборах; 3-е – на ИС; 4-е – на БИС; 5-е – на СБИС.

---

<sup>3</sup> Эквивалентные названия: электрорадиоэлементы (ЭРЭ), радиокомпоненты, электронные компоненты, радиодетали, компоненты и т.д.

Иногда (ввиду отсутствия стандартного определения) под ЭБ того или иного ЭС понимают:

- общий перечень элементов электрической принципиальной схемы;
- совокупность элементов (например, определенных серий ИС), выполняющих основные функции по преобразованию информации;
- наиболее современные ИС (например, конкретные типы БИС или СБИС).

Каждый из этих подходов имеет свои недостатки. Современные ЭС состоят как из ИС (т.е. интегрированных элементов и компонентов), так и из дискретных активных и пассивных компонентов. Специализированные предприятия могут поставлять не только ИС, но и другие ЭМ (узлы на печатных платах, отдельные блоки и устройства. В этих случаях ЭМ будут входить в перечень элементов электрических принципиальных схем ЭС. Особенно это заметно на примере ПК типа IBM PC, изготавливаемых (попросту собираемых) по так называемой «отверточной технологии».

Поскольку нет однозначного подхода к определению ЭБ, то на нулевом уровне могут рассматриваться: дискретные и интегральные элементы, корпусные и бескорпусные ИС (БИС, СБИС, базовые матричные кристаллы (БМК) и др.), а также поставляемые другими предприятиями различные узлы, блоки и целые устройства.

Одним из главных направлений развития конструкций ЭС считается рост функциональных возможностей на единицу объема ЭМ (или уменьшение объема при равных функциях). Для количественной оценки плотности упаковки обычно используются коэффициенты: упаковки ( $K_S$ ), использования объема ( $K_V$ ) и использования массы ( $K_M$ ):

$$K_S = N / V; \quad K_V = V / \sum V_i; \quad K_M = M / \sum M_i,$$

где  $N$  – число ФЭ в ЭМ,  $V$  и  $M$  – соответственно объем и масса ЭМ;  $\sum V_i$  и  $\sum M_i$  – соответственно суммы объемов и масс ФЭ.

### **Влияние условий эксплуатации на функционирование ЭС**

Свойства ЭС полностью проявляются в реальных условиях эксплуатации. Снижение надежности функционирования ЭС возможно под влиянием двух групп факторов: субъективных (к ним относятся конструкторские, технологические и эксплуатационные ошибки и недоработки) и объективных (к ним относятся внешние воздействия и собственные дестабилизирующие факторы). При длительной эксплуатации происходит также физический износ деталей и протекают необратимые процессы старения материалов.

К внешним воздействиям относят: механические, климатические и радиационные. К собственным дестабилизирующим факторам относят взаимное влияние электрических, магнитных и тепловым полей, создаваемых элементами ЭС, а также собственные вибрации, вызываемые работающими электромеханическими устройствами электронных систем.

Схема воздействия дестабилизирующих факторов: воздействие фактора → изменение параметров элементов (ФЭ, ЛС, КЭ) → изменение параметров (состояния) ЭС.

*Механические воздействия* подразделяются на статические и динамические. Из них наибольшую опасность представляют динамические механические воздействия, включающие вибрации, удары, линейные ускорения, акустические удары. Количественно эти виды воздействий характеризуются диапазоном частот колебаний, а также их амплитудой, ускорением, временем действия. Также часто используют коэффициент перегрузки  $n$  – величину, кратную ускорению свободного падения  $g$ .

В процессе транспортирования и эксплуатации любое ЭС подвергается тому или иному виду механических воздействий (а порой и нескольким).

*Вибрации* представляют собой сложные колебания, которые возникают при контакте конструктивных элементов с источником колебаний. Каждая точка конструкции характеризуется своей собственной частотой колебаний. В тех точках, в которых частота собственных колебаний приближается к частоте внешнего источника, возникает явление механического резонанса, приводящего к разрушениям. Поэтому таких ситуаций следует избегать. Вибрации характеризуются частотой, амплитудой и ускорением.

*Удары* подразделяются на одиночные и многократные и характеризуются длительностью ударного импульса, перемещением соударяющихся тел, ускорением. В момент удара происходит колебание системы на вынужденной частоте, определяемой параметрами воздействия, а после него – на собственной частоте конструкции.

*Линейные ускорения* характеризуются ускорением (в единицах  $g$ ) и длительностью воздействия.

*Акустические шумы* проявляются в транспортируемых ЭС, устанавливаемых вблизи работающих двигателей (ракет, самолетов, кораблей и т.д.). Характеризуются давлением звука, мощностью колебаний источника звука, силой звука, спектром звуковых частот.

Под воздействием вибраций и ударных нагрузок в элементах ЭС возникают статические и динамические деформации (нарушение герметичности, обрыв монтажных связей, отрыв навесных компонентов, разрушение хрупких материалов и т.д.), а также изменения парамет-

ров ФЭ (изменение вольт-амперных характеристик, снижение чувствительности и смещение частотных диапазонов, короткие замыкания и т.д.). Ударно-вибрационные нагрузки воздействуют на элементы конструкции ЭС через их точки крепления. Поэтому эффективность такого воздействия определяется также положением элементов относительно его направленности. Детали крепления элементов в определенной мере являются своего рода демпферами, ослабляющими действие источника вибраций.

Акустический шум подвергает механическим нагрузкам практически в равной степени все элементы конструкции. Поэтому в некоторых случаях его действие может быть более разрушительным, чем действие ударно-вибрационных нагрузок.

*Климатические воздействия* определяются климатической зоной, в которой ЭС эксплуатируется. К климатическим факторам относят:

*воздействие температуры* может изменить параметры как конструкционных материалов (тепловое старение материалов), так и электрические характеристики ФЭ и ЛС;

*тепловые удары* способствуют образованию микротрещин конструкционных материалов и появлению прочих дефектов;

*влажность* окружающей среды представляет собой один из наиболее агрессивных для ЭС внешних факторов; влага содержится в любой атмосфере и ее воздействие проявляется в ускорении коррозии металлических деталей и покрытий, снижению электроизоляционных свойств диэлектриков (малый размер молекул воды –  $2,7 \times 10^{-10}$  м – позволяет ей проникать в межмолекулярные промежутки полимеров, керамики и других материалов), изменению характеристик ФЭ и ЛС ; наличие во влаге растворенных химических соединений (атмосфера цехов химических производств, тропический морской климат) значительно усиливают ее вредное воздействие на ЭС;

*пониженное и повышенное давление* влияют на отвод тепла, сопротивление изоляции воздуха, оказывают механическое воздействие на элементы ЭС и т.д.;

*грибковые образования (плесень)* являются источником органических кислот, способствующих коррозии и ухудшению диэлектрических свойств;

*пыль и песок* оседают на поверхности элементов ЭС; в состав пыли входят органические и минеральные соединения; действие органических компонентов аналогично действию плесени, а минеральные частицы, как и песок, могут вывести из строя электромеханические устройства (устройства с движущимися частями);



*солнечное облучение*, состоящее в основном из волн ультрафиолетовой и инфракрасной части спектра, отрицательно действует на некоторые материалы (полимеры, лакокрасочные покрытия и т.д.);

*насекомые и грызуны* также могут отрицательно влиять на функционирование ЭС; многих насекомых привлекает тепло и их останки служат питательной средой для плесени; грызуны (крысы, мыши) повреждают кабели и провода в пластмассовой и резиновой изоляции.

Действие некоторых климатических факторов может усиливать действие других. Например, с ростом температуры активность влаги также возрастает, пыль и песок поглощают влагу, усиливая ее воздействие и т.д.

К *радиационным факторам* относят: космическую радиацию, ядерную радиацию (от реакторов, атомных двигателей, радиационно-опасных ситуаций), облучение потоком гамма-фотонов, нейтронов, бета- и др. частиц. Наиболее устойчивы к воздействию облучения металлы, а наименее – полупроводниковые приборы и ИС, а также некоторые конденсаторы (с органическим диэлектриком и электролитические).

## Надежность ЭС

В процессе эксплуатации ЭС могут находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии. Переход в неработоспособное состояние обычно происходит по причине отказа одного или нескольких элементов, программного обеспечения и т.д. Отказы подразделяют на: внезапный и постепенный, явный и скрытый, зависимый и независимый, конструктивный, производственный, эксплуатационный и т.д.

ЭС могут быть обслуживаемыми и необслуживаемыми, восстанавливаемыми и невозстанавливаемыми, ремонтируемыми или неремонтируемыми. Все эти определения дают качественную характеристику изделия. В ТЗ задаются количественные показатели для конкретных эксплуатационных условий, которые подлежат расчету. Поскольку отказ – событие случайное, то все оценки надежности носят вероятностный характер.

Для количественной оценки надежности чаще всего используют функцию интенсивности отказов  $\lambda(t)$ , часто называемой  $\lambda$  – характеристикой. Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  является критерием, наиболее полно определяющим надежность неремонтируемых ЭС, а также составляющих их элементов и компонентов (резисторов, конденсаторов, ИС, печатных плат, соединений сваркой, пайкой и т.д.). Идеализированный вариант функции  $\lambda(t)$  приведен на рис. 2.2.

Область 1 называют временем приработки. Объекты, претерпевшие отказы на этом участке, как правило, имеют недостаточную

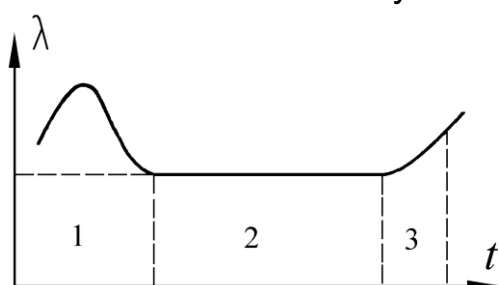


Рис. 2.2. График функции  $\lambda(t)$

электрическую и механическую прочность. Область 2, для которой  $\lambda(t) \approx \lambda$  и имеет минимальное значение, соответствует нормальному периоду работы ЭС. В области 3 интенсивность отказов растет, что обусловлено старением материалов и износом деталей. Все оценки надежности выполняются для периода нормальной эксплуатации, когда надежность постоянна или стационарна. Период приработки изучается отдельно как нестационарный процесс, и этот период должен быть исключен до начала эксплуатации (путем введения тренировки). Стационарный участок нормальной эксплуатации обычно описывается экспоненциальным распределением с постоянным параметром  $\lambda$ . Значения  $\lambda$  являются справочными (например, в настоящее время для ИС в керамическом корпусе  $\lambda = 10^{-8} \dots 10^{-9}$ , 1/ч, а в пластмассовом –  $10^{-7} \dots 10^{-8}$ , 1/ч) и используются для расчетов прочих характеристик надежности, например таких, как вероятность безотказной работы  $P(t)$  и средняя наработка на отказ  $T_{cp}$ :

$$P(t) = \exp \int_0^t [-\lambda(t)dt], \quad T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt .$$

Справочные значения  $\lambda$  часто используют с повышающим коэффициентом  $k_3$ , учитывающим режим работы и сложность условий эксплуатации ЭС.

Оценка надежности многоэлементных ЭС производится обычно при следующих допущениях:

- отказы независимы;
- с точки зрения надежности элементы (ЭРЭ, ИС, паяные или сварные соединения и т.д.) соединены последовательно, т.е. выход из строя любого элемента приводит к отказу изделия в целом;
- закон распределения экспоненциальный.

Тогда для ЭС в целом суммарная интенсивность отказов  $\Delta$  будет равна:

$$\Delta = \sum_{i=1}^N \lambda_i n_i k_3 ,$$

где  $N$  – число последовательно соединенных элементов, а  $\lambda_i$  и  $n_i$  – интенсивность отказов и количество элементов  $i$ -го типа.

Средняя наработка на отказ для этого случая  $T_{cp} = 1/\Delta$ .

Если расчеты показывают недостаточную надежность, то принимают меры для ее повышения. Основные способы повышения надежности ЭС: использование элементов и компонентов с более высокими показателями надежности, снижение влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, снижение электрической и механической нагрузки на элементы, использование резервирования. В последнем случае надежность повышается за счет использования избыточных элементов и компонентов.

Для ремонтируемых ЭС обычно учитывают следующие требования:

- 1) изделия должны иметь встроенную систему контроля, позволяющую локализовать неисправность до сменной части;
- 2) необходимо разработать и изготовить комплект запасных инструментов и принадлежностей (ЗИП), включающий в себя конструктивные модули для замены;
- 3) конструкция должна допускать быструю замену узлов без применения пайки;
- 4) при замене узлов не должно быть подгоночных, регулировочных или подстроечных операций;
- 5) организовать систему технического обслуживания применительно к особенностям объекта эксплуатации и квалификации операторов.

## **2.2. Организация и этапы разработки и постановки на производство**

Согласно действующим в РФ стандартам, можно выделить следующие стадии (и составляющие) жизненного цикла ЭС:

1. Исследование и обоснование разработки (научно-исследовательские работы (НИР), аванпроект, маркетинговые исследования).
2. Разработка (проектирование, опытно-конструкторские работы (ОКР)).
3. Производство (постановка на производство, единичное повторяющееся, серийное, массовое производство).
4. Поставка.
5. Эксплуатация (применение, хранение).
6. Ремонт (для ремонтируемых изделий).
7. Обеспечение эксплуатации и ремонта предприятиями промышленности.
8. Снятие с производства, ремонта, эксплуатации.
9. Утилизация.

Продукция, подлежащая разработке и постановке на производство, должна удовлетворять требованиям заказчика и обеспечивать возможность эффективного ее применения потребителем и (или) возможность экспорта. Требования к техническому уровню продукции устанавливаются с учетом требований, предусмотренных в законодательных и иных нормативных актах.

Основными участниками работ по созданию и освоению новой техники являются заказчик, разработчик, изготовитель и потребитель. Часто потребитель выступает в роли заказчика. Согласно СРПП новая продукция может создаваться по госзаказу (по заказу, финансируемому из федерального бюджета или бюджетов субъектов РФ), заказу конкретных потребителей (заинтересованных организаций, обществ, коммерческих структур), или как инициативная разработка без конкретного заказчика при коммерческом риске с учетом условий рынка сбыта.

В зависимости от сложности и объема выпуска ЭС их разработка и изготовление могут осуществляться на одном предприятии, либо на разных. В разработке и изготовлении сложных систем принимают участие коллективы разрабатывающих предприятий (научно-исследовательских или проектных институтов) и предприятий-изготовителей опытных образцов или серий (серийных заводов).

Часто коллектив разработчиков комплектуется для разработки не одной, а целого класса систем, близких по виду решаемых задач или по структуре, с разными сроками окончания разработки (для обеспечения непрерывной занятости всего коллектива). Разработка системы в целом поручается головному научно-исследовательскому институту (НИИ) во главе с генеральным конструктором. Головной НИИ является в этом случае исполнителем и может поручать разработку отдельных частей (устройств) коллективам отраслевых НИИ или отдельных конструкторских бюро (ОКБ) во главе с главными конструкторами. Технические, юридические и финансовые отношения между ними регламентируются договорами, устанавливающими обязанности сторон.

Применительно к конкретным ЭС одни серийные заводы могут выполнять роль комплектующих (изготавливающих входящие детали, узлы и прочие составные части), а другие - головных (осуществляющих общую сборку, испытания и сдачу заказчику).

Разработка и постановка на производство сложных электронных систем требует четкого взаимодействия всех участников этого процесса: заказчиков, разработчиков, субподрядчиков, изготовителей, коллективов этих предприятий, а также отдельных специалистов. Общие вопросы организации, взаимодействия, а также основные этапы этих работ регламентированы соответствующей НД.

Разработка и постановка продукции на производство в общем случае предусматривает:

- 1) разработку ТЗ на ОКР;
- 2) проведение ОКР, включающей:
  - разработку технической документации;
  - изготовление опытных образцов;
  - испытания опытных образцов;
  - приемку результатов ОКР;
- 3) постановку на производство, включающую:
  - подготовку производства;
  - освоение производства:
  - изготовление установочной серии;
  - квалификационные испытания.

Исходные технические требования к создаваемой системе формулирует заказчик. Исполнитель на их основании разрабатывает ТЗ либо сначала на первую стадию «Исследование и обоснование разработки», либо сразу на вторую – «Разработка (ОКР)».

Первая стадия (чаще в виде НИР) проводится в тех случаях, когда изначально не ясна возможность создания продукции по ТТ. НИР проводится с целью всестороннего технико-экономического обоснования возможности и выяснения целесообразности разработки (модернизации, модифицирования) будущей системы. Порядок выполнения НИР определяется ТЗ и в общем случае может состоять из следующих этапов:

- выбор направления исследований; проводят с целью определения оптимального варианта направления исследований на основе анализа состояния исследуемой проблемы, в том числе результатов патентных исследований, и сравнительной оценки вариантов возможных решений с учетом результатов прогнозных исследований, проводившихся по аналогичным проблемам;

- теоретические и экспериментальные исследования; проводят с целью получения достаточных теоретических и достоверных экспериментальных результатов исследований для решения поставленных перед НИР задач; для экспериментальной проверки возможности создания образца продукции и определения его технических характеристик, проверки правильности результатов теоретических исследований и выбора оптимального технического и конструкторско-технологического решения, и в процессе выполнения НИР при необходимости создают макеты, модели, экспериментальные образцы.

- обобщение и оценка результатов исследований, выпуск отчетной научно-технической документации; проводят с целью оценки эффективности полученных результатов в сравнении с современным на-

учно-техническим уровнем (в том числе оценки создания конкурентоспособной продукции и услуг);

– предъявление работы к приемке и ее приемка.

НИР вообще может не проводиться, если разработка новой системы не связана с принципиально новыми техническими решениями, а базируется на достигнутых ранее.

В результате проведения НИР выполняется научно-технический отчет с рекомендациями и предложениями по реализации и использованию результатов НИР.

Если НИР завершается отрицательным результатом, то это свидетельствует о том, что либо данная разработка неперспективна, либо ее постановка преждевременна, поскольку она не может быть в полной мере обеспечена современным уровнем развития техники. При положительном исходе НИР заканчивается ТЗ на ОКР.

Основная разработка системы проводится в рамках ОКР. Основываясь на результатах НИР, ОКР имеет целью оптимальное инженерное воплощение системы. В процессе выполнения ОКР производятся все конструкторские и технологические расчеты, а также необходимые экспериментальные исследования. ОКР заканчивается разработкой полного комплекта КД и предъявлением заказчику опытного образца (или опытной партии) устройства, выполненного по этой документации.

### **Разработка ТЗ на ОКР**

Основанием для выполнения ОКР является ТЗ, утвержденное заказчиком, и договор (контракт) с ним.

ТЗ является основным исходным документом для разработки продукции. Оно должно содержать технико-экономические требования к продукции, определяющие ее потребительские свойства и эффективность применения, перечень документов, требующих совместного рассмотрения, порядок сдачи и приемки результатов разработки. Конкретное содержание ТЗ определяют заказчик и разработчик, а при инициативной разработке - разработчик.

ТЗ на разработку в общем случае может состоять из следующих разделов:

1. Наименование и область использования продукции.
2. Основание для разработки.
3. Цель и назначение разработки.
4. Источники разработки.
5. Технические требования.
6. Экономические требования.
7. Стадии и этапы разработки.

8. Порядок контроля и приемки продукции.

9. Примечания.

ТЗ разрабатывают и утверждают в порядке, установленном заказчиком и разработчиком.

Отдельные стадии разработки могут не планироваться, если разрабатывается несложная конструкция или проводится модернизация изделия, не связанная с принципиальными изменениями.

При разработке сложных изделий на основании общего ТЗ могут составляться частные ТЗ на отдельные составные части (устройства, блоки, узлы), разработка которых может выполняться различными субподрядными организациями, подразделениями, службами.

На любом этапе разработки продукции при согласии заказчика и разработчика в ТЗ могут быть внесены изменения и дополнения, не нарушающие условия выполнения обязательных требований.

### **Разработка документации, изготовление и испытания опытных образцов продукции**

В разработке электронных систем и их частей принимают участие инженеры различных специальностей: 1) инженеры-электроники-системотехники; 2) инженеры-электроники-схемотехники; 3) инженеры-конструкторы (включая инженеров-дизайнеров); 4) инженеры-технологи; 5) инженеры-математики (или прикладники-математики); 6) инженеры-экономисты и плановики и др. Этим специалистам условно принято делить на три основные группы: разработчики, конструкторы, технологи.

*Разработчики* определяют идеологию построения системы, ее структуру, а также устанавливают функции входящих устройств, обосновывают и выбирают элементную базу, разрабатывают логическую и схемную реализацию ЭС, математическое обеспечение.

*Конструкторы* осуществляют конструирование системы в целом и её составных частей (сборочных единиц, деталей) на основании схемотехнических решений (электрических принципиальных и других схем), принятых разработчиками.

*Технологи* разрабатывают технологические процессы изготовления компонентов (деталей, узлов) и сборки ЭС, а также необходимую для производства оснастку и специальное технологическое оборудование.

Главный конструктор, руководящий разработкой системы, и его аппарат разрешают технические противоречия, возникающие в процессе работы между разными специалистами.

Разработку КД, ТД, а при необходимости программной документации на продукцию проводят по правилам, установленным соответственно стандартами ЕСКД, ЕСТД и ЕСПД.

Взаимосвязь стадий разработки КД и этапов создания ЭС показана в табл. 2.1 (ГОСТ 2.103- 68).

Таблица 2.1

Стадии разработки КД

Стадия разработки КД 1	Этапы выполнения работ 2
Техническое предложение	1. Подбор материалов. 2. Разработка технического предложения с присвоением документам литеры «П». 3. Рассмотрение и утверждение технического предложения.
Эскизный проект	1. Разработка эскизного проекта с присвоением документам литеры «Э». 2. Изготовление и испытание макетов (при необходимости). 3. Рассмотрение и утверждение эскизного проекта.
Технический проект	1. Разработка технического проекта с присвоением документам литеры «Т». 2. Изготовление и испытание макетов (при необходимости). 3. Рассмотрение и утверждение технического проекта.
Рабочая конструкторская документация: а) опытного образца (опытной партии) изделия, предназначенного для серийного (массового) или единичного производства	1. Разработка КД, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии), без присвоения литеры. 2а. Изготовление и предварительные испытания опытного образца (опытной партии). 3а. Корректировка КД по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) с присвоением документам литеры «О».



1	2
	4а. Приемочные испытания опытного образца (опытной партии). 5а. Корректировка КД по результатам приемочных испытаний опытного образца (опытной партии) с присвоением документам литеры «О <sub>1</sub> ».
б) серийного (массового) производства	2б. Изготовление и испытание установочной серии по КД с литерой «О <sub>1</sub> ». 3б. Корректировка КД по результатам изготовления и испытания установочной серии, а также оснащения технологического процесса изготовления изделия, с присвоением документам литеры «А».

*Примечание.* Распределение работ между НИР и ОКР, а также обязательность выполнения стадий и этапов разработки КД определяются соответствующими ТЗ.

В процессе разработки документации по выбору и проверке новых технических решений, обеспечивающих достижение основных потребительских свойств продукции, могут быть проведены лабораторные, исследовательские, стендовые и другие испытания, а также доводочные испытания экспериментальных и опытных образцов продукции в условиях, имитирующих реальные условия эксплуатации.

Для отдельных видов продукции или ее составных частей испытания опытных образцов могут быть проведены в условиях эксплуатации (в том числе на предприятиях - потребителях продукции). Объем и содержание испытаний, необходимых для предотвращения постановки на производство неотработанной, не соответствующей ТЗ продукции, определяет разработчик с учетом новизны, сложности, особенностей производства и применения продукции, а также требований заказчика. При этом должны быть проведены испытания на соответствие всем обязательным требованиям.

Необходимость разработки, изготовления и испытания макетов (моделей), экспериментальных и опытных образцов продукции, их перечень и количество определяют в ТЗ и договоре (контракте) на ОКР (составную часть ОКР). Это не исключает возможности проведения таких работ разработчиком, если их необходимость выявится впоследствии, при этом в ТЗ и договор (контракт) при согласии заказчика вносят соответствующие изменения.

Для подтверждения соответствия разработанной технической документации исходным требованиям изготавливают опытные образцы (опытные партии) продукции, если предполагается серийный выпуск продукции (при ожидаемой постоянной потребности). Опытные образцы (опытную партию) или единичную продукцию (головной образец<sup>4</sup>) подвергают приемочным испытаниям в соответствии с действующими стандартами или типовыми программами и методиками испытаний, относящимся к данному виду (группе) продукции. При их отсутствии или недостаточной полноте испытания проводят по программе и методике, подготовленной разработчиком и согласованной с заказчиком или одобренной приемочной комиссией.

Опытные партии, а также опытные и головные образцы (в отличие от макетов) изготавливают по рабочей КД.

Для оценки и контроля качества результатов, полученных на определенных этапах ОКР (составной части ОКР), опытные образцы (опытную партию) продукции (головные образцы продукции) подвергают контрольным испытаниям по следующим категориям:

1. Предварительные испытания, проводимые с целью предварительной оценки соответствия опытного образца продукции требованиям ТЗ, а также для определения готовности опытного образца к приемочным испытаниям.

2. Приемочные испытания, проводимые с целью оценки всех определенных ТЗ характеристик продукции, проверки и подтверждения соответствия опытного образца продукции требованиям ТЗ в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации продукции, а также для принятия решений о возможности промышленного производства и реализации продукции.

Предварительные и приемочные испытания проводят по соответствующим программам и методикам, разрабатываемым и утверждаемым в установленном порядке.

Для проведения приемочных испытаний, как правило, назначается комиссия, которая контролирует полноту, достоверность и объективность результатов испытаний, а также полноту информации, соблюдение сроков испытаний и документальное оформление их результатов.

Испытания считают законченными, если их результаты оформлены актом, подтверждающим выполнение программы испытаний и содержащим оценку результатов испытаний с конкретными точными

---

<sup>4</sup> Головными образцами продукции являются объекты разработки, выступающие одновременно в роли первых образцов несерийной и мелкосерийной продукции, реализуемой заказчику на особых условиях поставки.

формулировками, отражающими соответствие испытываемого опытного образца продукции требованиям ТЗ.

Разработчик на основе требований ТЗ и стандартов, касающихся данного вида продукции, с учетом результатов испытаний в установленных случаях разрабатывает проект нормативно-технического документа на конкретную продукцию (технические условия или стандарт) или отражает все требования к качеству продукции в технической документации.

### **Приемка результатов ОКР**

Оценку выполненной разработки и принятие решения о производстве и (или) применении продукции (для единичной продукции) проводит приемочная комиссия, в состав которой входят представители заказчика (основного потребителя), разработчика, изготовителя и Государственной приемки (при ее наличии на предприятии-разработчике). При необходимости к работе комиссии могут быть привлечены эксперты сторонних организаций, а также органы, осуществляющие надзор за безопасностью, охраной здоровья и природы.

Председателем комиссии назначают заказчика, а при его отсутствии – основного потребителя. Состав комиссии формирует и утверждает разработчик.

Разработчик представляет приемочной комиссии ТЗ на выполнение ОКР, проект технических условий или стандарта технических условий (если их разработка предусмотрена), конструкторские и (или) технологические документы, требующие совместного рассмотрения, отчет о патентных исследованиях, другие технические документы и материалы, требуемые по законодательству, подтверждающие соответствие разработанной продукции ТЗ и договору (контракту) и удостоверяющие ее технический уровень и конкурентоспособность. Приемочной комиссии, как правило, представляют также опытные образцы продукции, а если их изготовление не было предусмотрено - головной образец, созданный в рамках выполнения ОКР.

По результатам проведения приемочных испытаний и рассмотрения представленных материалов комиссия составляет акт, в котором указывает:

- 1) соответствие образцов разработанной (изготовленной) продукции заданным в ТЗ требованиям, допустимость ее производства (сдачи потребителю);
- 2) результаты оценки технического уровня и конкурентоспособности продукции, в том числе в патентно-правовом аспекте;
- 3) результаты оценки разработанной технической документации (включая проект ТУ);

4) рекомендации о возможности дальнейшего использования опытных образцов продукции;

5) рекомендации по изготовлению установочной серии и ее объему при выполнении работ по постановке продукции на производство;

6) замечания и предложения по доработке продукции и документации (при необходимости);

7) другие рекомендации, замечания и предложения приемочной комиссии.

Акт приемочной комиссии утверждает ее председатель. Утверждение акта приемочной комиссии означает окончание разработки, прекращение действия технического задания (если оно не распространяется на дальнейшие работы), согласование представленных нормативно-технических и эксплуатационных документов, а также разрешение на производство или использование продукции.

При отрицательной оценке результатов разработки в целом в акте указывают направления дальнейших работ и условия повторного представления результатов или нецелесообразность продолжения работ.

### **Подготовка и освоение производства (постановка на производство) продукции**

Подготовку и освоение производства, которые представляют собой этапы постановки продукции на производство, осуществляют с целью обеспечения готовности производства к изготовлению и выпуску (поставке) вновь разработанной (модернизированной), либо выпускавшейся ранее другим предприятием продукции в заданном объеме, соответствующей требованиям КД.

Основанием для постановки на производство является заключенный с заказчиком договор (контракт) по закупке у поставщика (изготовителя) продукции, изготавливаемой в течение установленного срока.

При отсутствии конкретного заказчика основанием служит решение руководства поставщика под собственный коммерческий риск.

Изготовитель принимает от разработчика продукции:

- комплект КД и ТД литеры «О<sub>1</sub>» или более высокой;
- специальные средства контроля и испытаний;
- опытный образец продукции (при необходимости) в соответствии с условиями использования научно-технической продукции, оговоренными в договоре (контракте) на ОКР;
- документы о согласовании применения комплектующих изделий в соответствии с ГОСТ 2.124;
- заключения по проведенным экспертизам (в том числе метрологической, экологической и др.);

- копию акта приемочных испытаний;
- документы, подтверждающие соответствие разработанной продукции обязательным требованиям.

Работы по подготовке производства на серийном предприятии, как правило, проходят параллельно с проектными работами на предприятии-разработчике. Начинаются они обычно после завершения разработчиком этапа «Эскизный проект».

Объем работ по подготовке производства зависит, главным образом, от количества и сложности новых видов производств и (или) технологических процессов, освоение которых необходимо для выпуска изделий с максимальной эффективностью (по производительности, по себестоимости и т.д.).

Основной объем работ по подготовке производства выполняют технические подразделения серийных заводов – конструкторские и технологические службы (серийные конструкторские бюро – СКБ, службы главного технолога – СГТ или т.п.).

Основными задачами производственных конструкторских служб являются: приемка КД от разработчика и обеспечение документацией подразделений предприятия; принятие решений: а) по изменению КД (по согласованию с разработчиком), б) по доработке заделов (в случае изменения КД), в) о принятии продукции с незначительными отступлениями от требований КД; обеспечение эксплуатационных показателей серийной продукции; проведение испытаний; разработка оригинальных конструкций и узлов и др.

Основные задачи технологических служб – технологическая подготовка производства (ТПП), регламентируемая ЕСТПП. Основные функции ТПП: обеспечение технологичности конструкции изделия; разработка технологических процессов; проектирование и изготовление средств технологического оснащения; организация и управление процессом ТПП. Дополнительные функции: конструкторско-технологический анализ изделия; организационно-технический анализ производства; определение материальных и трудовых нормативов.

*Обеспечение технологичности конструкции изделия* предусматривает отработку конструкции изделия на технологичность на всех стадиях разработки КД и в процессе ТПП с точки зрения экономичности и простоты изготовления.

*Разработка технологических процессов* – обеспечение производства технологическими процессами и управляющими программами.

*Проектирование и изготовление средств технологического оснащения* – решение комплекса задач по обеспечению производства: технологическим оборудованием и технологической оснасткой;

средствами механизации и автоматизации; средствами контроля и испытаний.

*Организация и управление процессом ТПП* предусматривает рациональную последовательность работ по управлению процессом ТПП, включает в себя планирование и распределение работ по ТПП между подразделениями предприятия, учет, контроль и регулирование.

*Конструкторско - технологический анализ изделия* предполагает решение комплекса задач по расчету применимости деталей и сборочных единиц (ДСЕ) в изделии, анализу состава нового изделия, разработке межцеховых маршрутов его изготовления.

*Организационно-технический анализ производства* предусматривает изучение технических возможностей производства и его готовности к выпуску изделия с заданными технико-экономическими характеристиками. В рамках этой функции должны быть решены следующие задачи: проведение расчета необходимых производственных мощностей и сопоставление с реальными мощностями существующего производства; разработка при необходимости производственно-технологических планировок; создание специализированных участков и др.

*Определение материальных и трудовых нормативов* – расчет норм расхода материалов на изделие; расчет трудоемкостей изготовления ДСЕ изделия по видам техпроцессов, профессиям и т. д.; разработка мероприятий по снижению трудоемкости изделия.

Подготовку производства считают законченной, когда изготовителем продукции получена вся необходимая документация, разработанная (отработана) ТД на изготовление продукции, опробованы и отлажены средства технологического оснащения и технологические процессы, подготовлен персонал, занятый при изготовлении, испытаниях и контроле продукции, и установлена готовность к освоению производства продукции.

На этапе освоения производства выполняют:

- изготовление установленного договором (контрактом) либо иным документом количества единиц продукции установочной серии (первой промышленной партии) в соответствии с требованиями КД (литеры «О<sub>1</sub>» или более высокой), доработку разработанного технологического процесса для производства продукции по ТД (литеры «О<sub>1</sub>» или более высокой);
- квалификационные испытания;
- дальнейшую отработку (при необходимости) конструкции на технологичность;
- утверждение КД и ТД с присвоением литеры «А».

С целью демонстрации готовности предприятия к выпуску продукции, отвечающей требованиям КД, проверки разработанного технологического процесса, обеспечивающего стабильность характеристик продукции, а также для оценки готовности предприятия к выпуску продукции в количестве, определяемом договором (контрактом), проводят квалификационные испытания.

Квалификационные испытания проводят по программе, разработанной изготовителем с участием разработчика продукции и согласованной с заказчиком (при его наличии). В программе указывают:

- количество единиц продукции, подвергаемых испытаниям и проверкам исходя из их сложности, стоимости, надежности и других факторов, необходимых для достоверных оценок;
- все виды испытаний, соответствующих периодическим испытаниям, указанным в ТУ, а также другие испытания и проверки, позволяющие достигнуть цели квалификационных испытаний;
- место проведения испытаний.

Организует и обеспечивает проведение квалификационных испытаний изготовитель (поставщик) продукции. Квалификационные испытания проводит комиссия, в состав которой входят представители изготовителя, разработчика продукции, разработчиков и поставщиков комплектующих изделий и, при необходимости, органов государственного надзора и других заинтересованных сторон (например, страховых организаций, общественных организаций по защите прав потребителей и др.). Результаты квалификационных испытаний считают положительными, если продукция (установочная серия) выдержала испытания по всем пунктам программы, положительно оценена технологическая оснащенность производства и стабильность технологического процесса изготовления для возможности выпуска в заданных объемах продукции, соответствующей КД, а также ТД.

Положительные результаты оформляют актом, в котором указывают:

- соответствие продукции обязательным требованиям и КД, результаты рассмотрения представленных комиссии материалов, результаты выборочного контроля технологического процесса изготовления (сборки) продукции (деталей, сборочных единиц) на рабочих местах;
- оценку готовности изготовителя к производству серийной продукции для реализации договора (контракта) и готовности КД, ТД к утверждению в установленном порядке с присвоением литеры «А».

При положительных результатах квалификационных испытаний освоение производства считается законченным. Далее заводы приступают к серийному выпуску и поставке продукции потребителю. В процессе эксплуатации могут выявляться дополнительные конструк-

торские или технологические ошибки и недоработки, которые фиксируются протоколами. По ним принимают решения с внесением соответствующих изменений в КД или ТД. Со временем конструкция морально и (или) физически устаревает и весь цикл повторяется заново.

## **2.3. Основы проектирования ЭС**

### **Задачи и этапы проектирования**

По степени новизны проектируемой системы различают следующие типичные задачи проектирования:

*частичная модернизация* существующей системы – изменение ее параметров (а иногда и структуры), вызывающее сравнительно небольшое улучшение одного или нескольких показателей качества;

*существенная модернизация* – изменение параметров и структуры системы, вызывающее значительное улучшение одного или нескольких основных показателей качества;

*создание новой системы*, основанной на новых принципах действия или предназначенной для решения новых задач.

Различают два подхода к проектированию ЭС (как системы): «снизу вверх» (восходящее проектирование) и «сверху вниз» (нисходящее проектирование).

В первом случае проектирование начинается с подсистем, решающих главные задачи по преобразованию информации. В качестве такой подсистемы обычно рассматривают подсистему ФЭ (электрическую принципиальную схему). Проектирование остальных подсистем и системы в целом ведется начиная с модулей, находящихся в нижней части «иерархического дерева».

При нисходящем проектировании система строится путем перехода от наиболее общих абстрактных представлений к реализации аппаратного и программного обеспечения (т.е. решение задач более высоких иерархических уровней предшествует решению задач нижних уровней). В таких случаях пытаются установить самые общие принципы построения системы, а далее начинают заниматься их реализацией, развивая эти принципы в ходе разработки и связывая их с другими принципами и подходами.

При каждом из рассмотренных подходов приходится неоднократно возвращаться назад (например, если окажется, что полученные экономические и конструктивно-технологические показатели системы не обеспечивают выполнения поставленных перед нею задач), корректируя предыдущие решения, т.е. применяют рациональное сочетание методов как «снизу вверх», так и «сверху вниз» до получения нужного решения последовательным приближением. Поэтому про-



цесс проектирования является не только многоэтапным, но и многократно корректируемым по мере его выполнения.

Проектирование электронных систем по принципу «снизу вверх» в большей степени применялось на ранних стадиях развития электронной техники. Каждое новое устройство, как правило, было оригинальным и строилось на универсальных дискретных компонентах (резисторах, транзисторах и т.д.). Развитие микроэлектроники (освоение ИС, БИС, СБИС), появление типовых архитектурных решений для ЭС различных типов, а также ужесточение требований к срокам и стоимости их проектирования и изготовления, привели к тому, что основным в настоящее время считается нисходящее проектирование. Поэтому дальнейшее рассмотрение в большей степени относится к этому принципу.

С точки зрения решаемых задач иногда выделяют *внешнее* и *внутреннее* проектирование. *Внешнее* проектирование включает в себя определение технических и других требований к разрабатываемой системе. *Внутреннее* проектирование определяет технико-экономические способы реализации этих требований и состоит из следующих этапов:

- системное (или архитектурное) проектирование;
- схемотехническое (или логическое) проектирование;
- конструкторское (или техническое) проектирование.

*Системное проектирование* включает в себя выбор архитектуры проектируемой системы (совокупности составных частей, устройств, блоков, их входов и выходов, связей между блоками), а также проверку правильности взаимодействия выбранных блоков между собой и с внешней средой в различных режимах работы ЭС. Критерии оптимальности архитектуры электронной системы могут быть весьма разными и зависят от ее типа и области применения ЭС (ЭВМ, радиолокационные системы и т.д.).

*Логическое проектирование* предусматривает разработку схем системы в целом и ее составных частей (устройств, блоков и т.д.), с той или иной степенью подробности описывающих их структуру. При этом выбирают элементную базу и оптимизируют структуру и параметры подсистем. Конечным результатом логического проектирования является разработка функциональных, электрических принципиальных и др. схем. Одними из задач этого этапа являются также обоснование методики проведения испытаний, выбор состава измерительных средств и разработка нестандартной контрольно-измерительной аппаратуры.

При техническом проектировании (конструировании) выбирается структура пространственных, энергетических и временных взаимосвязей частей конструкции, связей с окружающей средой и объекта-

ми, производится компоновка функциональных элементов в модули, их размещение в несущих конструкциях, трассировка печатных плат, определяются материалы и виды обработки, устанавливаются количественные нормы (для связей, материалов и обработок), по которым можно изготовить изделие, соответствующее заданным требованиям. Взаимосвязи в конструкциях ЭС могут иметь различную природу, чаще всего электрическую, оптическую, тепловую и механическую.

Конечным итогом процесса проектирования является комплект КД, отображающий всю совокупность задаваемых норм на вновь разрабатываемое изделие.

## **Методы проектирования**

В процессе проектирования используются математические, экспериментальные и эвристические методы.

*Математические* методы лежат в основе решения задач анализа (математическое моделирование) и синтеза (автоматизированное проектирование электронных структур). Математическое моделирование применяют в основном на системотехническом уровне, а автоматизированное проектирование – при проектировании и разработке технологии изготовления, в меньшей степени – на схемотехническом уровне (главным образом для разработки интегральных микросхем, цифровых и СВЧ-устройств) и в еще меньшей – на системотехническом уровне.

Математические методы, включая расчеты на ЭВМ, математическое моделирование и автоматизированное проектирование, являются весьма мощным инструментом проектирования. Однако они предполагают наличие вполне определенного математического описания, которое, во-первых, требует экспериментальной проверки и, во-вторых, существует далеко не на всех этапах проектирования. Для выбора и обоснования математического описания, а также для решения ряда других важных задач проектирования требуется эвристическая деятельность коллектива разработчиков, т. е. творческая деятельность, не поддающаяся математической формализации. Таким образом, математические исследования должны дополняться экспериментальными исследованиями и эвристической деятельностью разработчиков.

Различают следующие основные виды *экспериментальных* исследований: полунатурное моделирование, лабораторные исследования, полевые испытания, летные испытания, пробные пуски, испытания в эксплуатации.

Для ракетных и космических ЭС применяют все вышеназванные виды исследований и испытаний, для аппаратуры другого назначения некоторые виды испытаний могут отсутствовать.

Полунатурное моделирование отличается от математического, лишь тем, что часть звеньев включают в состав модели в виде натуральных макетов, а не моделируют на ЭВМ. Под лабораторными исследованиями понимают исследования натуральных макетов, проводимые в лабораториях, причем обычно реальные источники внешних воздействий заменяют имитаторами. Сказанное означает, что как полунатурное моделирование, так и лабораторные исследования являются не чисто экспериментальными, а экспериментально-теоретическими.

Полевые и летные испытания более приближены к реальным условиям эксплуатации. Полностью экспериментальными можно считать лишь испытания, проводимые в процессе эксплуатации (при пробных пусках).

*Эвристический подход* в процессе проектирования применяется при решении следующих задач:

- выбор и формулировка цели проектирования;
- выбор физических принципов действия системы;
- обоснование математических моделей системы, полезных и мешающих воздействий;
- выбор методов математического и экспериментального исследования;
- выбор элементной базы (при отсутствии жестких ограничений);
- трактовка результатов исследования и принятие окончательных решений.

Эвристическая деятельность опирается на имеющийся опыт в разработке подобных систем или решений подобных задач и на результаты теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в процессе проектирования. Основой повышения эффективности эвристических решений является системный подход к проектированию.

### **Системный подход к проектированию ЭС**

Оптимальное решение задачи проектирования возможно лишь на основе всестороннего, целостного рассмотрения проектируемой системы и ее развития (изменения) в процессе взаимодействия с окружающей средой. Системный подход предполагает общую оптимизацию процессов проектирования, изготовления, эксплуатации и утилизации, отдельные составные части которых могут и не быть оп-

тимальными. В основе системного подхода к проектированию ЭС лежат следующие основные положения (принципы):

1. *Учет всех этапов жизненного цикла разрабатываемой системы.*

2. *Учет истории и особенно перспектив развития систем данного и близких классов.* Разрабатываемая система не должна быстро морально состариться.

3. *Всестороннее рассмотрение взаимодействия системы с внешней средой.* Основными видами такого взаимодействия являются:

– взаимодействие с природой и обществом в целом (учет экологических, экономических, социальных, политических, военных и других факторов);

– обмен полезной информацией – получение (извлечение) и выдача ее;

– обмен энергией и веществом;

– внешние воздействия на систему (изменение температуры, влажности, давления, механические нагрузки, радиация, помехи и т. д.);

– взаимодействие с другими системами (входящими в общую систему более высокого иерархического уровня) в процессе решения общей задачи.

4. *Учет основных видов взаимодействия внутри системы (между ее частями):* функционального, конструктивного, динамического, информационного, энергетического и др.

5. *Учет взаимодействия между элементной базой и системотехникой.* Развитие элементной базы вызывает развитие системотехники (появление новых принципов построения систем и улучшение их показателей качества), в свою очередь, развитие системотехники предъявляет новые требования к элементной базе и стимулирует ее развитие.

6. *Учет возможности изменения исходных данных и даже решаемой задачи в процессе проектирования, производства и эксплуатации системы.* Отсюда вытекает необходимость:

– вариации исходных данных (включая критерий качества) в процессе проектирования для оценки степени их критичности и получения более надежных результатов проектирования;

– обеспечения возможно большей универсальности применения проектируемой системы, чтобы при изъятии или добавления некоторых блоков система была пригодной для решения новых (других) задач.

7. *Выделение главных показателей качества, подлежащих улучшению в первую очередь.* Стремление улучшить возможно

большее число показателей качества (особенно на ранних этапах проектирования) может привести к потере лучшего решения, не говоря уже об излишнем увеличении длительности проектирования. В большинстве практических задач к главным относят показатели точности, надежности, вычислительные и другие мощности, пропускную способность, устойчивость к внешним воздействиям, массу (объем) и стоимость.

8. *Сочетание принципов композиции, декомпозиции и иерархичности.* Сложные электронные системы могут содержать десятки тысяч или даже миллионы элементов. Очевидно, что невозможно, даже с помощью самых совершенных ЭВМ, найти оптимальный (единственный) вариант построения системы. На практике обычно рассматривается несколько вариантов, удовлетворяющих требованиям ТЗ, и среди них отбирается наилучший.

*Композиция* элементов заключается в их объединении в более простые составные части (узлы, блоки, устройства, подсистемы). Такие составные части легче подвергаются оптимизации, в результате чего появляются типовые унифицированные модули (ИС, БИС, модули памяти, блоки питания, устройства отображения, ввода – вывода информации и т.д.). Сложную электронную систему обычно не удастся представить в виде единого модуля (т.е. сначала создать для нее общую электрическую принципиальную схему, как это предполагается при восходящем проектировании). Поэтому систему разбивают на ряд подсистем, т.е. выполняют *декомпозицию*. Входящие устройств (подсистемы) могут быть покупными, либо их разработка может быть поручена специализированным предприятиям. В результате композиции и декомпозиции систему разбивают на ряд *иерархических* уровней, каждый из которых может содержать ряд частей (подсистем, устройств, блоков и т. д.) желательно в виде типовых унифицированных модулей. Нередки ситуации, когда среди освоенных таких модулей не оказывается, а узлы, собранные из имеющихся, не удовлетворяют по массогабаритным или иным характеристикам. В этих случаях обычно принимается решение о собственной разработке модулей с необходимыми параметрами, либо их разработку также поручают смежным предприятиям по отдельным ТЗ.

Сочетание композиции, декомпозиции и иерархичности позволяет существенно упростить не только проектирование системы, но и ее производство, эксплуатацию и утилизацию. Однако при разбивке системы на подсистемы (устройства, блоки) необходимо формулировать исходные данные для проектирования каждой подсистемы так, чтобы они достаточно полно и правильно учитывали все основные виды взаимодействия между подсистемами в процессе выполнения системой поставленной перед нею задачи. Особое внимание при этом

следует уделять обоснованию критерия качества каждой подсистемы. В противном случае подсистема, оптимальная в смысле ее критерия качества, может оказаться далеко не оптимальной или вообще непригодной с точки зрения критерия качества системы в целом.

*9. Вскрытие основных технических противоречий, препятствующих улучшению качества системы и ускорению процесса ее разработки, а также отыскивание приемов их преодоления. Правильное сочетание различных методов проектирования, в первую очередь математических, эвристических и экспериментальных*

*10. Обеспечение в процессе проектирования должного взаимодействия специалистов различных уровней и профилей.*

## **2.4. Понятие о CALS-технологии**

В ходе проектирования, производства, эксплуатации, технического обслуживания и утилизации изделий формируется различная информация. На каждой стадии ЖЦ создается свой набор данных, который используется на последующих стадиях. Например, данные о конструкции изделия используются для технологической подготовки производства, планирования потребностей в материальных ресурсах, закупок, производственного планирования, процессов изготовления, испытаний, продаж, поддержки процессов эксплуатации и т. д. Эти же данные также могут быть использованы для создания новых или модернизации действующих изделий. Чтобы обеспечить эффективное использование данных, необходимо собрать всю информацию об изделии в интегрированной базе данных и обеспечить совместное использование этой информации в процессах проектирования. Класс информационных технологий, направленных на обеспечение безбумажной непрерывной информационной поддержки ЖЦ продукта, называют CALS-технологиями (Computer Acquisition and Life-cycle Support). Целью применения CALS-технологий как инструмента организации и информационной поддержки всех участников создания, производства и пользования продуктом, является повышение эффективности их деятельности за счет ускорения процессов исследования и разработки продукции, придания изделию новых свойств, сокращения издержек в процессах производства и эксплуатации продукции, повышения уровня сервиса в процессах ее эксплуатации и технического обслуживания.

Русскоязычный термин, адекватно отражающий суть подхода CALS, – компьютерное сопровождение процессов жизненного цикла изделий (КСПИ). Можно выделить три основных аспекта данной концепции:

- компьютерная автоматизация, повышающая производительность основных процессов и операций создания информации;

- информационная интеграция процессов, т.е. совместное и многократное использование одних и тех же данных. Интеграция достигается минимизацией числа и сложности вспомогательных процессов и операций поиска, преобразования и передачи информации. Один из инструментов интеграции – стандартизация способов и технологий представления данных, благодаря которой результаты предшествующего процесса могут быть использованы в последующих процессах с минимальными преобразованиями;

- переход к безбумажной модели организации бизнес-процессов (БП), многократно ускоряющей доставку документов, обеспечивающей параллелизм обсуждения, контроля и утверждения результатов работы, сокращающей длительность БП. В этом случае ключевое значение приобретает электронно-цифровая подпись (ЭЦП).

Применение технологий КСПИ возможно при выполнении следующих условий:

- наличие современной инфраструктуры передачи данных;
- введение понятия электронного документа как полноценного объекта производственно-хозяйственной деятельности и обеспечение его легитимности;

- наличие средств и технологий ЭЦП и защиты данных;
- реформирование БП с учетом новых возможностей информационных технологий;

- создание системы стандартов, дополняющих или заменяющих традиционные ЕСКД, ЕСТД, ЕСПД, СРПП и т.п.;

- наличие на рынке программных средств и компьютерных систем, соответствующих требованиям стандартов.

В составе КСПИ можно выделить два крупных блока – компьютеризированное интегрированное производство и система логистической поддержки изделия.

К первому относятся:

- системы автоматизированного проектирования, инженерного анализа и расчетов, а также технологической подготовки производства;

- системы автоматизированной разработки эксплуатационной документации;

- системы управления данными об изделиях;

- системы управления проектами и программами;

- автоматизированные системы управления производственно-хозяйственной деятельности предприятия.

Система интегрированной логистической поддержки (ИЛП) изделия, предназначенная для информационного сопровождения БП на

постпроизводственных стадиях ЖЦ – относительно новый элемент производственной и управленческой структуры для предприятий России. ИЛП представляет собой совокупность процессов, организационно-технических мероприятий и регламентов, осуществляемых на всех стадиях жизненного цикла изделия от его разработки до утилизации. Цель внедрения ИЛП – сокращение «затрат на владение изделием», которые для сложного наукоемкого изделия равны или превышают затраты на его закупку.

Типовой перечень задач ИЛП включает в себя:

- логистический анализ на стадии проектирования, предусматривающий определение требований к готовности изделия; определение затрат и ресурсов, необходимых для поддержания изделия в нужном состоянии; создание баз данных для отслеживания перечисленных параметров в ходе жизненного цикла изделия;

- создание электронной технической документации для закупки, поставки, ввода в действие, эксплуатации, обслуживания и ремонта изделия;

- создание и ведение «электронных досье» на эксплуатируемые изделия, с целью накопления и использования фактических данных для оперативного определения реального объема работ по обслуживанию и потребности в материальных ресурсах;

- применение стандартизованных процессов поставки изделий и средств материально-технического обеспечения, создание компьютерных систем информационной поддержки этих процессов – применение стандартизованных решений по кодификации изделий и предметов снабжения. В условиях России эта задача имеет более широкий смысл и трактуется как задача каталогизации – создание федерального реестра предметов снабжения, поставляемых для государственных нужд. В ходе каталогизации получают коды, используемые для их идентификации в процессах материально-технического снабжения;

- создание и применение компьютерных систем планирования потребностей в средствах материально-технического обеспечения, формирования заявок и управления контрактами на поставку средств материально-технического обеспечения.

Развитие КСПИ обусловило появление новой организационной формы выполнения масштабных наукоемких проектов, связанных с разработкой, производством и эксплуатацией сложной продукции - так называемого «виртуального предприятия» (ВП). ВП создается посредством объединения на контрактной основе предприятий и организаций, участвующих в ЖЦ продукции и связанных общими БП. Информационное взаимодействие участников ВП осуществляется на основе общих хранилищ данных через общую корпоративную или глобальную сеть (Интернет). Срок жизни ВП определяется длительностью проекта



или жизненного цикла продукции. Задача информационного взаимодействия особенно актуальна для временно создаваемых ВП, состоящих из географически удаленных друг от друга подрядчиков, субподрядчиков, поставщиков с разнородными компьютерными платформами и программными решениями.

Информацию, используемую в ходе ЖЦ, можно условно разделить на три класса: о продукции, о выполняемых процессах и о среде, в которой эти процессы выполняются. На каждой стадии создается набор данных, который используется на последующих стадиях.

Данные об изделии занимают значительную часть общего объема информации, используемой в ходе ЖЦ. На их основе решаются задачи производства, материально-технического снабжения, сбыта, эксплуатации, ремонта и др. Информационная интеграция этих процессов и совместное использование данных обеспечиваются применением соответствующих стандартов. Представление конструкторско-технологических данных об изделии регламентируется стандартами, например серией ГОСТ Р ИСО 10303, представляющей собой аутентичный перевод некоторых стандартов ISO 10303.

В соответствии с ISO 10303 электронная конструкторская модель изделия включает ряд компонентов.

1. Геометрические данные (твердотельные поверхности с топологией, фасеточные поверхности, сетчатые поверхности с топологией и без топологии, чертежи и т.п.).

2. Информация о конфигурации изделия и административные данные (идентификаторы страны, отрасли, предприятия, проекта, классификационные признаки и т.п.; данные о вариантах состава и структуры изделия; данные об изменениях конструкции и информацию о документировании этих изменений; данные для контроля различных аспектов проекта или решения вопросов, связанных с особенностями и вариантами состава и конфигурации изделия; данные о контрактах, в соответствии с которыми ведется проектирование; сведения о секретности; условия обработки, в том числе финишной, данные о применимости материалов, указанные проектировщиком для данного изделия; данные для контроля и учета выпущенной версии разработки; идентификаторы поставщиков и их квалификации).

3. Инженерные данные в неструктурированной форме, подготовленные с помощью различных программных систем в различных форматах.

Согласно требованиям стандартов, эксплуатационная и ремонтная документация создается в форме интерактивных электронных технических руководств, интегрирующих данные и программные средства поддержки обслуживания, планирования потребностей в матери-

альных ресурсах, контроля и диагностики, накопления данных о ходе эксплуатации.

Использование CALS-технологий (рис. 2.3) позволяет предприятию-производителю наукоемкой продукции усовершенствовать процессы в ходе жизненного цикла, снизить сроки выпуска продукции на рынок; заказчику – сократить стоимость заказа и дальнейшей его эксплуатации, учитывая, что стоимость поддержки наукоемкого изделия в работоспособном состоянии часто равна или превышает стоимость его приобретения.



Рис. 2.3. Применение CALS-технологий

Кроме того, создаются условия для оперативной перестройки процессов проектирования и изготовления продукции под требования конкретных групп потребителей.

### 3. ЗАЩИТА ЭС ОТ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

#### 3.1. Защита ЭС от механических воздействий

Механические воздействия представляют серьезную опасность, главным образом, для транспортируемых ЭС. По степени стойкости к механическим воздействиям ЭС подразделяют на *вибро-* и (или) *ударопрочные* и *вибро-* и (или) *ударостойкие*. В первом случае ЭС должны выдерживать механические воздействия (в заданном диапазоне частот и ускорений) в неработающем (выключенном) состоянии, а после включения – нормально работать. Во втором случае ЭС должны исправно функционировать при тех или иных заданных механических воздействиях. Считается, что из всех видов механических воздействий вибрации чаще других являются причиной отказов транспортируемых ЭС. Поэтому для таких ЭС проводят анализ устойчивости конструкции к действию вибрационных нагрузок, характеристики которых указаны в ТЗ. В основе такого анализа лежит представление конструкции ЭС в виде колебательной системы. Сущность такого подхода рассмотрим на примере воздействия вибраций на плату, закрепленную с двух сторон (рис. 3.1).

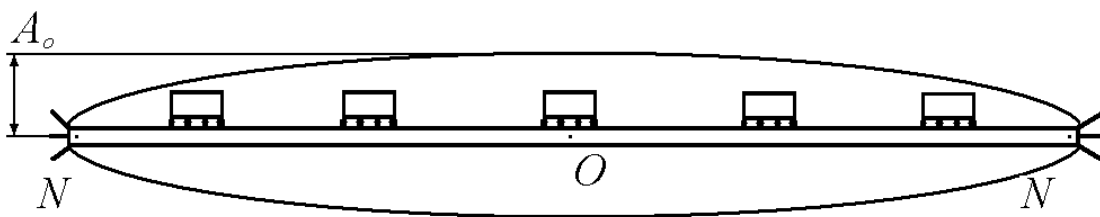


Рис. 3.1. Колебания платы под воздействием вибраций

Под действием распределенной массы  $m$  точка  $O$  отклонится от горизонтали на величину  $Z_{CT} = mg/k$ , где  $k$  – жесткость платы.

Если кратковременно воздействовать на точку  $O$  (например, опустить ее вниз), то под действием инерционных и упругих сил возникнет колебательное движение, совершаемое без воздействия внешних сил. Такие колебания называются свободными (собственными) и характеризуются частотой (без учета демпфирования):

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}.$$

Вследствие демпфирования (т.е. поглощения механических колебаний за счет трения волокон в материале платы) колебания будут

затухающими. Эквивалентная схема колебательной системы, состоящая из инерционного элемента массой  $m$ , спиральной пружины жесткостью  $k$  и демпфера с коэффициентом демпфирования  $r$ , приведена на рис. 3.2. Для простоты будем считать, что вибрации воздействуют на плату от внешнего источника через узлы крепления в направлении оси  $Z$ .

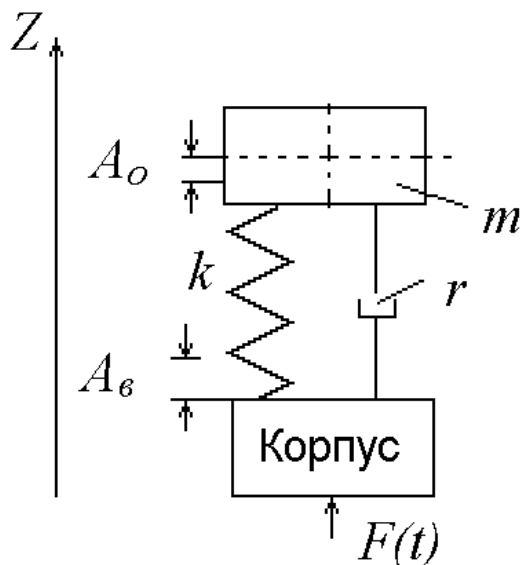


Рис. 3.2. Схема простой колебательной системы с одной степенью свободы

на плату от внешнего источника через узлы крепления в направлении оси  $Z$ . Амплитуду внешних воздействий обозначим как  $A_B$ , а частоту –  $\omega_B$ .

В системе с одной степенью свободы внешней силе  $F(t)$  в каждый момент времени будут противодействовать силы инерции массы  $F_m$ , жесткости  $F_k$  и демпфирования  $F_r$ :

$$F(t) = F_m + F_r + F_k, \quad (3.1)$$

$$F_m = m \frac{d^2 z}{dt^2}, \quad F_r = r \frac{dz}{dt}, \quad F_k = k z.$$

Внешнюю силу обычно представляют как  $F(t) = F_0 \sin \omega_B t$ .

В установившемся режиме под воздействием внешней гармонической силы все точки конструкции совершают в направлении оси  $Z$  вынужденные колебания с частотой внешних воздействий –  $\omega_B$ . Для определения амплитуды точки  $O$  ( $A_0$ ) при вынужденных колебаниях необходимо решить уравнение (3.1). На рис. 3.3 приведены примерные решения уравнения (3.1) в виде графиков, показывающих зависимость отношения амплитуд  $A_0/A_B$  и отношения частот  $\omega_B/\omega_0$  при различных значениях коэффициента относительного затухания  $D$ , определяемого как

$$D = \frac{r}{2\sqrt{mk}}.$$

Из графиков следует, что при  $\omega_B \approx \omega_0$  амплитуда  $A_0$  может во много раз превышать  $A_B$ . Это явление называют механическим резонансом. Чрезмерное возрастание амплитуды  $A_0$  может привести к отрыву навесных компонентов, соударению соседних плат и другим дефектам.

Как следует из графиков, уменьшить амплитуду  $A_0$  можно

следующими путями:

- уменьшить  $\omega_0$ ;
- уменьшить  $A_B$ ;
- увеличить  $\omega_0$ ;
- увеличить  $D$ .

Первый путь обычно малоприменим, так как ведет к снижению жесткости платы, а остальные три широко используются.

Если между источником вибраций и ЭС установить виброизоляторы (прежнее название – амортизаторы), то можно аналогичные графики построить для определения амплитуды опорных точек  $N$  (при условии жесткости корпуса). Из графиков следует, что если выбрать виброизоляторы с собственной частотой, много меньшей  $\omega_B$ , то амплитуда колебаний точки  $N$  будет меньше  $A_B$ . Применяемые схемы установки ЭС на виброизоляторы показаны на рис. 3.4.

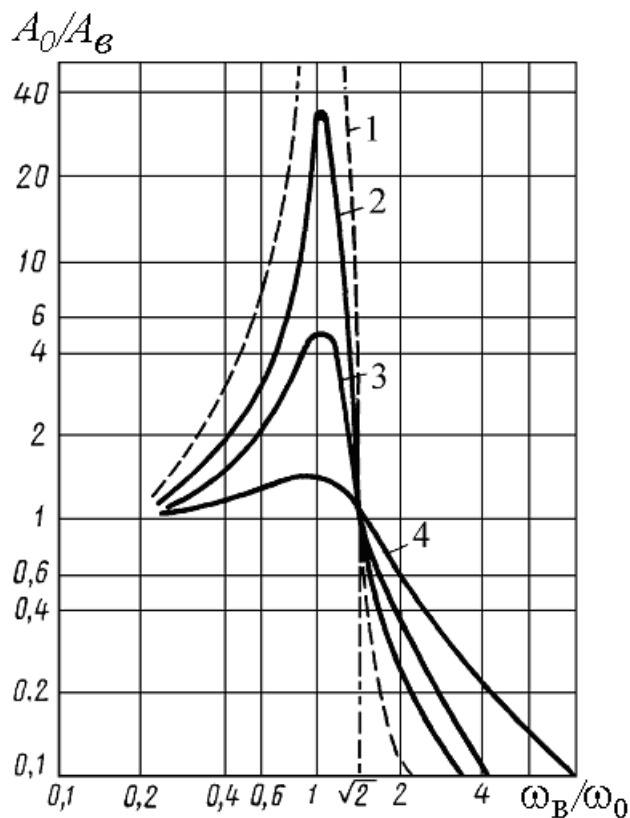


Рис. 3.3. Графики зависимости отношений  $A_0/A_B$  и  $\omega_B/\omega_0$  при различных значениях  $D$ :  $D = 0$  (1);  $D = 0,01$  (2);  $D = 0,1$  (3);  $D = 0,5$  (4)

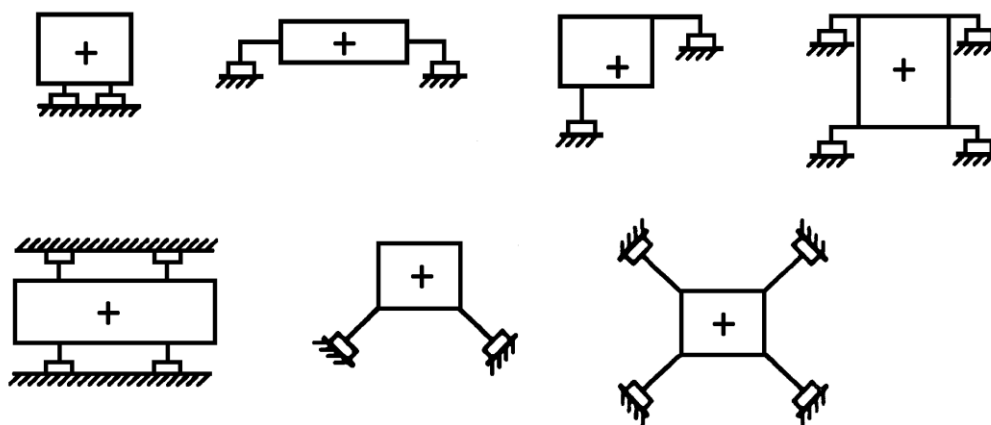


Рис. 3.4. Схемы установки ЭС на виброизоляторы

Увеличение  $\omega_0$  добиваются повышением жесткости конструкций (изменением материала, увеличением толщины, введением ребер жесткости и т.д.).

Методы, направленные на преимущественное увеличение показателя  $D$  (без существенного изменения жесткости), называют демпфированием. Примеры демпфирования приведены на рис. 3.5 и 3.6.

В качестве демпфирующих материалов обычно используют полимеры, способные рассеивать большое количество энергии при растяжении, изгибе или сдвиге за счет упругих свойств.

Каждый из рассмотренных способов имеет свои относительные достоинства и недостатки. Так, например, виброизоляторы обычно

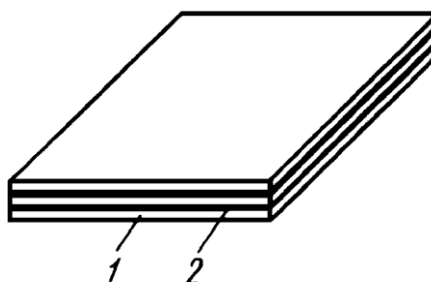
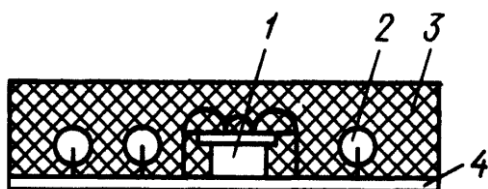


Рис. 3.5. Заливка вибропоглощающим пенополиуретаном:  
1,2 – ЭРЭ; 3 – пенополиуретан;  
4 – плата

Рис. 3.6. Демпфирование плат:  
1 – конструкционный материал;  
2 – вибропоглощающий материал

имеют одну степень свободы, их применение может отрицательно сказываться на массогабаритных характеристиках, заливка – ухудшает теплоотвод от залитых элементов, усложняет ремонт, свойства многих полимеров зависят от температуры, радиации и т.д.

В общем случае колебательная система обладает не одной (как было рассмотрено), а шестью степенями свободы (три для линейных перемещений и три – для угловых). Тогда уравнение (3.1) примет вид:

$$M(t) = M_m + M_r + M_k,$$

где  $M_m$  – матрица коэффициентов инерции (масс);  $M_r$  – матрица коэффициентов демпфирования;  $M_k$  – матрица сил упругости;  $M(t)$  -  $n$ -мерный вектор-столбец обобщенных возмущающих сил.

Для защиты от ударных воздействий могут также применяться амортизаторы. Но, в отличие от вибрационных нагрузок, в этом случае преимущественно применяют высокочастотные амортизаторы. Основной способ защиты от ударов, как и от линейных ускорений – повышение прочности конструкции.

### 3.2. Обеспечение заданного теплового режима

В процессе эксплуатации элементы ЭС могут подвергаться воздействию температур неоптимальных для их функционирования. Наи-

более критичны к колебаниям температуры ФЭ, для большинства которых оптимальной считается температура  $+20\dots+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Предельно допустимые температурные границы для каждого ФЭ приводятся в соответствующих ТУ (например:  $+1\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $-10\dots+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $-60\dots+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  и т.д.). При этом следует учитывать, что изменение температуры относительно оптимальной на каждые  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в любую сторону уменьшает срок службы ФЭ приблизительно в 2 раза.

Диапазоны изменения температуры внутри объектов, где эксплуатируются ЭС, могут быть: в отапливаемых помещениях  $+5\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; на наземных подвижных объектах  $-60\dots+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; на самолетах  $-70\dots+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Тепловой режим ЭС характеризуется совокупностью температур отдельных его точек (рис. 3.7).

В зависимости от стабильности во времени тепловой режим может быть стационарным и нестационарным. Стационарный режим обусловлен термодинамическим равновесием между источниками и поглотителями тепловой энергии.

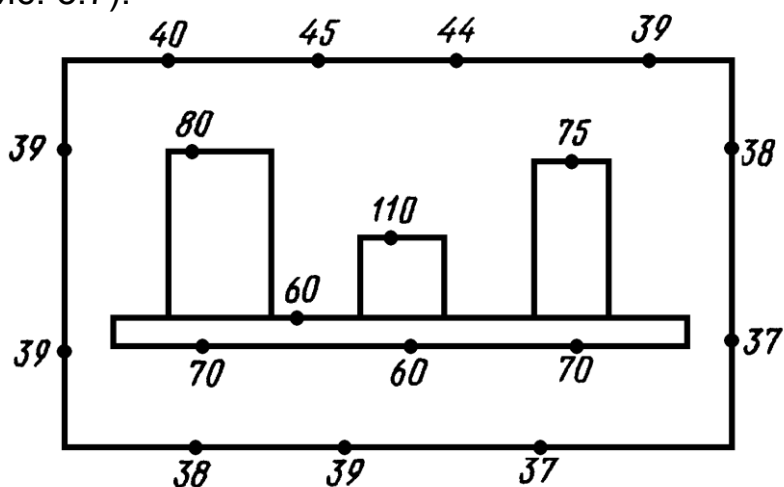


Рис. 3.7. Температурное поле ЭС

При различии температуры элемента и окружающей среды между ними происходит теплообмен. Передача тепла осуществляется за счет взаимодействия частиц (атомов, молекул и т.д.) или за счет излучения электромагнитных волн. Теплообмен между твердыми телами называют теплопроводностью (или кондукцией), а между твердым телом и жидкой (или газообразной) фазой – конвекцией (т.е. с механическим перемещением нагретых частиц).

Для поддержания оптимальных температур теплового режима ЭС используются системы обеспечения теплового режима (СОТР), каждая из которых характеризуется особенностями структуры, интенсивностью теплоотвода, техническими показателями (массой, габаритами, потребляемой мощностью, стоимостью, надежностью и т. д.). СОТР различают:

*По принципу действия* – отвод тепла, подвод тепла и термостабилизирование (поддержание температуры в узком диапазоне пассивными или активными методами).

*По способу передачи тепла (теплообмена)* – кондукцией, конвекцией (газом или жидкостью) и излучением.

*По способу поглощения тепла* – при фазовых переходах (испарение жидкости, плавление твердого тела), термоэлектрический эффект, используя термоаккумулирующие свойства несущих конструкций и окружающей среды.

*По типу теплоносителя* – твердое тело, жидкость, газ, вакуум.

*По степени использования теплоносителя* – замкнутая система, разомкнутая система.

*По количеству объектов* – локального (т.е. обеспечивается благоприятный температурный режим отдельных элементов или частей ЭС) и общего действия.

По оценкам специалистов, в ЭС до 90% подводимой мощности выделяется в виде тепла. Поэтому чаще всего конструктору ЭС приходится решать задачу отвода тепла. Напряженность теплового режима ЭС обычно выражают в виде теплового потока с единицы площади ( $P$ , например, 5 Вт/см<sup>2</sup>). В зависимости от этой величины выбирается тот или иной способ отвода тепла.

Передача тепла для всех видов теплообмена в статическом режиме выражается общей зависимостью

$$P = k S \Delta t, \quad (3.2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $S$  – площадь, через которую проходит тепловой поток, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – разность температур между охлаждаемым элементом и окружающей средой, °С.

### **Теплоотвод кондукцией**

При расчете кондуктивного теплообмена (теплопроводности) часто пользуются методом электротепловой аналогии, т.к. процессы передачи тепла и тока физически аналогичны. Тепловой поток ( $P_m$ ) принимается за аналог тока ( $I$ ), разность температур ( $\Delta t$ ) между охлаждаемым элементом и окружающей средой аналогична разности потенциалов  $\Delta U$  между соответствующими точками, а тепловое сопротивление ( $R_m$ ) – сопротивлению электрической цепи ( $R$ ). В этом случае выражение (3.2) представляют в виде  $P_m = k_m S \Delta t$  (где  $k_m$  – тепловая проводимость, Вт/(м<sup>2</sup> · °С)). Выражая

$$k_m = a_m / L \quad \text{и} \quad R_m = L / (a_m S),$$

где  $a_m$  – коэффициент теплопроводности материала (табл. 3.1),



Вт/(м · °С), а  $L$  – длина пути передачи теплоты, м, получим

$$P_m = \frac{\Delta t}{R_m} \quad (\text{аналогия} - I = \frac{\Delta U}{R}).$$

В результате тепловой расчет сводится к расчету электрической цепи по законам Кирхгофа. В качестве примера рассмотрим пластину

Таблица 3.1

Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Материал	$a_m, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	Материал	$a_m, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$
Воздух	0,023	Кремний	83...105
Стеклотекстолит	0,34	Сталь	45...92
Фарфор	0,83	Алюминиевые сплавы	160...180
Керамика 22ХС	10...25		
Поликор	25...42	Золото	293...297
Бериллиевая керамика	60...200	Медь	259...400
		Серебро	416...425

с тепловыделяющими элементами, которые создают тепловые потоки  $P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}$  и  $P_{m4}$  (рис. 3.8). Тепловая (электрическая) модель пластины приведена на рис. 3.9. Для перехода от тепловой модели к

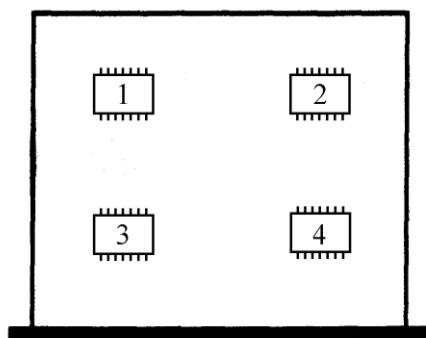


Рис. 3.8. Пластина с тепловыделяющими элементами

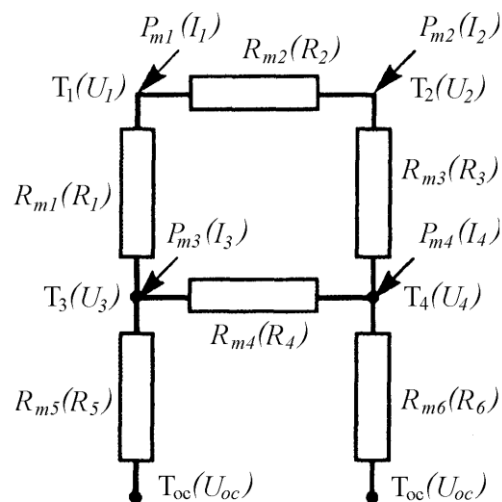


Рис. 3.9. Тепловая (электрическая) модель

электрической заменяем: показатели температуры ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ ) электрическими потенциалами ( $U_1, U_2, U_3, U_4$ ), тепловые сопротивления

( $R_{m1}, R_{m2}, R_{m3}, R_{m4}, R_{m5}, R_{m6}$ ) – омическими ( $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ ), а тепловые потоки ( $P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}, P_{m4}$ ) – токами ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ ). Температуру окружающей среды (и соответствующий потенциал) обозначим  $T_{oc}$  (и  $U_{oc}$ ). Далее для каждого из узлов составляется система уравнений Кирхгофа, из решения которых находятся неизвестные величины.

Примеры теплоотвода кондукцией показаны на рис. 3.10.

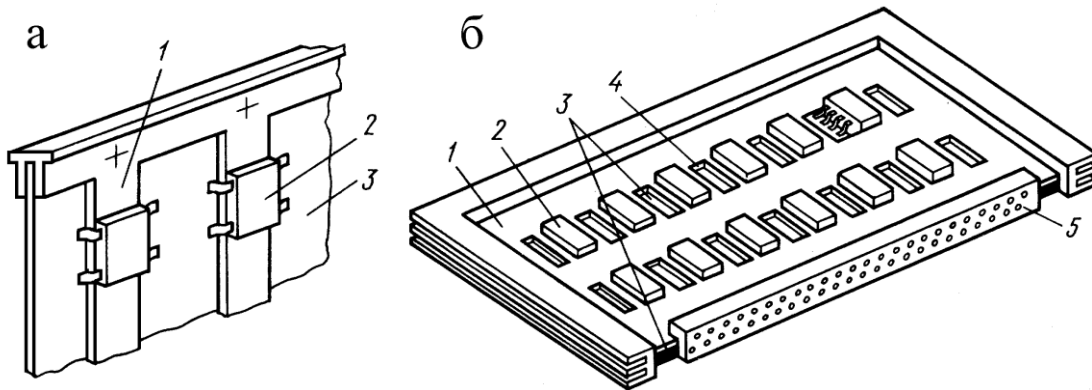


Рис. 3.10. Охлаждение ИС с использованием теплоотводящих шин: а – ячейка с шинами-теплостоками и торцевой накладкой; б – ячейка со сплошным теплоотводом и периферийным радиатором; 1 – элементы теплоотвода; 2 – ИС; 3 – ПП; 4 – окна в теплоотводящей шине; 5 – разъем

Теплоотводящие шины соединяют с несущими конструкциями блоков, стоек и т.д.

### Теплоотвод конвекцией

Перенос теплоты конвекцией связан с движением жидкой или газообразной среды, соприкасающейся с твердым телом (элементом конструкции). Тепловая энергия передается при конвекции как между твердым телом и средой, так и в самой среде. Конвекция называется естественной, если она осуществляется при свободном движении среды за счет разности плотностей холодной и горячей ее областей, и принудительной, если движение среды происходит за счет внешних сил (вентилятора, насоса) (рис. 3.11).

В невесомости естественная конвекция отсутствует. Конвекционный теплообмен может быть усилен поглощением теплоты при испарении (парообразовании). Выражение (3.2) для определения теплового потока при конвекции ( $P_k$ ) имеет вид

$$P_k = k_k S \Delta t,$$

где  $k_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от ФЭ в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Значения  $k_k$  сложным образом зависят от многих

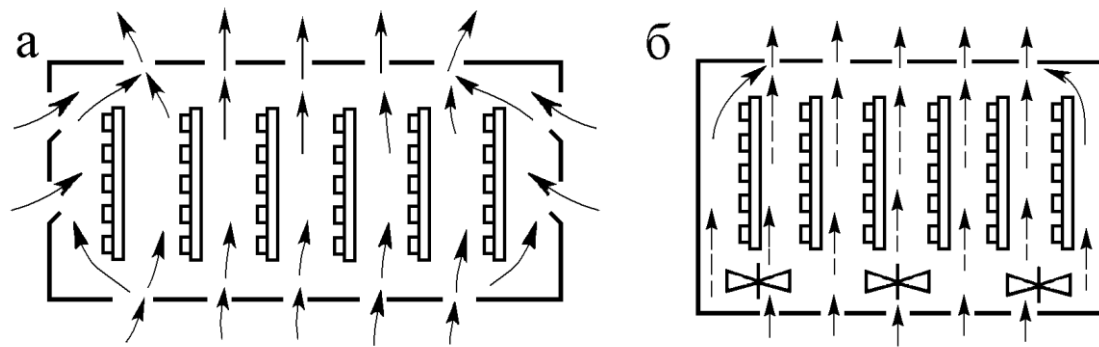


Рис. 3.11. Естественное (а) и принудительное (б) воздушное охлаждение ЭС

факторов: формы поверхности, ее ориентации, скорости движения среды, ее вязкости, плотности, характера движения (ламинарное или турбулентное) и т.д. Примерные значения  $k_k$  для некоторых видов конвективного охлаждения приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения коэффициентов теплопередачи  $k_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С)

Охлаждающая среда, процесс	Движение среды	
	свободное	вынужденное
Газ	2...10	10...100
Вязкая жидкость (масла)	200...300	300...1000
Вода	200...600	1000...3000
Кипящая вода	500...40000	500...40000
Конденсация капель водяного пара	1000...100000	1000...100000
Конденсация паров органических жидкостей	200...2000	200...2000

Системы воздушного конвективного теплообмена (естественного или принудительного) используются в большинстве наземных. Эффективность естественного воздушного охлаждения повышается с использованием теплообменников с развитой поверхностью, называемых радиаторами (рис. 3.12).

Для принудительного воздушного охлаждения обычно используют малогабаритные осевые вентиляторы (одиночные или объединяемые в блоки).

Применение воздушного охлаждения в бортовых ЭС ограничено понижением плотности воздуха с ростом высоты и значительными га-

баритами радиаторов и вентиляторов. Поэтому для бортовых ЭС чаще используют жидкостные замкнутые СОТР (рис. 3.13). В качестве жидких теплоносителей в них используют воду, аммиак, спирты, этиленгликоль и др. Эти же жидкости обычно применяют и в испарительно-конденсационных СОТР.

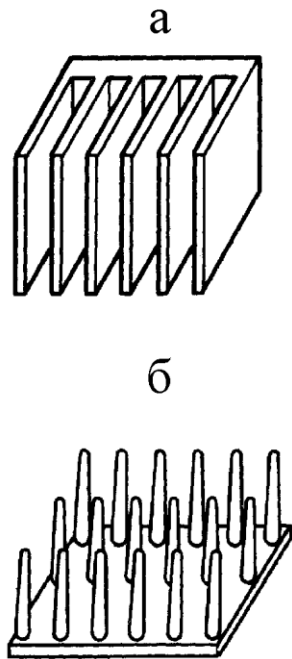


Рис. 3.12. Радиаторы воздушного охлаждения:  
а – пластинчатый; б – игольчатый

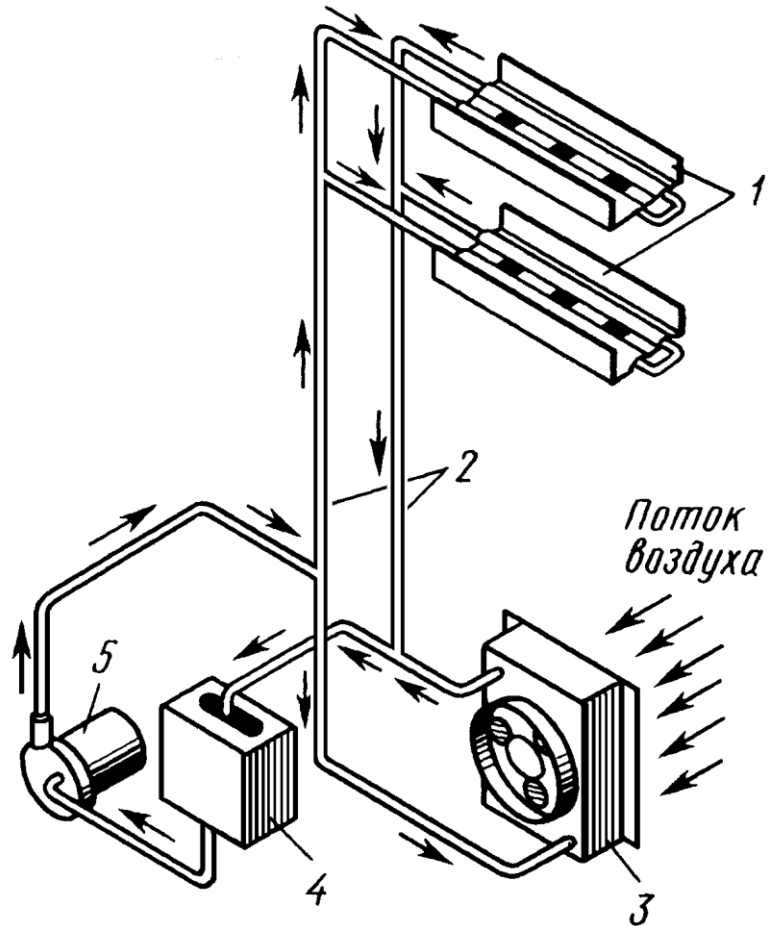


Рис. 3.13. Система жидкостного охлаждения оснований двух блоков: 1 – охлаждаемые основания; 2 – система трубопроводов; 3 – воздушно-жидкостный радиатор с вентилятором; 4 – бак-накопитель жидкости; 5 – насос

Одними из наиболее эффективных испарительно-конденсационных систем являются теплоотводящие устройства, называемые тепловыми трубами и работающие по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла, основанного на испарении жидкости в зоне подвода теплоты, передаче теплоты с потоком пара, конденсации пара в зоне отвода теплоты и возвращении жидкости в зону подвода теплоты за счет капиллярных или гравитационных сил. Тепловая труба (рис. 3.14) представляет замкнутую вакуумированную камеру, внут-

ренная поверхность которой облицована капиллярной структурой (фитилем), заполненной конденсатом рабочей жидкости. В качестве фитиля могут использоваться ткани, керамика или тканная стальная сетка.

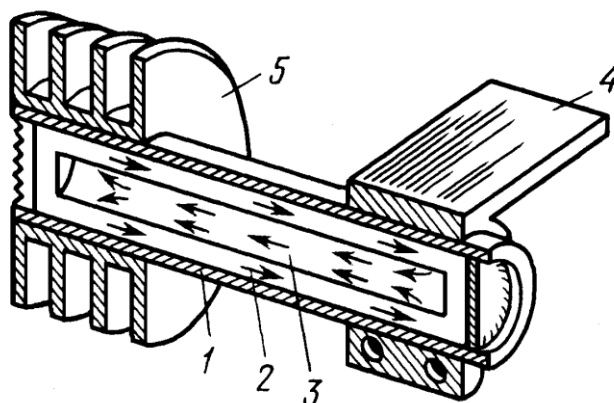


Рис. 3.14. Тепловая трубка:

- 1 – корпус трубки; 2 – капиллярно-пористый материал; 3 – паровой канал;  
4 – площадка для охлаждаемого узла; 5 – радиатор охлаждения

Коэффициент теплопроводности тепловых труб на 1-2 порядка превышает теплопроводность меди.

### Теплоотвод излучением

Тепловая мощность ( $P_{л}$ ), излучаемая в неограниченное пространство, может быть определена из соотношения

$$P_{л} = k_{л} S \Delta t ,$$

где  $k_{л}$  – коэффициент лучеиспускания, Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

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

### СОТР с использованием термоэлектрического эффекта

Термоэлектрический эффект (эффект Пельтье) используется для построения термобатарей путем последовательного соединения по-

лупроводников  $p$ - и  $n$ - типа (рис. 3.15). При прохождении тока тепло поглощается на верхнем спае и выделяется на нижнем (при указанной полярности). Охлаждая горячий спай (например, конвекцией), можно существенно понизить температуру холодного спая. Для повышения эффективности охлаждения применяют двух- и более каскадные батареи. Термобатареи обычно используются для термостабилизации (активной) отдельных, чувствительных к температуре ФЭ (рис. 3.16).

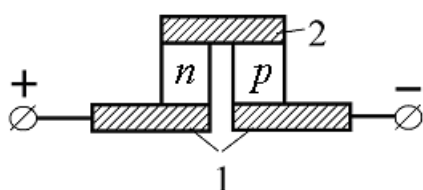


Рис. 3.15. Схема элементарного термоэлемента:  
1 – нижний; 2 – верхний спай

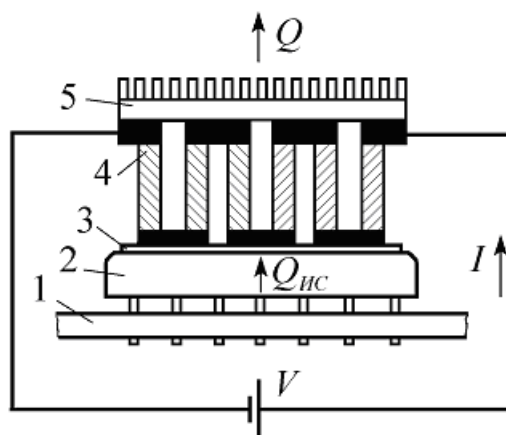


Рис. 3.16. Схема охлаждения БИС термоэлементом:  
1 – ПП; 2 – корпус БИС; 3 – керамическая плата; 4 – медная полоска; 5 – радиатор

Стабилизация температуры корпуса БИС обеспечивается соответствующей регулировкой тока, проходящего через термоэлемент.

### Поглощение теплоты

На параметры СОТР в значительной степени влияют используемые способы поглощения теплоты, которые основаны на способности к термоаккумуляции окружающей среды и материалов конструкции, а также на использовании термоэлектрического эффекта.

При термоаккумуляции происходит нагрев окружающей среды или конструкции, могут произойти фазовые превращения в материалах конструкции (плавление, испарение). Количество теплоты (кал), которое может поглотить среда или материал конструкции при нагреве, определяется соотношением  $Q = m C_p \Delta t$ , где  $m$  – масса среды или конструкции, г;  $C_p$  – удельная теплоемкость материала среды или конструкции, ккал/(г · °С);  $\Delta t$  – перегрев среды или конструкции по отношению к начальной температуре, °С. Для открытых СОТР, в которых нагреву подвергается окружающая среда (воздух, вода), массу ко-

торой можно считать практически бесконечной, количество поглощаемой теплоты также бесконечно.

### Выбор способа охлаждения

Ориентировочно способ охлаждения ЭС можно выбрать из диаграммы (рис. 3.17) по области изменения параметров (перегреву конструкции  $\Delta t$  и тепловому потоку  $P$ ). Область разделена на зоны, соответствующие каждому способу охлаждения: естественным – воздушному 1 или жидкостному 3, принудительному – воздушному 2, жидкостному 4 и испарительному 5. Нижняя часть относится к блокам, верхняя - к индивидуальным элементам.

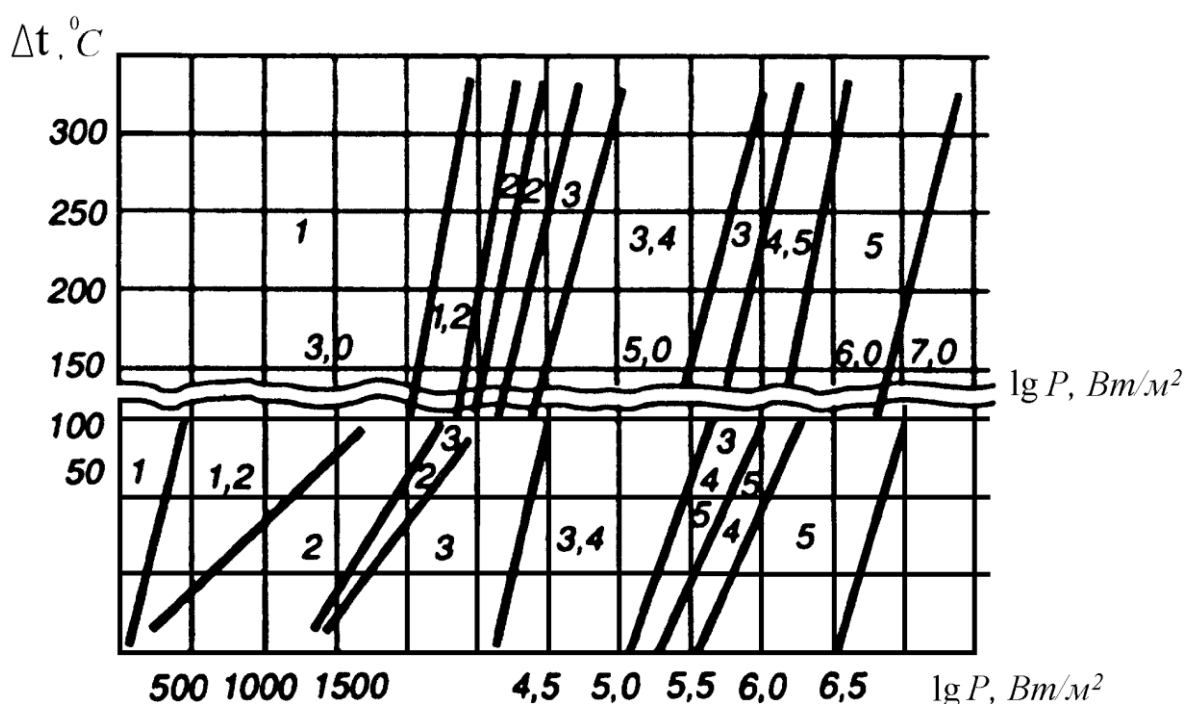


Рис. 3.17. Диаграмма выбора способа охлаждения

В дальнейшем могут быть выполнены уточняющие расчеты (в т.ч. с использованием автоматизированных систем), а также экспериментальные исследования на макетах и опытных образцах.

### 3.3. Обеспечение помехоустойчивости ЭС

Информация в виде аналоговых или цифровых сигналов в процессе хранения, преобразования, обработки и передачи может подвергаться те или искажения (по форме, фазе, амплитуде) под воздействием помех. Помехами называют не предусмотренные КД сигналы,

возникающие в ФЭ и ЛС и отрицательно влияющие на работоспособность ЭС (вплоть до отказа).

Конструктивная реализация электрической принципиальной схемы сопровождается, как правило, появлением паразитных элементов. Паразитные элементы – это элементы, не предусмотренные электрической схемой и появившиеся в результате неидеальной практической ее реализации. ЛС, изоляционные промежутки между ними, также как и резисторы, конденсаторы и индуктивности, в реальной конструкции обладают, в той или иной степени, всеми тремя параметрами ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) одновременно. Для активных ФЭ (дискретных или ИС) наиболее характерно наличие паразитных емкостей. Паразитные элементы обычно ощутимо проявляют себя на сравнительно высоких частотах (например, индуктивные свойства проволочных выводов резисторов и конденсаторов). Паразитные явления наблюдаются также у контактных соединений (например, у разъемов). Паразитные элементы являются причиной появления паразитных связей. Паразитные связи могут возникать между выводами ФЭ, между элементами ЭС, между ЭС и внешней средой.

Актуальность борьбы с помехами ЭС можно объяснить следующими причинами:

- снижение энергии полезных сигналов и увеличение доли паразитных связей, сопровождающих процессы микроминиатюризации ЭС;
- рост доли задержек сигналов в ЛС по сравнению с задержками собственно логических элементов;
- усложнение функций и состава ЭС (в т.ч. увеличение количества электромеханических узлов);
- возрастание общего уровня помех (от промышленных источников, устройств мобильной связи и т.д.)
- расширение сферы применения ЭС (в т.ч. на объектах с высоким уровнем помех).

Основные причины, вызывающие искажения сигналов при прохождении их по ЛС:

- отражения от несогласованных нагрузок и от различных неоднородностей в ЛС;
- затухание сигналов при прохождении их по цепям последовательно соединенных элементов;
- ухудшение фронтов и задержки сигналов, возникающие при включении нагрузок с реактивными составляющими;
- задержки в линии, вызванные конечной скоростью распространения сигнала;
- перекрестные наводки;
- паразитная связь между элементами через цепи питания и заземления;



– наводки от внешних электромагнитных полей.

При анализе процессов, происходящих в ЛС, последние представляют в виде той или иной модели, например как на рис. 3.18.

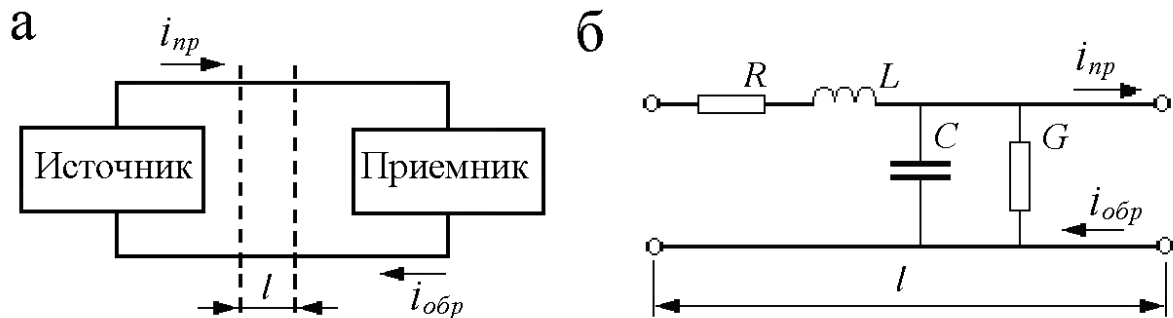


Рис. 3.18. Модели ЛС длиной  $l$ :  
а – в виде системы прямых и обратных проводов;  
б – в виде совокупности элементов

«Прямой» ток ( $i_{пр}$ ) или проводник означает направление от источника к приёмнику. «Обратный» ( $i_{обр}$ ) – от приёмника к источнику. Сопротивление  $R$  характеризует активные потери в линии, представляющие собой сопротивление постоянному току или токам низкой частоты. Индуктивность  $L$  - определяется конструкцией линии и применяемыми материалами. Для снижения индуктивности линии в ней не должны применяться магнитные материалы. Кроме этого, наличие магнитных материалов приводит к нежелательному снижению скорости распространения электромагнитной волны в линии. Электрическая емкость  $C$  определяется также конструкцией линии и применяемыми материалами. Для шин питания эта емкость должна быть по возможности больше, а для сигнальных линий - по возможности ниже. Проводимость  $G$  определяется утечками в изоляционном материале линии. Для современных изоляционных материалов токи утечки весьма малы, что позволяет пренебречь этим параметром.

Волновое сопротивление ЛС равно  $Z = (L/C)^{1/2}$ . Значения волнового сопротивления обычно лежат в пределах 40...120 Ом.

По выполняемым функциям ЛС подразделяют на сигнальные, которые объединяют входы - выходы ФЭ и предназначены для передачи сигналов и электропитания (шины питания), осуществляющие подвод электрической энергии.

При анализе помех сигнальные ЛС условно подразделяют на электрически короткие и электрически длинные линии, характер искажения сигналов в которых различен.

## Помехи в коротких ЛС

К коротким относят ЛС, в которых время распространения сигнала от передающего элемента до приемного  $t_3$  меньше половины времени нарастания или спада фронта сигнала  $t_\phi$ , т.е. выполняется соотношение

$$t_\phi / t_3 \geq 2$$

В электрически коротких линиях погонная длина  $l$  (например, измеряемая линейкой), как правило существенно меньше минимальной длины волны (спектре сигнала  $l \ll \lambda_{\min}$  (обычно принимают  $l \leq 0,1 \lambda_{\min}$ )). Емкостная и/или индуктивная реактивность коротких ЛС, а также отражения от неоднородностей, распределенных по длине линий, приводят к изменениям нарастающих или ниспадающих фронтов сигнала.

Для короткой линии характерно постоянство напряжений и токов во всех точках по длине линии. Короткая ЛС ( $s$  – начало линии,  $r$  – конец линии), соединяющая, например, два вентиля D1 и D2, представляется обычно в виде двух моделей: ёмкостной или индуктивной (рис. 3.19). Независимо от характера модели, качественно форма сигнала имеет одинаковый вид для обоих вариантов, проявляемый в затягивании фронта (рис. 3.20).

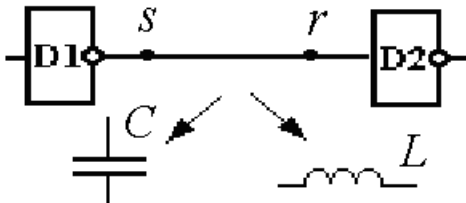


Рис. 3.19. Короткая ЛС и ее модели

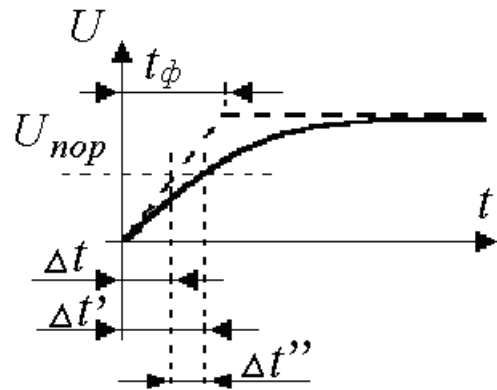


Рис. 3.20. Искажение сигнала в коротких ЛС

Параметр  $\Delta t$  – предсказуемая системная задержка (или время достижения порога срабатывания), которая определяется длительностью неискаженного фронта. Процессы, происходящие в короткой ЛС, вносят дополнительную задержку  $\Delta t'$ . Общая задержка срабатывания элемента D2 равна  $\Delta t' = \Delta t + \Delta t'$ .

Модель в виде ёмкости обычно используется при анализе схем, в которых управление ведётся напряжением и относительно малы токи в цепях. Например, для микросхем (или других структур) на КМОП в виду малых токов, протекающих в них. Модель в виде индуктивности используется в цепях с достаточно большими токами (биполярные транзисторы).

В случае анализа быстродействующих систем (в основном цифровых) предпочтительной моделью является ёмкостная модель.

В коротких ЛС могут также возникать перекрестные наводки (индуцированные помехи), обусловленные электрическим, магнитным и электромагнитным взаимодействием расположенных по соседству ЛС (рис. 3.21).

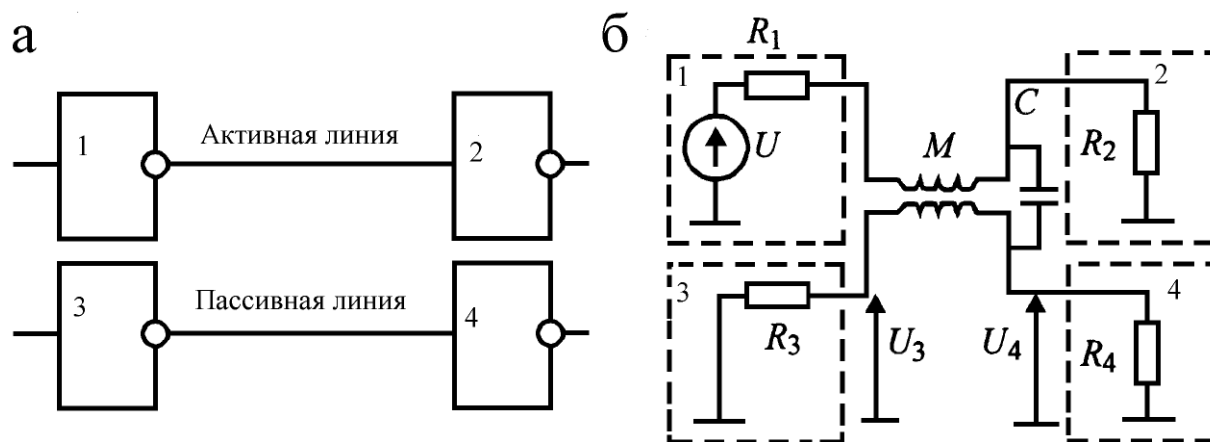


Рис. 3.21. Перекрестные помехи в коротких ЛС:  
а – электрическая и б – эквивалентная схемы

Помеха вызывается переходом энергии из одной сигнальной цепи в другую за счёт электромагнитного поля. При анализе предполагается, что обратное влияние пассивной линии на активную отсутствует.

Активная линия является источником помех и содержит генератор напряжения  $U$  с внутренним сопротивлением  $R_1$  и нагрузку  $R_2$ . Пассивная линия является рецептором помех и содержит нагрузку в начале линии  $R_3$  и в конце  $R_4$ . Распределенные параметры взаимной индуктивности и емкости заменены сосредоточенными  $M$  и  $C$ , соответственно. При работе генератора энергия от источника помех передается электромагнитным полем на рецептор помех, и на его нагрузках  $R_3$  и  $R_4$  возникают напряжения  $U_3$  и  $U_4$ . Эти напряжения, согласно принципу суперпозиции, являются суммами индуктивных и емкостных составляющих:

$$U_3 = U_{3L} + U_{3C} ; U_4 = U_{4L} + U_{4C} ,$$

где  $U_{3L}, U_{4L}$  – индуктивные составляющие соответственно в начале и в конце пассивной линии;  $U_{3C}, U_{4C}$  – емкостные составляющие соответственно в начале и в конце пассивной линии.

При расчетах часто пренебрегают той или иной составляющей.

Анализ индуцированных помех при магнитной связи и снижение их уровня представляют более сложную задачу, чем при емкостной связи. Ослабить взаимную индуктивность можно за счет разнесения ЛС возможно дальше друг от друга, уменьшения площадей контуров, образуемых проводами, по которым протекают прямые и обратные токи ЛС, использования экранированных проводов, свитых пар (скрученных пар проводов), коаксиальных кабелей.

Снизить значение паразитной емкости между ЛС можно уменьшением длины совместного параллельного расположения проводов на минимально возможном расстоянии друг от друга, увеличением зазора между ними, укладыванием проводов, передающих различные по уровням сигналы, в отдельные жгуты, приближением ЛС к земле (земля выполняет функцию экрана). Наиболее эффективным средством уменьшения емкостной составляющей индуцированной помехи является экранирование.

### Помехи в длинных ЛС

Длинной называют ЛС, в которой время задержки превышает половину времени нарастания или спада фронта сигнала, т.е. выполняется соотношение

$$t_{\phi} / t_{\Sigma} < 2.$$

Погонная длина электрически длинной линии не меньше минимальной длины волны в спектре сигнала  $l \geq \lambda_{\min}$ . Для длинной линии характерно непостоянство напряжений и токов вдоль линии. Моделируется длинная линия набором элементарных звеньев LC длиной  $\Delta X$  (рис. 3.22).

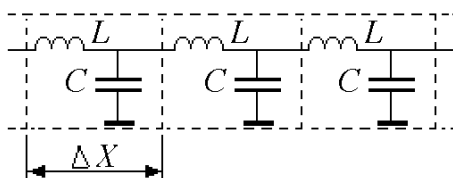


Рис. 3.22. Эквивалентная схема длинной ЛС

Искажения сигналов в длинных ЛС вызываются отражениями сигналов от несогласованных нагрузок и неоднородностей, распределенных по длине линии (рис. 3.23).

Рассмотрим распространение сигнала в длинной линии. Представим эквивалентную схему длинной линии:  $U$  – генератор, обладающий выходным сопротивлением  $R_{\text{вых}}$ ,  $s$  – начало линии,  $r$  – конец линии,  $R_{\text{вх}}$  – входное сопротивление микросхемы или другого четырехполюсника,  $X$  – коор-

дината по длине линии,  $t$  – время,  $T$  – время пробега электромагнитной волны (ЭМВ) от начала до конца линии. При  $t=0$  – в точке  $s$

стартует фронт ЭМВ (такую ЭМВ называют падающей) и начинает своё распространение по линии с постоянной скоростью. Через время  $T$  ЭМВ волна достигнет точки  $r$ . Если волновое сопротивление линии  $Z$  равно  $R_{вх}$ , то энергия ЭМВ полностью поглотится нагрузкой. При неравенстве сопротивлений часть энергии ЭМВ поглотится, а часть отразится. Количество отражённой энергии определяется коэффициентом отражения по напряжению  $k = U_o / U_n$  (где  $U_n$  и  $U_o$  – напряжения падающей и отраженной волн, соответственно). В точке  $r$  коэффициент отражения равен

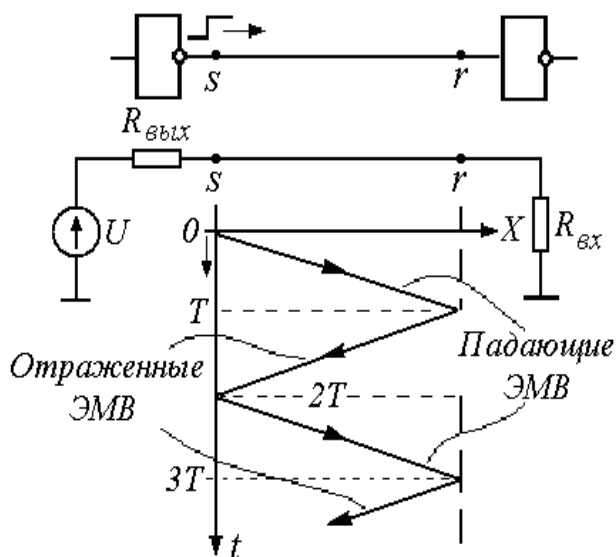


Рис. 3.23. Длинная ЛС и помехи отражения в ней

В точке  $r$  коэффициент отражения равен

$$k_r = \frac{R_{сх} - Z}{R_{сх} + Z} .$$

Далее отражённая волна начнет распространяться к началу линии. При  $t = 2T$  – в точке  $s$  отраженная волна либо полностью поглотится (при  $R_{вх} = Z$ ), либо частично отразится с соответствующим коэффициентом  $k_s$  :

$$k_s = \frac{R_{вх} - Z}{R_{вх} + Z} .$$

Значения коэффициентов отражения могут быть как отрицательными, так и положительными. Но, поскольку абсолютная их величина меньше 1 и в линии существуют потери, то процессы отражения являются затухающими.

В зависимости от фазы и амплитуды отражённого сигнала, погонной длины линии, удельной задержки распространения возможны различные варианты искажений сигнала. На рис. 3.24 показаны варианты изменения напряжения в точке  $r$  при положительных и отрицательных значениях  $k_r$  и  $k_s$ .

Сигнал в любой точке ЛС равен сумме всех падающих и отражённых волн (принцип суперпозиции), которые существуют к данному моменту в линии. Из осциллограммы (рис. 3.24, а) следует, что сигнал пересекает пороговый уровень  $U_{пор}$  в момент времени  $3T$ , что вызывает переключение микросхемы нагрузки. В более неблагоприятной

ситуации возможно достижение порога в моменты  $5T$  и даже  $7T$ . Таким образом, может быть внесена существенная погрешность во временные диаграммы, рассчитанные для идеализированных условий.

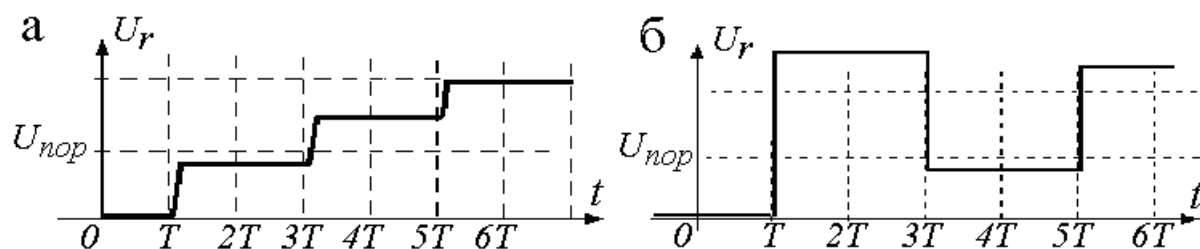


Рис. 3.24. Искажения сигналов в длинных ЛС:  
а – при положительных значениях  $k_r$  и  $k_s$ ; б – при  $k_r k_s < 0$

Другой случай – провал в уровне сигнала, который воспринимается как логический ноль (осциллограмма на рис. 3.24, б). Такие ошибки чреватые тем, что микросхема воспринимает два импульса вместо одного.

Отражения сигналов в длинных ЛС могут происходить от различных неоднородностей линий: участков различного конструктивно-технологического исполнения (объемный проводник, вывод ФЭ, пленочный или печатный проводник, контакт разъема и т.д.), участков с различным волновым сопротивлением (например, из-за непостоянства сечений проводников или характеристик диэлектрика), наличия в линиях разветвлений и т.д.

Уменьшения или полного исключения отражений в длинных линиях можно добиться их согласованием. ЛС считается согласованной, если сопротивление, на которое она нагружена, равно волновому сопротивлению линии (рис. 3.25).

Согласование ЛС обеспечивается использованием линий с высокой стабильностью волнового сопротивления и введением согласующих элементов.

Подключение согласующего резистора  $R_c$  последовательно (рис. 3.25, а) с выходным сопротивлением передатчика сигнала (последовательное согласование) используется, если последнее много меньше  $Z$  линии. В параллельно согласованной линии (рис. 3.25, б) резистор  $R_c$  подсоединяют к входу приемника линии передачи. Такой способ согласования используют, если входное сопротивление приемника сигнала во много раз больше  $Z$  линии. Поскольку падение напряжения на резисторах  $R_c$  понижает уровень передаваемого сигнала, режимы последовательного и параллельного согласования применяют, когда число элементов, нагружаемых на линию передачи, обычно не более двух. При большем количестве нагрузок для согласования используют эмиттерные повторители (рис. 3.25, в). При этом база и

коллектор транзистора эмиттерного повторителя должны коммутироваться проводниками возможно меньшей длины.

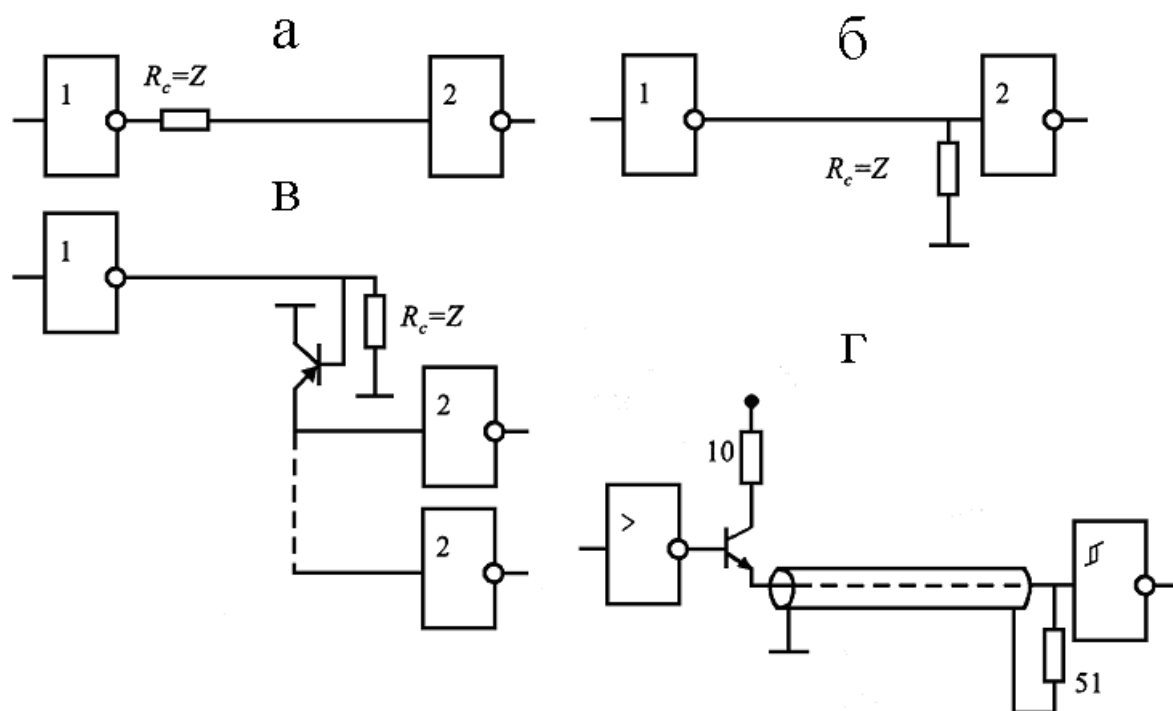


Рис. 3.25. Способы согласования электрически длинных линий передач

В схеме согласования коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 3.25, г) кабель на выходе нагружен на сопротивление 51 Ом.

В зависимости от специфики разрабатываемой аппаратуры в качестве длинных линий используют микрополосковые и полосковые печатные проводники, свитую пару, плоский кабель, коаксиальный кабель.

Для защиты от индуцированных помех длинные ЛС выполняют экранированными. Экраны в виде металлической оболочки или в виде отдельных слоев многослойных печатных плат соединяют с корпусом ЭС, что существенно снижает воздействие электрического и электромагнитного полей на ЛС.

### Помехи в шинах питания

Каждая точка шины питания, к которой подключаются соответствующие выводы ИС, должна иметь в идеале один и тот же потенциал, согласно выполняемым функциям («питание» или «земля»). Напряжение питания, подаваемое на ИС, не должно выходить за пределы, указанные в ТУ на ИС. Появление помех в шинах питания может привес-

ти к сбою в работе ЭС. Основные виды помех в шинах питания: статические и импульсные.

Статические помехи обусловлены падением напряжения на активном сопротивлении шин «земля» и «питание» при протекании по ним постоянных токов. На рис. 3.26 приведена схема, состоящая из  $M_n$  модулей с общим питающим напряжением и общим нулевым потенциалом («землей»).

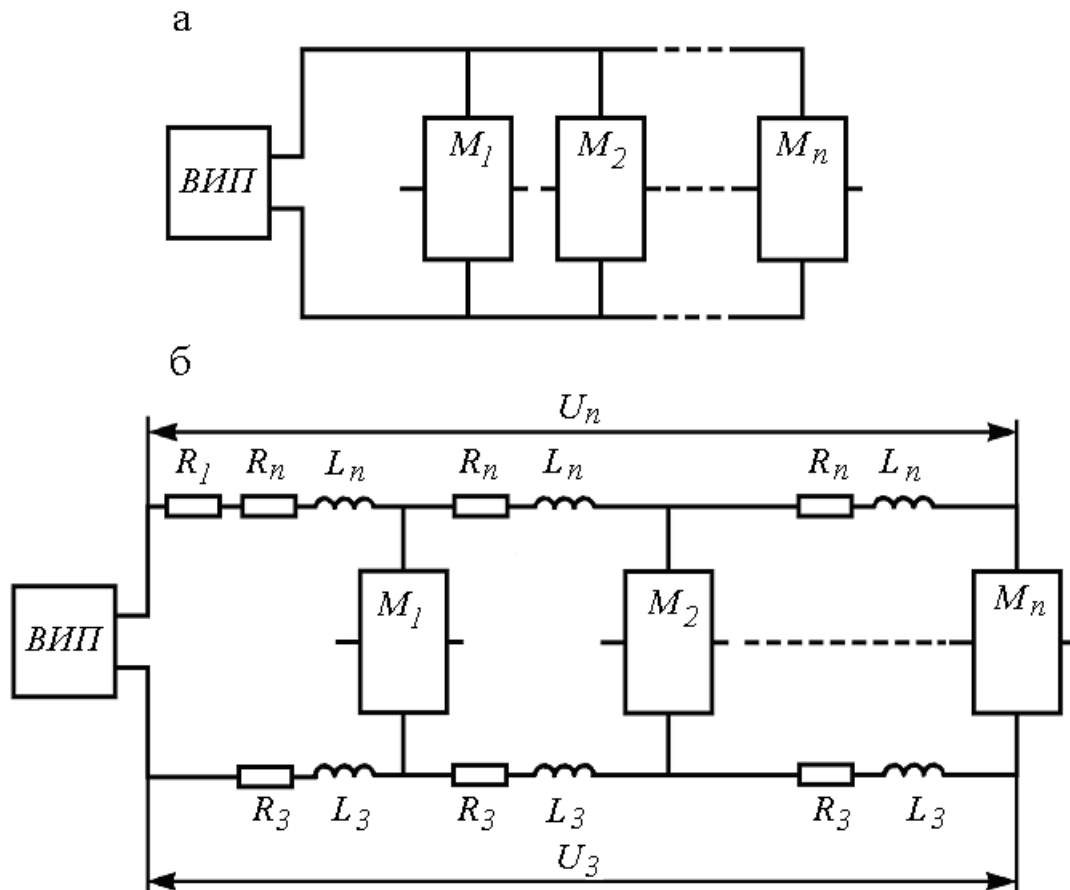


Рис. 3.26. Принципиальная (а) и расчетная (б) схемы подвода «питания» и «земли»:

*ВИП* – вторичный источник питания;  $R_1$  – выходное сопротивление вторичного источника питания;  $R_n$  и  $R_3$  – активное сопротивление участка шины «питание» и «земля»;  $L_n$  и  $L_3$  – индуктивность участка шины «питание» и «земля»

При протекании тока через модули на шинах «питание» и «земля» будет иметь место падение напряжений. В зависимости от того, через какие модули в данный момент проходят токи, напряжение питания на каждом из модулей может иметь те или иные отклонения.

Очевидно, что в наихудшем режиме, с точки зрения помехозащищенности, работает  $n$ -й модуль. Если функционирует модуль  $M_n$ , а остальные находятся в режиме ожидания, то имеет место падение напряжений  $U_n$  и  $U_3$ .



Основная конструктивная мера по уменьшению статических помех – выполнение проводников, выполняющих функции общих шин питания, по возможности короткими, а их поперечное сечение – возможно большим.

Импульсные помехи обусловлены, главным образом, кратковременными возрастаниями («бросками») токов потребления ИС при переключении их из одного логического соединения в другое. Импульсные помехи также могут проникать в шины питания извне, например, из источника питания.

Среди цифровых ИС наибольший уровень помех при переключении создают ТТЛ-интегральные схемы. На рис. 3.27 показана работа выходного каскада ТТЛ-схем, включающего в себя составной инвертор.

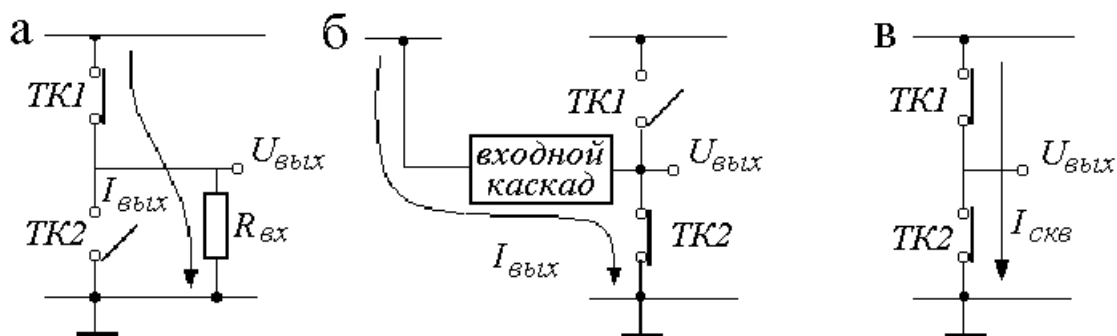


Рис. 3.27. Работа выходного каскада ТТЛ-схем:  
 а – состояние статической единицы; б – состояние статического нуля;  
 в – стадия переключения из «0» в «1» или из «1» в «0»

В состоянии статической единицы транзисторный ключ  $TK1$  открыт, а  $TK2$  закрыт, обеспечивая на выходе высокое напряжение  $U_{вых}$ . В состоянии статического нуля  $TK1$  закрыт, а  $TK2$  находится в режиме насыщения.

Наиболее существенными причинами значительных перепадов токов являются сквозные токи, появляющиеся при переключении. В определенный момент оба ключа оказываются замкнуты. Это объясняется невозможностью быстрого выхода транзисторных ключей из режима насыщения. Образование импульсного сквозного тока  $I_{скв}$  при переключении ИС приводит к импульсному падению напряжения на обладающих индуктивностью шинах питания, определяемому как  $U = L(di/dt)$ , где  $di/dt$  – производная индуктивного тока при коммутации.

Импульсные помехи в шинах питания могут приводить к сбоям в работе ЭС по следующим причинам:

- изменение питающего напряжения ИС, превышающее установленный в ТУ допуск;

– импульсное падение напряжения на шине «земля», которое может вызвать искажение информационного сигнала на входе ИС (в случаях, когда информационный «0» соединен с шиной «земля»);

– перенос помех из шин питания в сигнальные цепи индуктивным или емкостным путем при больших скоростях изменения тока  $di/dt$  и напряжения  $du/dt$ .

Для снижения уровня помех в шинах питания применяются следующие схемно-конструктивные методы:

– уменьшение индуктивности шин питания с учетом взаимной магнитной связи прямого и обратного проводников;

– сокращение длин участков шин питания, которые являются общими для токов от различных ИС;

– снижение скорости изменения импульсных токов в шинах питания с помощью помехоподавляющих конденсаторов;

– рациональное размещение цепей питания на печатных платах.

## Экранирование

Под экранированием понимают конструкторские приемы ослабления электромагнитного поля (ЭМП) помех в пределах определенного пространства, позволяющие повысить помехозащищенность и обеспечить электромагнитную совместимость ЭС. Применяют два варианта экранирования. В первом случае экранируемая аппаратура размещается внутри экрана, а источник помех – вне его, во втором – экранируется источник помех, а защищаемая от помех аппаратура располагается вне экрана. Первый вариант используют при защите от внешних помех, второй – внутренних. В обоих вариантах в качестве экранов используются металлические оболочки. Поскольку применение экранов приводит к увеличению массы и стоимости ЭС, то экранирование считается вынужденной мерой, которая применяется после того, как исчерпаны другие возможности (схемотехнические и конструктивные). Одновременно с выполнением основной функции – ослабления поля помех – экран оказывает воздействие на собственные параметры цепей и контуров экранируемого объекта, что связано с перераспределением ЭМП при установке экрана. Функции экранов часто выполняют кожухи, панели и крышки приборов блоков и стоек. В общем случае металлический экран толщиной 0,025...1 мм (например, корпус ЭС) в той или иной степени ослабляет ЭМП помех. Для повышения эффективности экранирования конструкцию экрана (материал, форму, толщину и т.п.) выбирают по результатам соответствующего анализа.

На рис. 3.28 показана электромагнитная волна частотой  $f$  (Гц) и характеристическим сопротивлением  $Z_w$ , которая падает на экран

толщиной  $t$  (м) с магнитной мостью  $\mu$  (мкГн/м) и удельным сопротивлением  $\rho$  (Ом·м). Характеристическое сопротивление экрана на частоте  $f$  равно (по модулю):

$$|Z_s| = \frac{(2\pi\mu\rho)^{1/2}}{1 - \exp(-t/\delta)},$$

где  $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu f}}$  – толщина скин-слоя

(толщина слоя в веществе, при прохождении которого электро-магнитное поле ослабляется в  $e$  раз).

Различие характеристических сопротивлений волны и экрана приводит к тому, что волна частично отражается от границы раздела воздух– экран, а частично проникает сквозь экран, где часть ее энергии превращается в тепло. Достигнув границы раздела экран – воздух, волна частично отражается обратно, а частично проходит через экран.

Распространяющаяся в материале экрана электромагнитная волна испытывает многократное отражение и в результате полностью рассеивается или превращается в тепло. Эффективность экранирования  $S$  обычно выражается в децибелах (дБ) и представляется в виде суммы  $S = R + A + B$ , где  $R$  – затухание за счет отражения электромагнитной энергии от границ раздела воздух – экран и экран – воздух для основной волны;  $A$  – затухание за счет поглощения, вызванное тепловыми потерями от возбуждаемых вихревых токов в металле и потерями на перемагничивание (для ферромагнитных материалов);  $B$  – затухание электромагнитной энергии за счет многократных внутренних переотражений в толще экрана для остальных составляющих волн (так как параметр  $B$  обычно меньше двух других слагаемых, то им часто пренебрегают). Таким образом,  $S \approx R + A$ . Параметры  $R$  и  $A$  могут быть определены следующим образом

$$R = 20 \lg |(Z_v + Z_s)^2 / 4 Z_v Z_s|; \quad A = 8,69 t / \delta,$$

где  $Z_s$  и  $Z_v$  – характеристические сопротивления экрана и воздуха, соответственно.

На рис. 3.29 показана зависимость параметров  $R$ ,  $A$  и  $S$  от частоты. Эффективность экранирования в точке  $C$  минимальная.

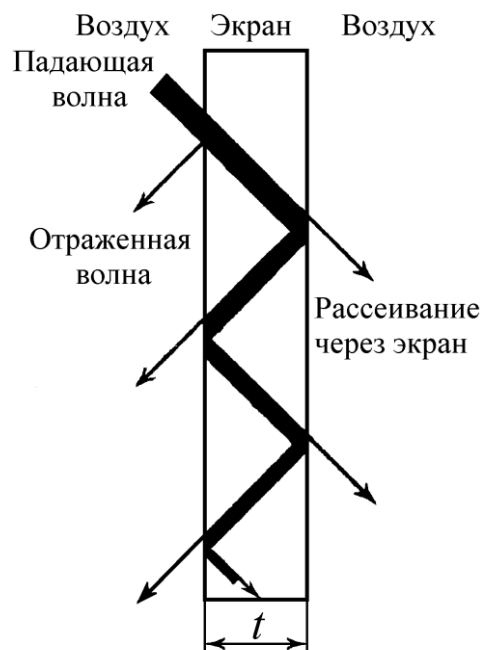


Рис. 3.28. Отражение и рассеивание электромагнитных волн при их экранировании

Из уравнений Максвелла, описывающих распространение электромагнитного поля, следует, что в ближней зоне источника помехи (при  $r < \lambda/2\pi$ , где  $r$  – расстояние от источника помехи;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного поля) с увеличением  $r$  характеристическое сопротивление воздуха электрическому полю уменьшается, а

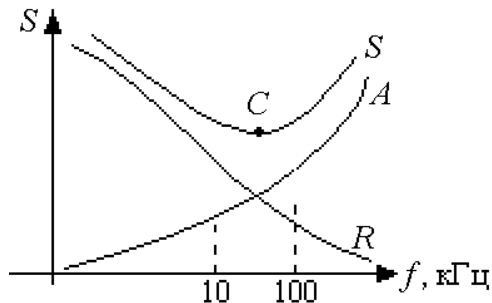


Рис. 3.29. Зависимость эффективности экранирования от частоты

сопротивление воздуха магнитному полю возрастает (рис. 3.30). В дальней зоне ( $r \geq \lambda/2\pi$ ) электрическое и магнитное поля имеют примерно равные волновые сопротивления, близкие к характеристическому сопротивлению воздуха электромагнитному полю:

$$Z_w \approx Z_v = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ Ом.}$$



Рис. 3.30. Волновые сопротивления электрического и магнитного полей

В ближней зоне ( $r < \lambda/2\pi$ ) значение  $Z_w$  может быть больше, равно или меньше  $Z_v$ . Если  $Z_w > Z_v$ , то преобладает напряженность электрического поля и оно стремится индуцировать разность потенциалов в ближайших проводниках. Если  $Z_w < Z_v$ , то преобладает магнитное поле, которое индуцирует ток в ближайших проводниках.

В ближней зоне (на низких частотах) обычно используется экранирование электрической или магнитной составляющей. Электромагнитные явления здесь рассматриваются как квазистационарные, т.е. протекающие достаточно медленно. В дальней зоне (на высоких частотах) экранируют электромагнитные поля. Соответственно, применяемые экраны условно подразделяют на электростатические, магнитостатические и электромагнитные.

Принцип действия электромагнитного экрана описан выше.

*Электростатическое экранирование* применяют для защиты от источника, в котором имеются большое напряжение и малые токи. Электростатическое экранирование основано на уменьшении паразитной емкости между источником и рецептором путем установки между ними заземленного экрана. Экран по возможности ставится как можно ближе к источнику. Если невозможно экранировать источник

(например, когда он находится за пределами устройства), то экранируют рецептор (рис. 3.31).

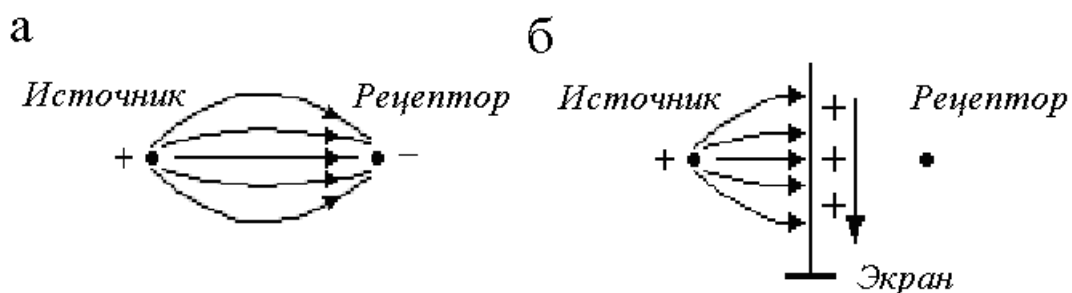


Рис. 3.31. Действие электростатического поля источника на рецептор:  
а – без экрана; б – с заземленным экраном

Заземление экрана необходимо для нейтрализации индуцируемых на нем зарядов. Поэтому материал экрана и цепи заземления должны обладать хорошей электропроводностью (медь, медные сплавы, алюминий). Высокое характеристическое сопротивление электрических полей способствует их отражению на границе воздух - экран, поэтому даже тонкие заземленные экраны оказываются весьма эффективными.

Соединения лучше выполнять пайкой или сваркой. Заземляться экраны должны массивными короткими проводниками с минимальным индуктивным сопротивлением. Примеры электростатического экранирования приведены на рис. 3.32.

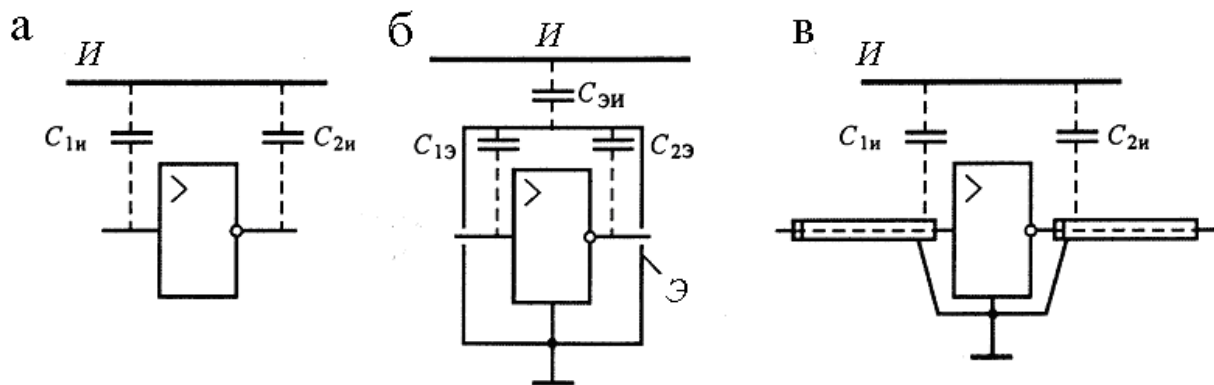


Рис. 3.32. Модуль под воздействием электрического поля (а), защищенный экраном (б) и экранированным проводом (в)

Источник помехи  $I$  воздействует на вход и выход усилителя через паразитные емкости  $C_{1u}$  и  $C_{2u}$  (рис. 3.32, а). После установки экрана  $\mathcal{E}$  (рис. 3.32, б) источник помех окажется подсоединенным на землю через емкость  $C_{эи}$ , а вход и выход схемы – нагруженными на емкости  $C_{1э}$  и  $C_{2э}$ .

Аналогичный результат можно получить, используя вместо общего экрана экранированные провода для входной и выходной линий (рис. 3.32, в). Для устранения гальванической помехи по земле экраны проводов необходимо заземлять в одной точке.

В многослойных печатных платах (МПП) функции экрана выполняют сплошные слои фольги с нулевым потенциалом.

Для защиты от внешних электрических полей в качестве экрана часто используется металлический корпус. Металлические кожухи, крышки, панели также обладают экранирующим действием, если они соединены с корпусом. Однако при этом происходит увеличение собственных емкостей каскадов, что особенно нежелательно для высокочастотных устройств.

Существенную проблему представляет выполнение экрана для аппаратуры в пластмассовых корпусах (например, мониторы компьютеров). Повышение эффективности экранирования в этом случае достигается:

– применением композиционных материалов (пластмасса с металлическим наполнителем);

– нанесением поверхностных слоёв металла (напыление металлов, нанесение специальной проводящей краски, оклейка корпуса фольгой и т. п.).

*Магнитостатическое экранирование* применяют для защиты от источника, в котором имеются большие токи и малые напряжения. Магнитное поле, создаваемое источником, наводит в рецепторе (контуре, образуемом одним или несколькими проводниками) индуцируемое напряжение помехи. Для полного устранения или уменьшения напряжения помехи, наводимой в контуре, необходимо:

- поместить контур в экран;
- ориентировать его так, чтобы магнитные силовые линии поля не пересекали контур, а проходили вдоль него;
- уменьшить площадь контура.

Магнитные поля с низким характеристическим сопротивлением ( $|Z_W| < Z_V$ ) легко проникают через границу воздух – экран, но испытывают отражения на границе экран - воздух. При этом часть волн, которая не поглощается в экране после многократных внутренних отражений, в итоге рассеивается. Поэтому экраны, защищающие от магнитных полей, должны иметь толщину  $t > \delta$ , высокую магнитную проницаемость  $\mu$  и низкое удельное сопротивление  $\rho$ . Магнитные экраны выполняют как из ферромагнитных (сталь, пермаллой), так и немагнитных металлов (алюминий, медь, латунь). Механизм работы ферромагнитного экрана заключается в шунтировании силовых линий магнитного поля (рис. 3.33, а).

При большой напряженности магнитного поля материал ферромагнитного экрана не должен «входить в насыщение», так как при этом магнитная проницаемость, а следовательно, и эффективность экранирования резко снижаются.

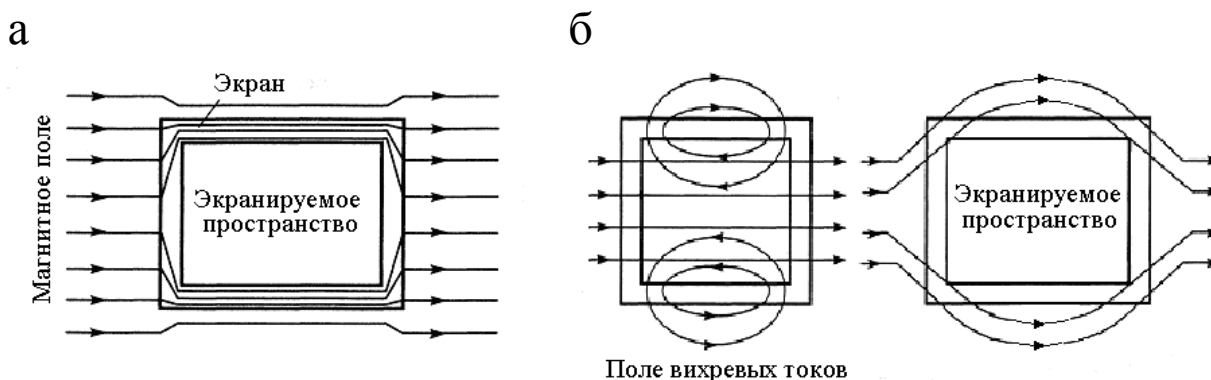


Рис. 3.33. Экранирование магнитного поля: а – ферромагнитным экраном; б – экраном из немагнитного металла

С ростом частоты возрастает роль вихревых токов, происходит вытеснение магнитного поля из толщи экрана, что эквивалентно уменьшению магнитной проницаемости (рис. 3.33, б). При этом экран, выполненный как из ферромагнитного (магнитомягкого), так и немагнитного металлов, переходит в электромагнитный режим работы. Стальные экраны в этих условиях из-за малой электропроводности и потерь на гистерезис при перемагничивании оказываются менее эффективными, чем экраны из немагнитных материалов с низким электрическим сопротивлением вихревым токам. Эффективность действия немагнитных экранов возрастает с увеличением проводимости и толщины, а также с ростом частоты источника поля.

Для экранирования магнитных полей частотой 10 кГц...1 МГц применяют стальные экраны, а с частотой ниже 10 кГц – сплавы с высокой магнитной проницаемостью (например, пермаллой). Находят применение также сетчатые экраны, в которых, как и в сплошных экранах, при воздействии переменного магнитного поля происходит возбуждение вихревых токов. Наиболее сложным считается экранирование низкочастотных магнитных полей.

*Электромагнитное экранирование* охватывает диапазон частот от 1 кГц до 1 ГГц. Действие электромагнитного экрана основано на отражении электромагнитной энергии и ее затухании в толще экрана. Для нижней границы частотного диапазона первостепенное значение приобретает отражение, для верхней границы – поглощение электромагнитной энергии.

Электромагнитное экранирование выполняется как немагнитными, так и магнитными металлами. Толщину экрана выбирают по возможности наибольшей.

В особо ответственных случаях применяют многослойные экраны, состоящие из последовательно чередующихся слоев магнитных и немагнитных металлов, например медь – сталь, сталь – медь, медь – сталь – медь и т.д. Высокая эффективность экранирования обеспечивается за счет высокой отражательной способности меди и поглощающей стали. Наличие между слоями небольших воздушных зазоров (0,5...0,75 мм) также повышает качество экранирования. Многослойные экраны обеспечивают высокую эффективность экранирования в широком частотном диапазоне, включая область низких частот (в т.ч. магнитных полей), но существенно усложняют и утяжеляют конструкцию.

### **3.4. Герметизация ЭС**

ФЭ, ЛС и КЭ изолируют от контакта с окружающей средой, содержащей влагу, пыль, химические соединения и другие вредные для ЭС компоненты, монолитными или полыми оболочками.

#### **Защита монолитными оболочками**

Монолитные оболочки составляют неразрывное целое с защищаемым элементом или сборочной единицей. Различают пленочные и толстостенные оболочки.

Пленочные оболочки обычно представляют собой различного рода покрытия: защитные, защитно-декоративные и специальные. Защитные покрытия предохраняют покрываемые материалы от воздействия влаги и других агрессивных компонентов, защитно-декоративные дополнительно придают нарядный внешний вид, а специальные – особые свойства, например отражательную способность, стойкость к определенным средам, смачиваемость жидкими припоями и т.д.

Пленочные оболочки выполняются из органических и неорганических материалов толщиной от десятых долей до нескольких сотен микрометров. Материалы для защитных пленок должны отвечать ряду требований: хорошие влагозащитные свойства, стойкость к воздействию химических и физических факторов, близость температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) покрываемого материала и покрытия, хорошая адгезия и т.д.

В качестве материалов покрытий используются: металлы (Cr, Ni, Zn, Cd, драгметаллы), сплавы (чаще – оловянно-свинцовые), окислы



металлов (защищаемых, например  $Al_2O_3$ ) и неметаллов ( $SiO$ ,  $GeO$  и др.), соли металлов (например, фосфаты), пластмассы, лаки, краски и др. Чаще всего покрытиями защищают поверхности корродируемых металлов деталей (КЭ), ЛС (например, печатные и пленочные проводники, внешние выводы ФЭ), а также ФЭ (например, пленочные резисторы). Покрытия наносят различными методами: гальванической и химической металлизацией, лужением, анодной обработкой, осаждением в вакууме, пульверизацией, плакированием и др.

Разновидностью пленочных оболочек являются гидрофобные покрытия с высокими водоотталкивающими свойствами (например, высокомолекулярные кремнийорганические соединения). Обработанные материалы теряют способность не только поглощать влагу, но и смачиваться ею. Гидрофобизацию применяют для обработки керамики, диэлектриков, тканей.

Для получения толстостенных монолитных оболочек используются пропитка, заливка, обволакивание и опрессовка.

*Пропитка* – процесс заполнения изоляционным пленкообразующим материалом пор и малых зазоров в компонентах ЭС с целью увеличения их электрической и механической (защита от повреждений) прочности, влаго-, нагрево- и химической стойкости. Пропитке подвергаются моточные изделия (трансформаторы, дроссели, катушки), а также детали из волокнистых и пористых материалов (например, каркасы катушек).

Пропиточные составы (лаки, компаунды) должны быть нейтральны к элементам пропитываемого изделия, нетоксичны, влаго- и нагревостойки.

*Заливка* – сплошная упаковка изделия в изоляционную массу путем заполнения ею свободного пространства между изделием и стенками корпуса или между изделием и заливочной формой (рис. 3.34, а). Так как заливочный материал в этом случае имеет значительную массу, то в залитых узлах, как правило, возникают внутренние напряжения, вызванные различием ТКЛР компаунда и заливаемых элементов. Эти напряжения могут отрицательно сказаться на работоспособности ЭС и даже вызвать повреждения залитых проводников и непрочных компонентов. В таких случаях применяют компаунды, которые, полимеризуясь, образуют упругую, резиноподобную массу (например, компаунды на основе низкомолекулярных кремнийорганических каучуков) или самовспенивающиеся компаунды на основе полиуретановых, эпоксидных или кремнийорганических смол, в которых сжатую подвергаются пузырьки газа в порах.

*Обволакивание* – процесс образования покровных оболочек обычно путем погружения изделий в специальный изоляционный материал (лаки, компаунды, эмали) с последующим отверждением. Об-

волакивание применяют для защиты от влаги дискретных ЭРЭ, бескорпусных полупроводниковых приборов, микросборок (рис. 3.34, б). Основным преимуществом обволакивания является высокая экономичность, недостатками – довольно толстый (от долей до нескольких миллиметров) и неконтролируемый слой покрытия, возможность использования только для нежестких условий эксплуатации (как и для всех видов полимерной защиты от влаги), сложность удаления попавшей под защитный слой влаги. К обволакиванию можно отнести также герметизацию компаундами паяных и сварных швов и мест контактирования металлов с различными электрохимическими потенциалами, которые весьма чувствительны к воздействию влаги (например, Al и Cu).

*Опрессовка* – защита изделия от влаги толстым слоем полимерного материала (терморезистивная или термопластичная пластмасса) методом литьевого или трансферного прессования в специальных формах. Этот вид влагозащиты используют в основном для малогабаритных компонентов (ИС, ЭРЭ, микросборок; рис. 3.34, в),

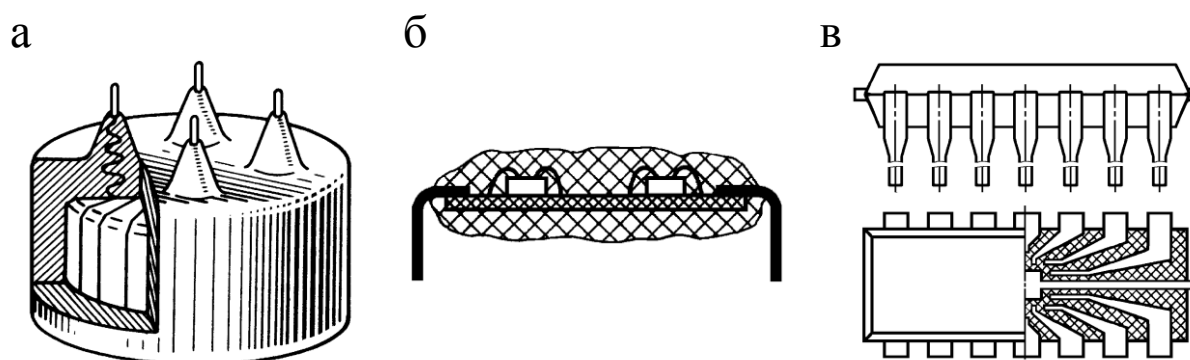


Рис. 3.34. Примеры герметизации в монолитные оболочки:  
а – заливка тороидального трансформатора;  
б – обволакивание микросборки; в – опрессовка микросхемы

что позволяет надежно укрепить внешние выводы и создать несущую конструкцию, которая способна выдерживать механические перегрузки и пригодна для автоматизации установки компонентов на плату. Чтобы избежать нарушения герметизации при колебаниях температуры, подбирают материалы корпуса и выводов с близкими значениями ТКЛР. Толщина опрессовки выбирается с учетом надежности влагозащиты, технологических требований (при толщине стенки менее 2 мм возможно повреждение защищаемого компонента в пресс-форме), внутренних напряжений (при больших толщине и изменении температуры могут возникнуть большие внутренние напряжения). При выборе материала для опрессовки учитывают также его диэлектрические свойства.

Защита полимерными материалами:

- имеет низкую стоимость (дешевые материалы и автоматизируемость процессов);

- не исключает проникновения влаги внутрь узла (слабыми местами считаются выводы и другие элементы, вдоль которых образуются капилляры на границе соприкосновения материалов, имеющих разные ТКЛР);

- пригодна лишь для небольших объемов (т.е. возможна только частичная герметизация);

- обычно используется только для нежестких условий эксплуатации (отапливаемые помещения).

Для жестких условий эксплуатации применяют полную герметизацию с использованием защитных корпусов (полых оболочек) из металла, керамики и других материалов.

### Защита полыми оболочками

Применение полых оболочек в виде вакуумно-плотных корпусов (рис. 3.35) позволяет создать наиболее благоприятные условия для защищаемых элементов. При этом отсутствует непосредственный контакт элементов с оболочкой, в результате чего исключается механическое и химическое взаимодействие между ними, улучшается теплоотвод (при использовании оболочек, теплопроводность которых выше теплопроводности полимеров), повышается надежность влагозащиты и обеспечивается электромагнитное экранирование (при использовании оболочки из металла или металлизированной керамики), ослабляются паразитные связи при замене полимера сухим воздухом или инертным газом (давление которого обычно несколько превышает давление окружающего воздуха). Сухой воздух уменьшает относительную влажность в гермообъеме, а инертный газ – окисляемость материалов ФЭ и ЛС (особенно бескорпусных ИС).

Полые влагозащитные оболочки применяют как для частичной герметизации (ИС, микросборки), так и полной (бортовые и наземные ЭС, эксплуатируемые на открытом воздухе). Необходимость дополнительной защиты от влаги компонентов наземных ЭС с помощью полых

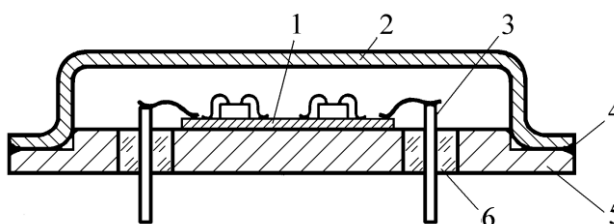


Рис. 3. 35. Вакуумно-плотный металлостеклянный корпус:

- 1 – подложка; 2 – металлическая крышка;
- 3 – вывод; 4 – место пайки или сварки;
- 5 – основание корпуса; 6 – стеклянная изоляция вывода

оболочек вызвана недостаточной надежностью монолитных полимерных оболочек, а также необходимостью защиты от влаги электрических связей (печатных плат, объемных проводников, соединителей).

Полная герметизация может быть разъемной и неразъемной. Неразъемные соединения получают пайкой или сваркой. Конструкция паяного шва (рис. 3.36) позволяет производить разгерметизацию (с помощью стальной проволоки) и повторную (до 5 раз) герметизацию. Герметизация разъемных корпусов обеспечивается специальными прокладками из резины (рис. 3.37), пластиков, мягких металлов (Cu, Al, Pb, In).

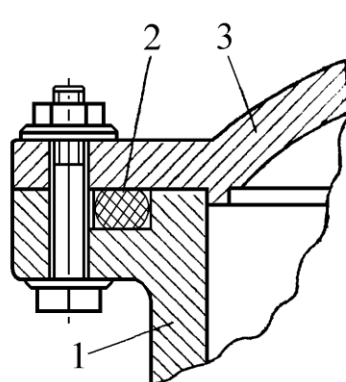
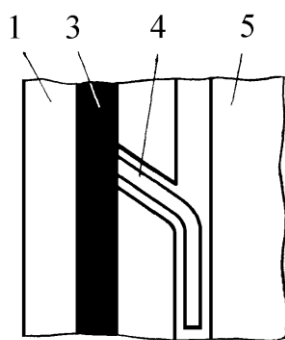
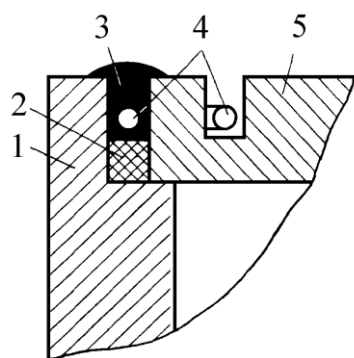


Рис. 3.36. Герметизация корпуса ЭС паяным швом:

1 – кожух-основание; 2 – резиновая прокладка; 3 – припой; 4 – проволока; 5 – крышка

Рис. 3.37. Герметизация резиновой прокладкой:

1 – корпус; 2 – прокладка; 3 – крышка

Если герметизируемый объем невелик (обычно до 3 дм<sup>3</sup>), то масса стягивающих болтов может составлять значительную часть его массы.

Качество герметизации в полые оболочки характеризуется течью, дм<sup>3</sup>·Па/с.

## 4. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭС И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

### 4.1. Печатные схемы

Первые печатные схемы (ПС) принято считать прообразом современных ПП и ИС. Их появление явилось результатом многолетнего стремления специалистов механизировать и автоматизировать процессы сборки и монтажа радиоаппаратуры. Наиболее удачной оказалась конструкция, представляющая собой плоскую изоляционную подложку, на поверхность которой нанесены ЭРЭ в виде тонких слоев из проводящих, резистивных и изоляционных материалов, сконфигурованных соответствующим образом. При изготовлении таких схем были использованы достаточно освоенные к тому времени высокопроизводительные методы полиграфической печати, такие как: трафаретная печать, тиснение, плоская печать, избирательное травление и гальваническое осаждение, фотохимическая печать (в полиграфии этот способ печати называют фотомеханическим) и т.д. Печатная технология основана на широком использовании групповых методов, при которых все элементы изображения формируются (или обрабатываются) на всей подложке за один прием. Использование для однотипного рисунка одной печатной формы (фотошаблона, трафарета и т.п.) обеспечивает высокую степень повторяемости рисунка от подложки к подложке.

Печатные элементы, в отличие от дискретных ЭРЭ, не имеют внешних выводов, корпуса и не могут рассматриваться как отдельные изделия.

Основание печатной схемы выполняет функции механической детали, несущей на своей поверхности пленочные элементы схемы; одновременно оно выполняет функции изоляции и может выполнять функции теплоотвода и др.

Печатные элементы могут формироваться сначала на временной подложке и далее переноситься с нее на постоянную, или их получают сразу на постоянной подложке.

В процессе развития техники печатных схем возможность изготовления всех ЭРЭ появилась не сразу. Наиболее быстро было освоено изготовление печатных проводников, затем резисторов, конденсаторов и индуктивностей. Позднее печатная технология стала применяться и в полупроводниковой технике. Наиболее интенсивно принципы получения печатных элементов развивались в микроэлектронике, поскольку именно они во многом определяют минимально возможные на каждом этапе размеры элементов. Минимальный размер воспроизводимого элемента является важной харак-

теристикой методов печати. Также применяется другой параметр – разрешающая способность процесса, которая определяется как предельное число линий, разделенных промежутками той же ширины  $t$ , воспроизводимых на 1 мм длины изображения (рис. 4.1).

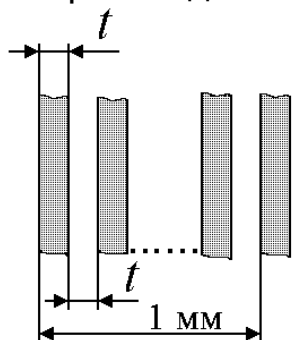


Рис. 4.1. К определению разрешающей способности

В настоящее время с использованием печатных методов получают:

а) в производстве печатных плат – проводящий рисунок и защитную (паяльную) маску;

б) в производстве пленочных ИС – пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивности), коммутационные, изоляционные и защитные слои;

в) в производстве полупроводниковых ИС – эпитаксиальные слои, маски для локального легирования (изменения типа проводимости), коммутационные и изоляционные слои, а также пленочные резисторы (в совмещенных схемах).

г) в производстве коммутационных плат микросборок – коммутационные и изоляционные слои.

Основные технологические процессы изготовления ПС связаны с получением слоев с заданными свойствами и конфигурацией. К ним относятся:

изготовление инструмента (как правило, комплекта), определяющего рисунок каждого из слоев – фотошаблонов, трафаретов, масок и т.п.

осаждение слоев на подложку с одновременным или последующим их конфигурированием.

## Фотошаблоны

В качестве инструмента для конфигурирования слоев чаще всего применяются фотошаблоны (ФС). ФС состоит из прозрачной подложки (стекло или полимер), на поверхности которой выполнен рисунок в виде сочетания участков, прозрачных и непрозрачных для света определенной длины волны. Рисунок может быть выполнен в слое фотографической эмульсии (эмульсионные ФС), а также путем конфигурирования пленочного покрытия из металла (металлические ФС) или другого материала, например окиси железа (цветные ФС), и другими способами.

Эмульсионные ФС представляют собой позитивный (изображение элементов непрозрачное) или негативный (изображение элементов прозрачное) рисунок, выполненный на черно-белых фотопленках или фотопластинках. ФС получают формированием в светочувстви-

тельном (фотоэмульсионном) слое скрытого изображения с последующей химико-фотографической его обработкой – проявление и т.д. Скрытое изображение получают фотографированием оригиналов, выполненных в увеличенном масштабе (рис. 4.2), вычерчиванием световым лучом (с впечатыванием отдельных изображений), а также сканированием лазерным лучом.

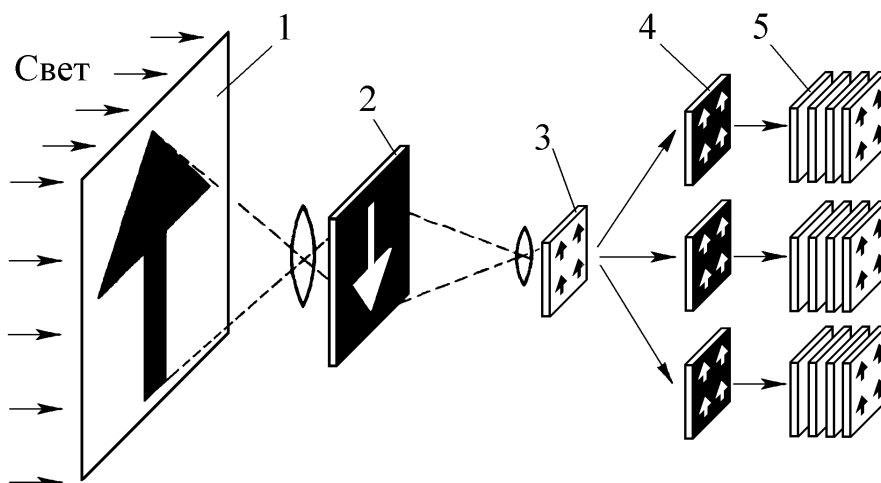


Рис. 4.2. Последовательность изготовления ФШ:  
1 – оригинал, выполненный в увеличенном масштабе;  
2,3,4 – промежуточные ФШ; 5 – рабочие ФШ

Эмульсионным ФШ присущи такие недостатки как:

- нерезкость (размытость) краев изображений, представляющая собой зону постепенного перехода от максимальной  $D_{max}$  к минимальной  $D_{min}$  оптической плотности (рис. 4.3); ее появление обусловлено зернистым строением фотоэмульсии и различного рода оптическими явлениями (светорассеиванием и т.п.); нерезкость краев изображения приводит в дальнейшем к снижению точности размеров элементов печатного рисунка;

- размерная нестабильность основы фотопленок, проявляющаяся в изменении координат изображений печатных элементов после химико-фотографической обработки;

- ограниченное число контактных экспонирований, сопровождающихся вырывами частиц фотоэмульсии.

Поэтому не редки случаи, когда вместо эмульсионных используются ФШ, на стеклянную или пленочную подложку которых нанесено тонкое непрозрачное покрытие, конфигурируемое, например, лазерным лучом.

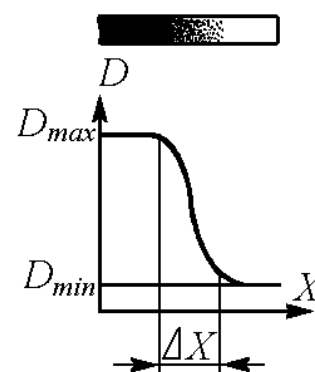


Рис. 4.3. Размытость края эмульсионных ФШ:  
 $\Delta X$  – величина размытости

ФШ используются для экспонирования (избирательного облучения) слоев фоторезистов (ФР).

## Фоторезисты

Фоторезисты представляют собой органические (природные или синтезированные) соединения моно- или полимерной структуры, которые после облучения актиничным светом (т.е. светом, вызывающим активацию молекул) изменяют свою растворимость в определенных средах. Для большинства ФР актиничным является ультрафиолетовое излучение с длиной волны 300...400 нм. Все ФР подразделяются на два типа: негативные и позитивные. В негативных ФР при облучении протекает реакция фотополимеризации, в результате чего молекулы полимера укрупняются и их химическая стойкость повышается. В отличие от необлученных участков, облученные теряют способность к растворению в определенных растворителях (проявителях). В позитивных ФР при облучении протекает реакция фотораспада, в результате чего образуются молекулы более простой структуры. Облученные участки обладают пониженной химической стойкостью и, в отличие от необлученных, лучшей растворимостью в проявителях.

От обычной фотоэмульсии ФР отличается тем, что он полностью удаляется при проявлении в отдельных участках (экспонированных или неэкспонированных ультрафиолетом, в зависимости от того, позитивный он или негативный). ФР используются для получения кон-

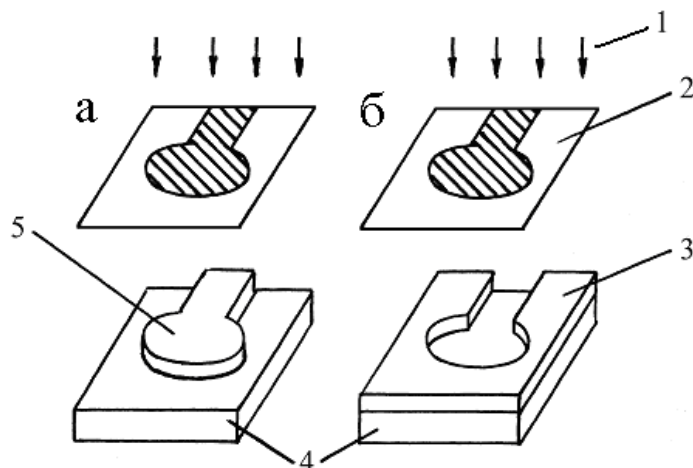


Рис. 4.4. Получение КМ с использованием позитивного (а) и негативного (б) ФР:

- 1 – актиничное излучение; 2 – ФШ-позитив;  
3 – КМ из негативного ФР; 4 – подложка;  
5 – КМ из позитивного ФР

– создание рисунка на заготовках сетчатых трафаретов в виде свободных ячеек и ячеек, заполненных обработанным ФР (рис. 4.5).

тактных масок (КМ), представляющих собой рельефный рисунок (рис. 4.4) на плоских поверхностях заготовок (печатных плат, подложек ИС и т.п.).

Основное назначение КМ:

– защита покрываемых участков от травителей, гальванического или горячего осаждения, анодного оксидирования, коррозии и т.д., но иногда эти функции могут быть другими, например маркировка;



В производстве ПС применяются жидкие (как правило, на органических растворителях) и сухие пленочные фоторезисты (СПФ).

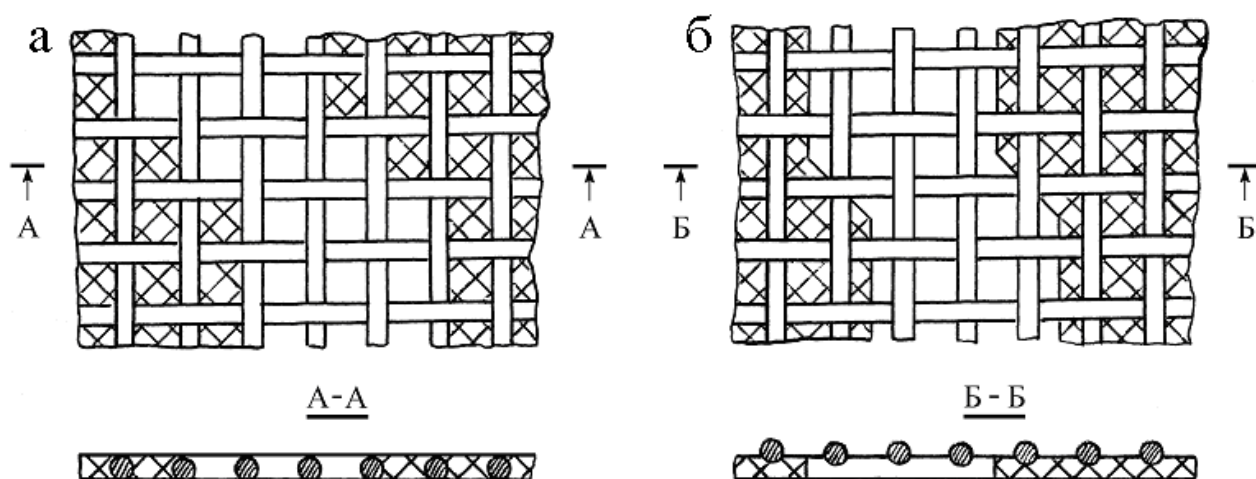


Рис.4.5. Сетчатый трафарет, изготовленный с применением жидкого ФР (а) и СПФ (б)

Жидкие ФР наносят на плоские поверхности (заготовки печатных плат, подложки ИС и т.д.) или на заготовки сетчатых трафаретов с малым размером ячеек, в которых жидкий ФР держится за счет сил поверхностного натяжения (см. рис. 4.5, а). Жидкие ФР наносят поливом, окунанием, валковым методом или распылением (рис. 4.6). СПФ используются для изготовления сетчатых трафаретов (см. рис. 4.5, б) и в производстве печатных плат. СПФ наносят на специальных установках – ламинаторах.

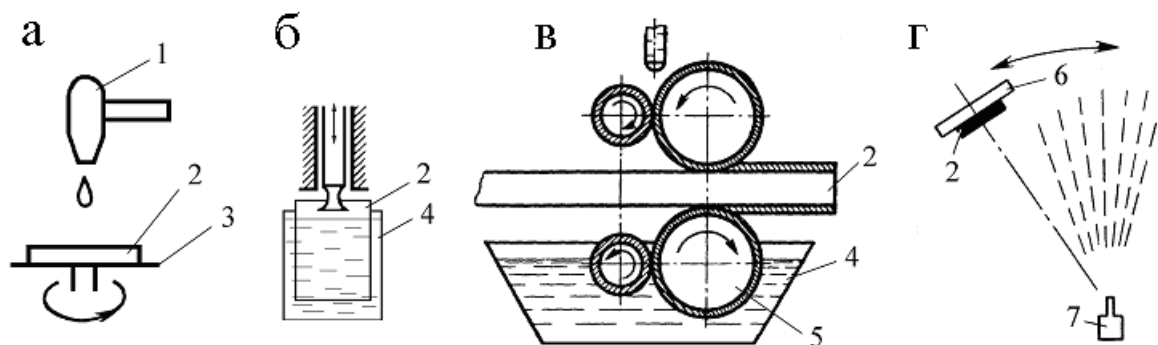


Рис. 4.6. Методы нанесения жидких ФР:

- а – центрифугированием; б – окунанием; в – валковый; г – распылением:  
 1 – дозатор для подачи резиста; 2 – подложка; 3 – столик центрифуги;  
 4 – емкость с ФР; 5 – валки; 6 – нагреваемая планшайба; 7 – форсунка

Экспонирование ФР (рис. 4.7) может быть контактным (с прижатием ФШ стороной, содержащей рисунок к слою ФР) и бесконтактным (проекторным или на микрозоре). Метод контактной печати и печать на микрозоре позволяют получать элементы КМ из ФР в не-

сколько мкм. Разрешающая способность проекционной печати на порядок выше, но на сравнительно небольшом поле, ограничиваемом характеристиками объективов.

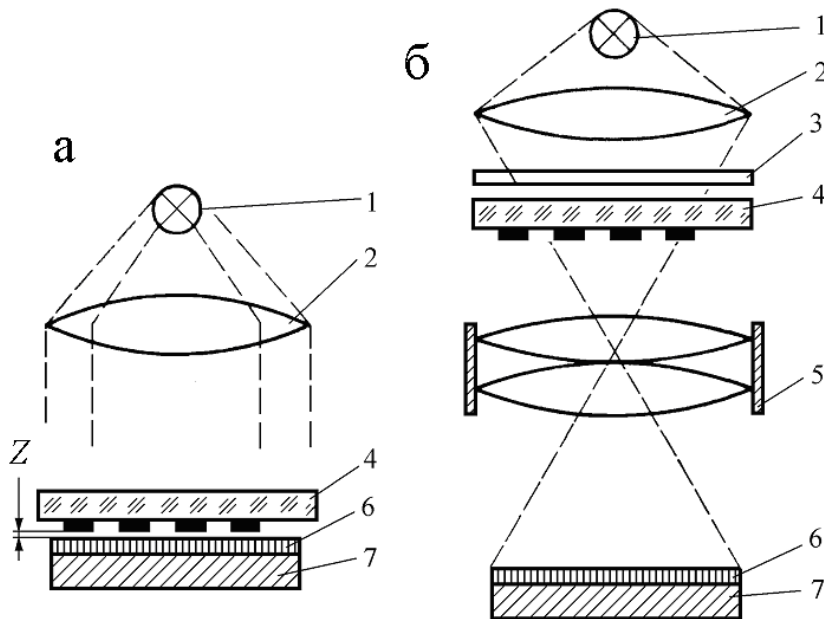


Рис. 4.7. Методы экспонирования ФР:  
 а – контактный (зазор  $Z = 0$ ) и на микрозазоре ( $Z \approx 10$  мкм);  
 б – проекционный;  
 1 – источник актиничного излучения; 2 – конденсор; 3 – фильтр;  
 4 – ФШ; 5 – объектив; 6 – ФР; 7 – подложка

Изображение ФШ при проекционном методе может передаваться как в масштабе 1:1, так и с уменьшением.

Избирательное облучение слоев ФР может также осуществляться лучом (лазерным, электронным, ионным), управляемым по специальной программе.

### Методы осаждения слоев

Необходимые слои либо осаждают на подложку в процессе изготовления ПС, либо используют полуфабрикаты – подложки с уже нанесенными слоями, например фольгированные диэлектрики. При изготовлении ПС наибольшее применение нашли следующие методы осаждения коммутационных, резистивных и диэлектрических слоев:

- трафаретная печать (рис. 4.8);
- химическое осаждение;
- гальваническое осаждение;
- термовакuumное испарение;
- ионно-плазменные процессы получения пленок;

– получение слоев оксида и нитрида кремния, эпитаксиальных и т.д.

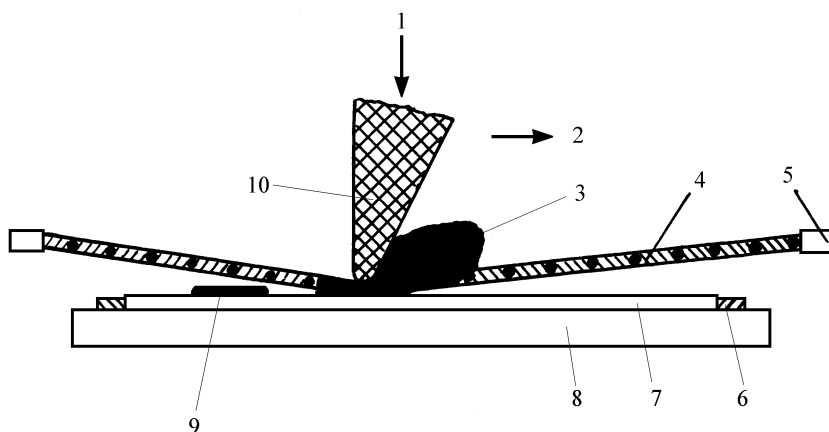


Рис. 4.8. Принцип трафаретной печати:

1 – давление ракеля; 2 – направление движения ракеля; 3 – паста;  
4 – трафарет; 5 – рама; 6 – фиксатор подложки; 7 – подложка;  
8 – основание; 9 – оттиск

Конфигурирование может осуществляться как в процессе осаждения слоя, так и после.

Избирательное осаждение производят через маску, содержащую окна соответствующей конфигурации, через которые осаждаемый материал попадает на подложку. Используют следующие виды масок: многоразовые маски (сетчатые трафареты, свободные маски) и одноразовые (контактные) маски.

КМ могут быть получены из ФР или пленок других материалов, сконфигурированных соответствующим образом.

Сплошные слои конфигурируют обычно с использованием КМ и реже другими способами, например гравировкой (лазерной, механической и т.д.).

Процесс конфигурирования пленок с использованием КМ называют литографией.

## Литография

Развитие литографических процессов, которые главным образом определяют минимально возможные размеры элементов, привело к созданию различных принципов и вариантов их исполнения. Наиболее часто применяют прямую литографию (рис. 4.9, а), включающую три основных этапа: получение КМ, травление открытых участков слоя и снятие КМ. В некоторых случаях, например, когда травитель разрушает КМ или подложку, применяют обратную литографию (рис. 4.9, б).

Толщина КМ, получаемая на первом этапе, здесь обычно должна превышать толщину конфигурируемого слоя, осаждаемого на КМ на

втором этапе. Разность в толщине позволяет удалить КМ вместе с осажденными на нее участками слоя.

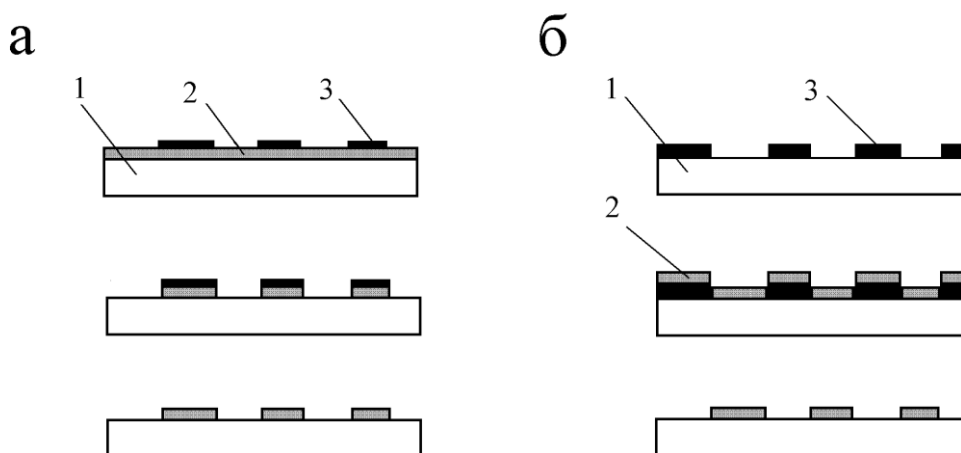


Рис. 4.9. Прямая (а) и обратная (б) литография:

1 – подложка; 2 – слой, подлежащий конфигурированию; 3 – контактная маска

В качестве материала КМ применяют ФР, трафаретные краски, химически стойкие металлы и сплавы, а также прочие материалы. Чаще всего используют органические резисты, обладающие чувствительностью к излучению той или иной длины волны: ФР, рентгено-, электроно- и ионорезисты. Соответственно различают фото-, рентгено-, электроно- и ионную литографию.

Установлено, что разрешающая способность КМ на основе органических резистов обратно пропорциональна длине волны актиничного излучения. Поэтому появление новых видов литографии, как правило, связано с переходом на меньшую длину волны излучения.

Важным этапом процесса литографии является травление слоев с открытых участков. Травление – это физико-химическая разборка кристаллической решетки на отдельные атомы или ионы. В литографических процессах применяют влажное (химическое) травление в жидкостях и сухое травление в плазме.

Первый способ более распространен, так как не требует сложного оборудования и позволяет использовать множество растворов. Недостатком влажного травления является значительное подтравливание под КМ (рис. 4.10).

После растворения первых атомных слоев травильный раствор практически с той же скоростью начинает растворять пленку и в боковых направлениях (промежуточные стадии травления показаны пунктиром).

В литографии травление слоев с одинаковой скоростью в различных направлениях называют изотропным, а с различной – анизотропным. Профиль элемента после травления характеризуется фактором травления  $f = h/a$ . Чем больше величина  $f$ , тем ниже разре-

шающая способность, так как ширину элемента обычно определяют по верхней части, а зазоры между элементами – по нижней.

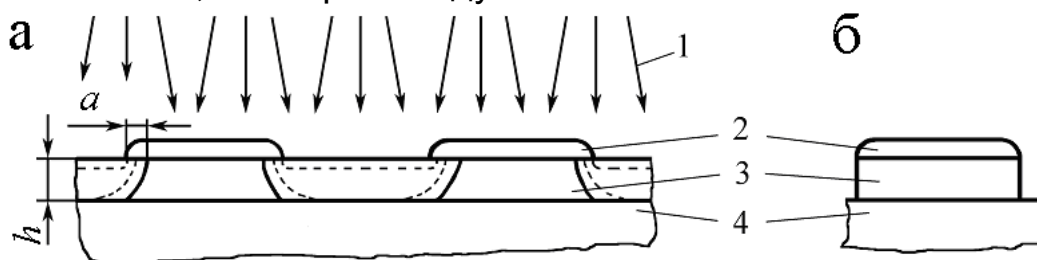


Рис. 4.10. Профили печатных элементов:  
 а - после влажного травления; б – идеальный профиль;  
 1 – жидкий травитель; 2 – КМ; 3 – конфигурируемый слой; 4 – подложка

Для повышения разрешающей способности в литографии применяют: струйную подачу травильного раствора (или его паров) в направлении, перпендикулярном слою; слои меньшей толщины; сухое плазменное травление (главным образом, для получения субмикронных элементов СБИС).

При изготовлении печатных элементов различных разновидностей ПС могут применяться как общие технологические процессы (например, получение КМ на основе ФР, трафаретная печать, травление участков слоев, не защищенных КМ и т.д.), так и специфических. С ростом сложности ФЭ, повышением объема их выпуска происходит как внедрение принципиально новых технологических процессов печати, так и «заимствование» наиболее прогрессивных из других направлений техники ПС.

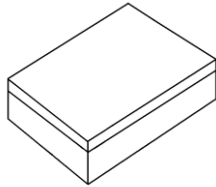
Ниже рассмотрены методы получения и конфигурирования слоев применительно к тем видам ПС, при изготовлении которых в настоящее время они применяются наиболее широко.

## 4.2. Печатные платы

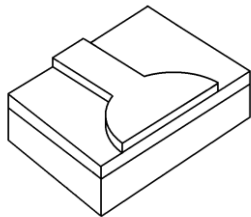
Техника ПП стала первым, успешно развившимся направлением техники ПС. В немалой степени этому способствовало промышленное освоение специализированными предприятиями в 50-е годы выпуска фольгированных диэлектриков. Основной способ получения токопроводящего рисунка в те годы заключался в удалении химическим травлением участков фольги, незащищенных КМ. Позднее его стали называть субтрактивным (от англ. to subtract – вычитать). Альтернативный способ, появившийся в 60-е годы, заключался в химическом осаждении меди на нужные участки нефольгированного диэлектрика. Этот метод стали называть аддитивным (от англ. to add – прибавлять), примеры см. ниже.

Примеры изготовления ПП с получением токопроводящего рисунка субтрактивным и аддитивным методами

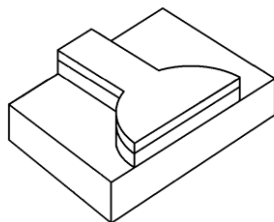
Субтрактивный метод



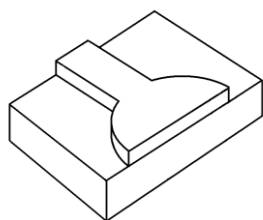
1. Заготовка фольгированного диэлектрика



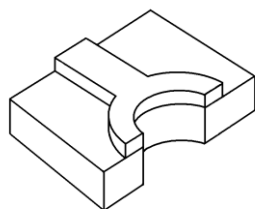
2. Получение КМ



3. Травление фольги

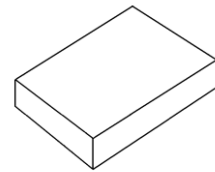


4. Снятие КМ

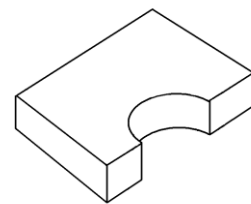


5. Получение отверстий

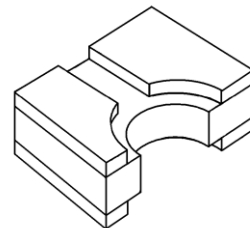
Аддитивный метод



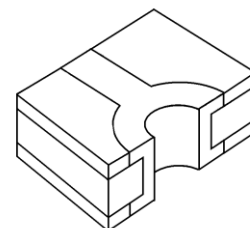
1. Заготовка нефольгированного диэлектрика



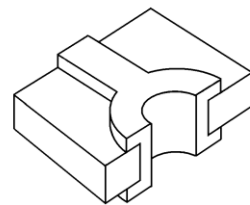
2. Получение отверстий



3. Получение КМ



4. Химическое меднение



5. Снятие КМ

Среди множества известных конструктивно – технологических вариантов исполнения ПП (а запатентовано их не одна сотня) наибольшее практическое применение (согласно ГОСТ 23751–86. Платы печатные. Основные параметры конструкции) получили (рис. 4.11):

- односторонние ПП (ОПП) – содержат один токопроводящий слой;
- двусторонние ПП (ДПП) – содержат два токопроводящих слоя;
- многослойные ПП (МПП) – содержат три и более токопроводящих слоя;
- гибкие ПП (ГПП);
- гибкие печатные кабели (ГПК).

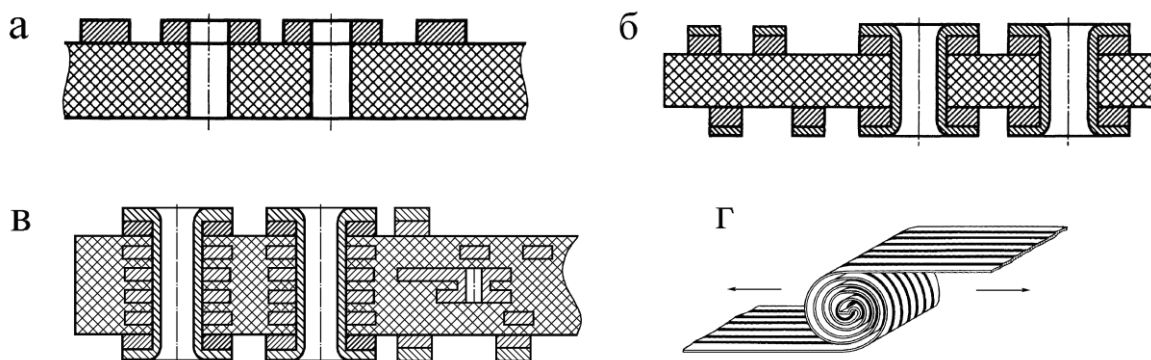


Рис. 4.11. Основные типы ПП:  
а – ОПП; б – ДПП; в – МПП; г – ГПК

### Основные конструкционные материалы для изготовления ПП

К ним относят фольгированные и нефольгированные диэлектрики и прокладочную стеклоткань.

Для изготовления фольгированных диэлектриков применяют чаще всего медную электролитическую фольгу чистотой не менее, чем 99,5% и толщиной от единиц до нескольких десятков мкм.

В качестве диэлектрического основания наибольшее распространение получили слоистые пластики, армированные волокнистыми материалами, – гетинаксы и стеклотекстолиты.

Фольгированные гетинаксы представляют собой прессованный материал, изготовленный на основе электроизоляционной бумаги (наполнитель), пропитанной термореактивной фенольной смолой (связующее), и облицованный с одной или с двух сторон медной электролитической фольгой. Фольгированные гетинаксы сравнительно дешевы, неплохо обрабатываются механически. Основное их применение – ПП для бытовой аппаратуры.

В фольгированных стеклотекстолитах (рис. 4.12) наполнителем является стеклоткань (ткань из пучков тонких стеклянных нитей), а

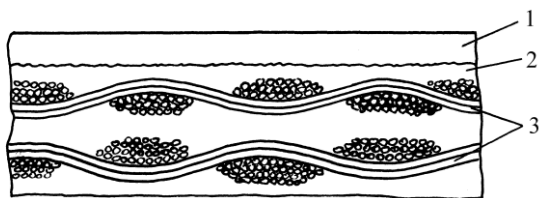


Рис. 4.12. Структура фольгированного стеклотекстолита:  
1 – медная фольга; 2 – связующее;  
3 – наполнитель (стеклоткань)

изготовления фольгированного стеклотекстолита на специализированном предприятии показан на рис. 4.13.

связующим – эпоксидная смола, отверждаемая фенолформальдегидной смолой. По сравнению с гетинаксами, стеклотекстолиты имеют лучшие механические и электрические характеристики, более высокую нагревостойкость, меньшее влагопоглощение, но худшую механическую обрабатываемость и более высокую стоимость. Пример

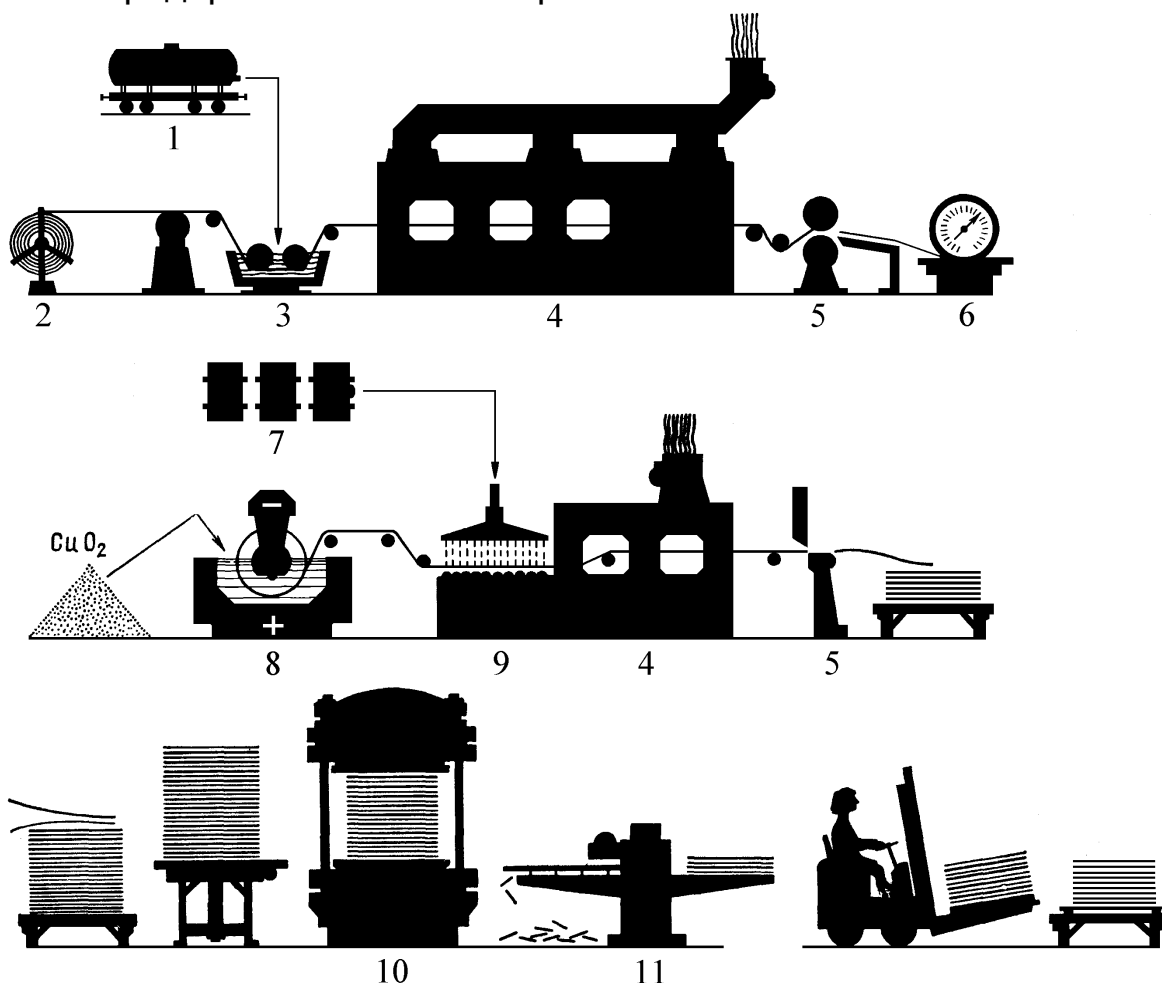


Рис. 4.13. Схема технологического процесса изготовления фольгированного стеклотекстолита:

- 1 – смола; 2 – стеклоткань; 3 – пропитка; 4 – сушка; 5 – резка;  
6 – дозирование; 7 – клей; 8 – осаждение медной фольги; 9 – нанесение слоя клея; 10 – прессование; 11 – обрезка

Для изготовления ОПП и ДПП чаще всего применяют фольгированные гетинаксы и стеклотекстолиты марок ГФ и СФ (например, СФ2–35–1,5, где цифры означают: 2 – двусторонний фольгированный



материал; 35 – толщина фольги в мкм; 1,5 – общая толщина в мм).

Для изготовления МПП используют тонкие фольгированные диэлектрики (стеклотекстолиты) и прокладочную стеклоткань, пропитанную не полностью полимеризованной смолой (в стадии «В»).

Для изготовления ГПП и ГПК, способных выдерживать многократные изгибы, применяют фольгированные лавсан (полиэтилентерефталат) и полиимид. Полиимидные пленки обладают лучшими характеристиками (близкие значения коэффициента линейного расширения полиимида и меди, диапазон рабочих температур от  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , отличная гибкость и химстойкость и т.д.), но стоимость их выше лавсановых.

В аддитивной или полуаддитивной технологиях основанием платы служат нефольгированные диэлектрики, на поверхность которых в состоянии поставки могут быть нанесены адгезионные слои (для лучшего сцепления осаждаемой меди с основанием).

Применяя фольгированные диэлектрики с 5-микронной фольгой (например, СТПА–2–5), можно изготавливать ПП с высокой плотностью монтажа. Медная фольга этих диэлектриков в состоянии поставки защищена от возможных повреждений при хранении, транспортировке и сверлении отверстий медным или алюминиевым листовым протектором толщиной 50-70 мкм (рис.4.14).

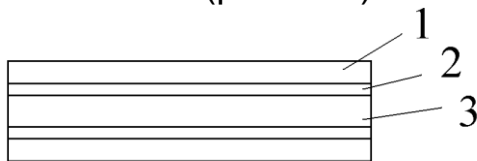


Рис. 4.14. Фольгированный диэлектрик с протектором:  
1 – протектор; 2 – фольга; 3 – диэлектрик

Схемы типовых технологических процессов изготовления ОПП, ДПП и МПП приведены в табл. 4.1...4.4.

Таблица 4.1

Основные операции технологического процесса  
изготовления ОПП (химический метод)

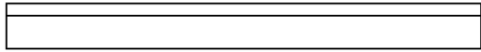
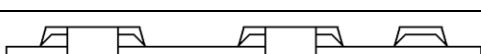
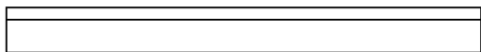

№	Основные операции	Эскиз
1	Получение заготовок	
2	Получение КМ (с использованием ФР или трафаретной печати)	
3	Травление меди с пробельных мест	
4	Снятие КМ	
5а	Сверление отверстий	
6а		
7а	Получение контура	---
5б	Лужение	
6б	Получение отверстий и контура штамповкой	

Таблица 4.2

Основные операции технологического процесса  
изготовления ДПП (базовый метод)

№	Основные операции	Эскиз
1	Получение заготовок	
2	Сверление монтажных отверстий на станке с ЧПУ (при использовании диэлектрика с протектором последний после сверления снимают)	

Окончание табл. 4.2


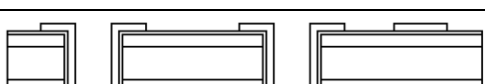
№	Основные операции	Эскиз
3	Химическое и предварительное гальваническое меднение	
4	Получение КМ из СПФ	
5	Гальваническое осаждение меди (окончательное) и металлорезиста (обычно ПОС61)	
6	Снятие КМ	
7	Травление меди с пробельных мест	
8	Оплавление ПОС 61	
9	Получение крепежных отверстий и контура	---

Таблица 4.3

Основные операции технологического процесса изготовления ДПП (полуаддитивный метод)

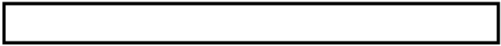


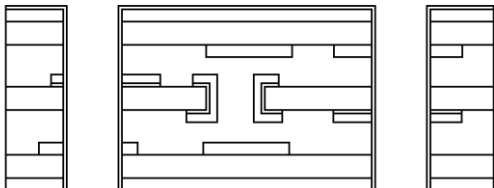
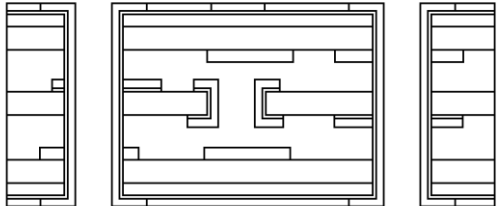
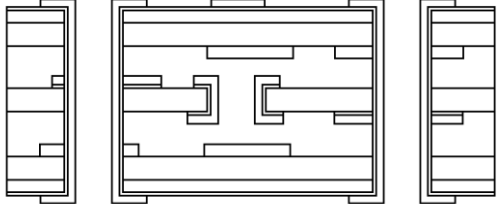
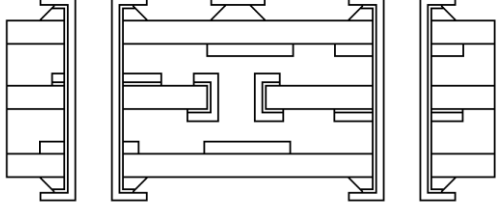
№	Основные операции	Эскиз
1	Получение заготовок	
3	Химическое и предварительное гальваническое меднение	
4	Получение КМ	
5	Гальваническое осаждение меди (окончательное)	
6	Снятие КМ	
7	Дифференциальное травление меди с пробельных мест	

Таблица 4.4

Основные операции технологического процесса  
изготовления МПП со сквозными металлизированными  
отверстиями

№	Основные операции	Эскиз
1	Изготовление слоев: а) без металлизированных отверстий – пп. 1-4 табл. 4.1; б) с металлизированными отверстиями – табл. 4.3	---
2	Сборка пакета для прессования (между отдельными слоями – прокладочная стеклоткань)	
3	Прессование	
4	Сверление отверстий с последующей очисткой торцов контактных площадок от наволакивания смолы	
5	Химическое и предварительное гальваническое меднение	
6	Получение КМ из СПФ	

№	Основные операции	Эскиз
7	Гальваническое осаждение меди (окончательное) и металлорезиста	
8	Снятие КМ	
9	Травление меди с пробельных мест	

Ниже рассмотрены технологические процессы, получившие преимущественное применение при изготовлении ПП.

### **Получение заготовок, фиксирующих и технологических отверстий**

Листовые материалы (фольгированные и нефольгированные диэлектрики, а также прокладочная стеклоткань) при поступлении на предприятие – изготовитель ПП подлежат разделению путем вырубki или отрезки. При выборе размеров заготовок принимается во внимание следующее:

- вокруг рисунка платы со всех четырех сторон должно быть предусмотрено технологическое поле шириной 10...30 мм, на котором располагаются фиксирующие и технологические отверстия (ФО и ТО), тестовые структуры и т.д.;

- количество типоразмеров заготовок должно быть минимальным;

- с целью наилучшей загрузки технологического оборудования рекомендуется использовать групповую заготовку, располагая на ней несколько плат через промежутки.

Получение заготовок обычно выполняется в два приема. Сначала листы режутся на полосы, а затем полосы режутся на заготовки (рис. 4.15).

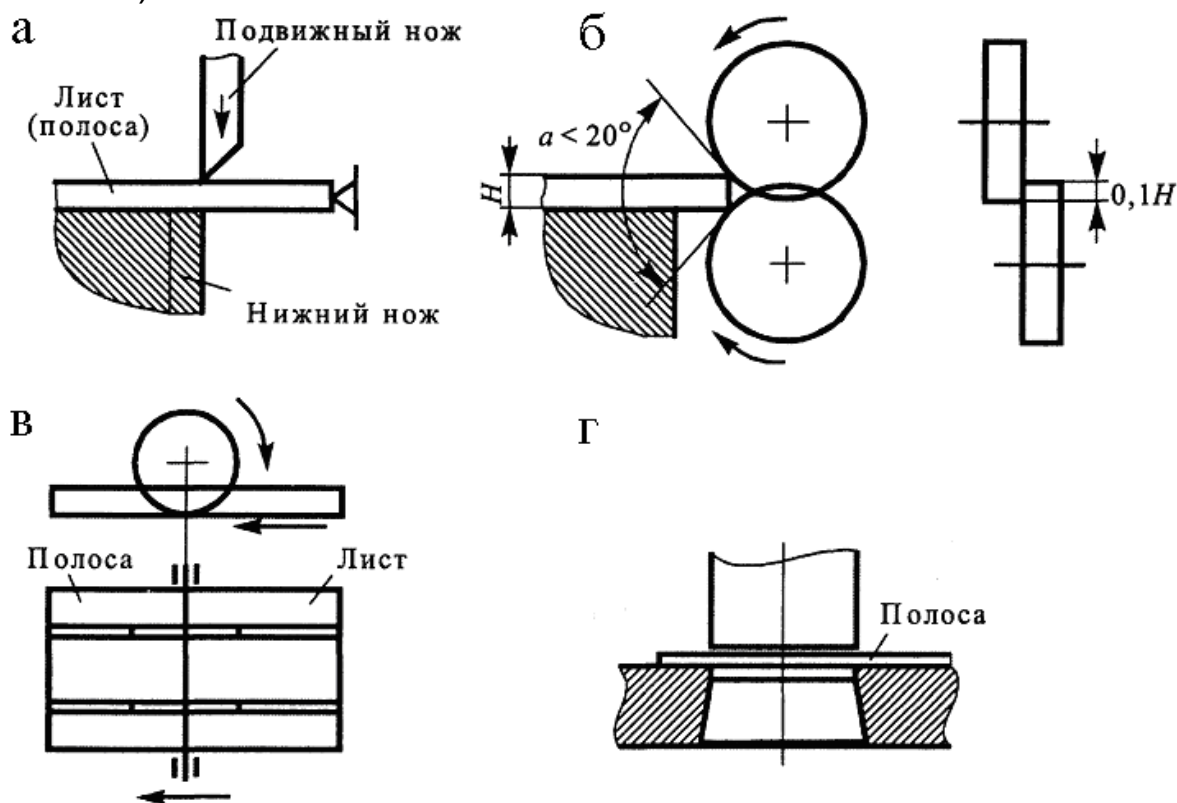


Рис. 4. 15. Получение заготовок: резанием на гильотинных (а) и роликовых (б) ножницах, дисковыми фрезами (в) и штамповкой (г)

ФО предназначены для обеспечения точного взаимного расположения заготовок ПП и отдельных слоев МПП в процессе обработки: копирования рисунка с рабочего фотошаблона, сверления монтажных отверстий и т.д. ФО, выполняемые в заготовках и рабочих фотошаблонах, должны совпадать между собой, а также соответствовать расположению штырей на подплатнике сверлильного станка и в пресс-форме.

На технологическом поле слоев МПП, а также в прокладочной стеклоткани, кроме ФО, выполняют еще и ТО. Их назначение – предотвратить относительное смещение заготовок слоев МПП в процессе прессования.

ФО и ТО получают пробивкой на кривошипных прессах (высокая точность и производительность) или сверлением.

### Получение монтажных и переходных отверстий

Монтажные отверстия в ПП могут быть как металлизированными, так и неметаллизированными. Основной способ их получения – свер-

ление. Сверление создает определенную микрошероховатость стенок отверстий, необходимую для качественной металлизации.

При больших сериях и невысокой плотности монтажа неметаллизируемые отверстия получают штамповкой.

Для сверления отверстий в стеклопластиках наилучшие результаты по стойкости дают сверла, изготовленные из твердых сплавов, например типа ВК (смесь металлического кобальта и карбидов вольфрама).

Рост плотности печатного монтажа привел к необходимости создания специальных станков для сверления отверстий в ПП с высокой точностью и производительностью.

Специальные станки для сверления отверстий в ПП должны обеспечивать точность позиционирования не хуже, чем 0,025 мм. С целью повышения производительности в них предусмотрено:

несколько (до 8) синхронно работающих шпинделей с соответствующим количеством посадочных мест;

возможность пакетной обработки заготовок (до 4...5 на одном посадочном месте);

автоматическая смена сверл по программе;

быстродействующие электроприводы перемещения стола по осям X и Y и подача инструмента по оси Z.

Наибольшее распространение получили четырехшпиндельные станки (рис. 4.16).

В лучших моделях станков станина выполнена из черного гранита, коэффициент линейного расширения которого едва поддается измерению. Это означает, что все размеры основных посадочных отверстий сохраняются стабильными. Соотношение большой массы станины с малой массой передвигного рабочего стола (как правило, 40:1) обеспечивает возможность использования больших ускорений и торможений при сохранении стабильности самого станка.

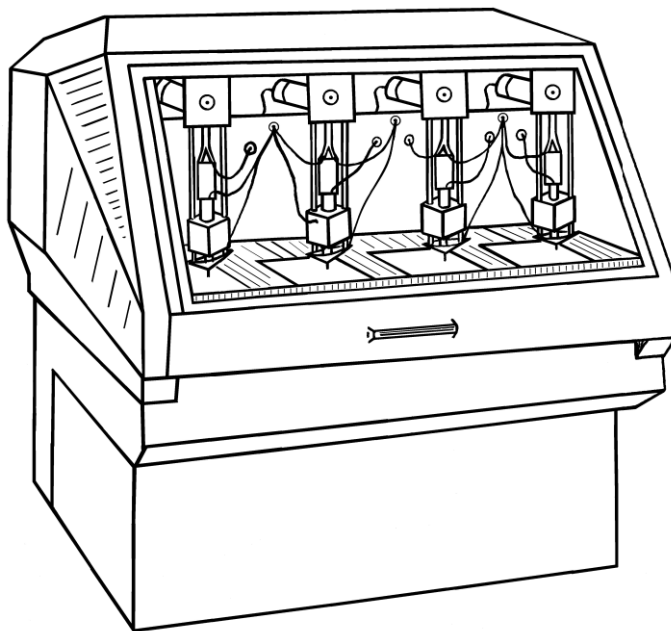


Рис. 4. 16. Четырехшпиндельный станок

В современных конструкциях МПП используются микропереходы (рис. 4.17), что позволяет повысить плотность коммутации при том же количестве слоев.

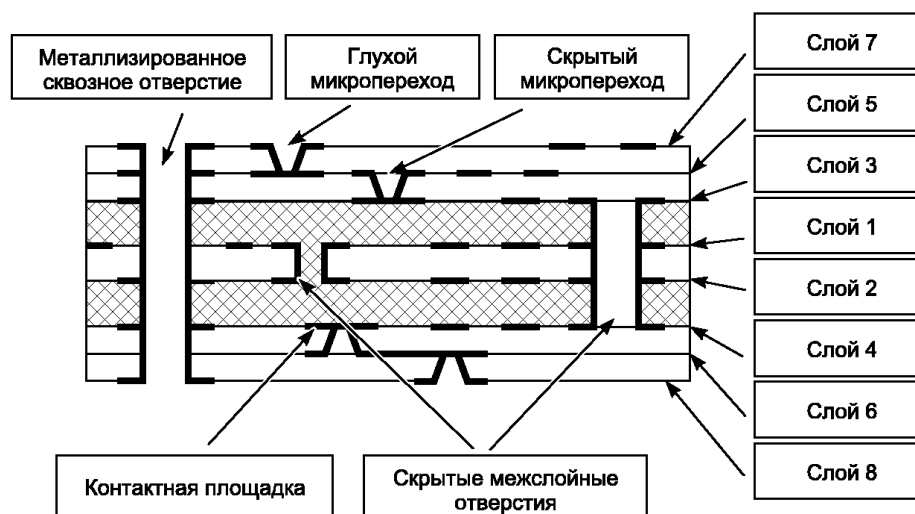


Рис. 4.17. Конструкция МПП для высокоинтегрированной элементной базы

Тенденция к уменьшению диаметров отверстий, а также появление глухих отверстий привели к возникновению новых методов их получения – лазерному сверлению и химическому травлению, позволяющим получать отверстия диаметром менее 0,1 мм.

### Обработка контура

Для обработки контура ПП применяют штамповку, обрезку алмазным кругом и фрезерование. Штамповка ПП из стеклотекстолита часто сопровождается появлением по контуру поверхностных сколов и посветлений.

Более качественный срез получают алмазной обработкой и фрезерованием. Резка прецизионными алмазными пилами и дисковыми фрезами, оснащенными твердосплавными пластинками, применяется для получения прямолинейного контура ПП. Сложный контур, содержащий криволинейные участки, обрабатывают концевыми фрезами (рис. 4.18), изготовляемыми из твердого сплава типа ВК, на фрезер-

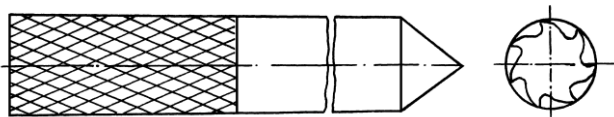


Рис. 4.18. Твердосплавная концевая фреза

ных или сверлильно-фрезерных станках, как одно- так и многшпиндельных. К новым методам формирования контура от-

носится программируемое лазерное фрезерование.



## Подготовка поверхности

Подготовка поверхности фольги и диэлектрика включает в себя процессы очистки их от различного рода загрязнений, а также изменения состояния поверхностей (выглаживания, придание шероховатости). Подготовка поверхностей в производстве ПП осуществляют на многих этапах: перед нанесением фоторезиста или трафаретной краски, до и после травления, перед и в течение химической и гальванической металлизации, при подготовке слоев МПП перед прессованием и т.д. Основные способы очистки: механический, химический, комбинированный (сочетающий два предыдущих способа) и электрохимический.

Механическая зачистка поверхности фольгированных диэлектриков применяется для удаления окислов, остатков смазки, пленок и других загрязнений. Ее осуществляют на специальных зачистных станках (рис. 4.19) и на установках гидроабразивной очистки.

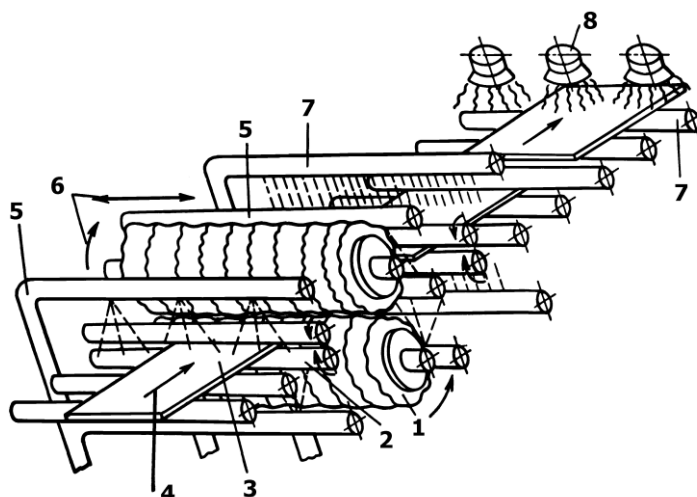


Рис. 4.19. Схема зачистного станка:

- 1 – абразивные щетки; 2 – транспортирующие валки; 3 – заготовка;
- 4 – направление движения заготовки; 5 – подача абразивной суспензии;
- 6 – направления движения абразивных щеток; 7 – подача сжатого воздуха;
- 8 – теплоизлучатели

К химическим процессам очистки относятся: обезжиривание, декапирование и подтравливание. Обезжиривание обычно проводят в щелочных растворах (тринатрийфосфат, сода кальцинированная, моющие средства и т.п.). Перед гальваническим осаждением иногда применяют электролитическое обезжиривание фольги. В этом случае заготовка подключается как анод или катод (последнее предпочтительнее). Интенсивное выделение газа на электродах ( $H_2$  на катоде и  $O_2$  на аноде) обеспечивает бурное перемешивание жидкости вблизи

очищаемых поверхностей и, как следствие, хорошую очистку. Декапирование применяется для удаления с поверхности фольги очень тонких слоев окислов (потускнений), быстро образующихся при воздействии воздуха и влаги. Декапирование обычно проводят в растворах серной или соляной кислот. Подтравливание медных поверхностей (например, в растворе смеси серной кислоты с бихроматами) применяется для удаления плотно сидящих слоев окислов и других соединений.

Наибольшие трудности обычно вызывает очистка поверхности отверстий в МПП перед металлизацией, в частности удаление пленок смолы, образующихся при сверлении отверстий и покрывающих торцы контактных площадок внутренних слоев. Для снятия наволакивания смолы с торцов контактных площадок применяются следующие методы: подтравливание стенок отверстий в смеси серной и плавиковой кислот, гидроабразивная очистка, а также ионное травление смолы в среде высокочастотной плазмы газов.

## Металлизация

Основные цели металлизации в производстве ПП:

- получение на стенках монтажных и переходных отверстий токопроводящего покрытия, электрически соединяющего отдельные слои;
- получение всего токопроводящего рисунка ПП (в аддитивных процессах);
- осаждение на токопроводящий рисунок слоя металла или сплава, защищающего медь от последующего травления и от коррозии при эксплуатации печатного узла, а также создающего условия для пайки при монтаже навесных компонентов;
- нанесение покрытия на концевые печатные контакты (ламели).

Металлизация в производстве ПП чаще всего выполняется химическим (обычно меднение) и гальваническим методами.

*Химическое меднение* (ХМ) в производстве ПП применяется главным образом для получения на стенках отверстий токопроводящего подслоя (толщиной 0,5...1,5 мкм). В дальнейшем на этот подслой осаждается гальваническая медь до требуемой КД толщины (обычно не менее 25 мкм).

При изготовлении ПП аддитивным методом проводящий рисунок на обеих сторонах платы и в отверстиях получают только химическим меднением, осаждавая довольно толстый слой металла.

ХМ представляет собой достаточно сложный процесс, основой которого является реакция восстановления меди из растворов ее солей. Реакция протекает в присутствии катализатора (обычно металли-

ческого палладия) и относится к категории автокаталитических, т.е. начинается она под действием катализатора, а затем образовавшиеся кристаллы меди сами катализируют дальнейшее выделение меди и процесс происходит уже самопроизвольно. Стандартный процесс ХМ состоит из следующих операций: подготовка поверхности отверстий, сенсбилизация и активация, химическое осаждение меди. Кроме того, все операции сопровождаются многочисленными промывками в проточной воде, а также в ваннах со сборниками палладия (после активации).

Сенсбилизация и активация проводятся с целью осаждения на диэлектрическую поверхность металлических частиц палладия, являющегося катализатором при последующем химическом осаждении меди. Сенсбилизация и активация выполняются путем отдельно-последовательной обработки в растворах двухлористого олова и хлористого палладия или одновременно в совмещенном растворе этих солей.

В состав раствора для ХМ входят: соли меди (являются источником  $\text{Cu}^{2+}$ ), комплексообразователь (предотвращает выпадение гидроокиси в растворе), восстановитель (обычно формалин – раствор формальдегида), различные добавки. Восстановление меди (захват ионом электрона от молекулы формальдегида) происходит на активной (содержащей катализатор) поверхности (рис. 4.20).

Процесс ХМ позволяет получать равномерные по толщине покрытия, не требует затрат внешней энергии (используется химическая энергия). Но в отличие от медной фольги, полученной гальваническим способом и имеющей кристаллическую структуру с плотной упаковкой атомов, химически осажденная медь образует более рыхлое (состоящее из отдельных частиц) и относительно слабо сцепленное с поверхностью покрытие. Это покрытие, по сравнению с фольгой, имеет худшие электрические (электропроводность) и механические (пластичность) характеристики. Кроме того, скорость химического осаждения меди (1... 2 мкм/ч) в десятки раз меньше скорости гальванического меднения. Поэтому после получения сплошного слоя химически осажденной меди его усиливают гальванически. При этом отдельные частицы осадка

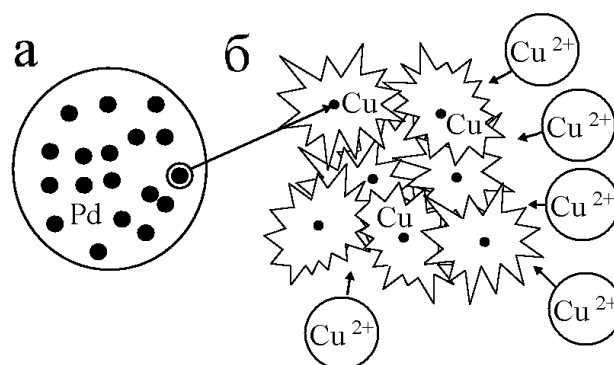


Рис. 4.20. Схема химической металлизации:

- а – катализация поверхности палладием;
- б – восстановление меди на центрах катализации

обволакиваются и соединяются гальванически восстановленной медью, образуя достаточно плотное покрытие, близкое по характеристикам к фольге. Химическое меднение ПП производят в специальных оснащенных автооператорами (рис. 4.21) линиях с набором ванн, в которых проводятся все операции, начиная с подготовки поверхности.

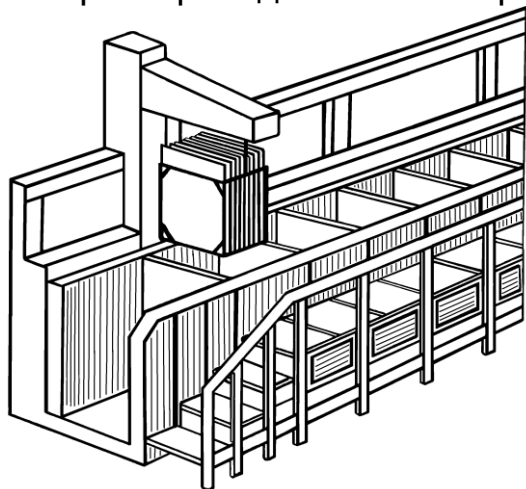


Рис. 4.21. Фрагмент автоматизированной линии металлизации с автооператором

Ванны оборудуются устройствами фильтрации и дозирования (для поддержания концентрации расходуемых компонентов – ионов меди, формалина и т.д.), системами поддержания заданной температуры и приводом качания плат, размещаемых в групповых подвесках. Качание ускоряет реакцию химического меднения (улучшает омывание более свежим раствором поверхностей, особенно отверстий малого диаметра) и способствует удалению выделяющегося при реакции водорода. Водород отрицательно влияет на качество металлизации (закупоривает

отверстия малого диаметра, а также поглощается палладием, в результате чего осажденная на этих участках медь имеет высокое и нестабильное электрическое сопротивление и низкую прочность сцепления).

В последнее время стандартный процесс химического меднения ПП все больше заменяется процессом прямой металлизации. Идея прямой металлизации заключается в создании на поверхности диэлектрика сплошной проводящей пленки (например, из соединений палладия или графита), на которую в дальнейшем осаждается гальваническая медь. Таким образом, процесс ХМ исключается полностью. По мнению специалистов, прямая металлизация обладает рядом важных преимуществ, таких как:

- облегчается решение проблем, связанных с очисткой сточных вод;
- упрощается технологический процесс металлизации;
- повышается качество и надежность металлизированных отверстий;
- расширяются возможности металлизации различных типов диэлектриков и т.д.

*Гальваническая металлизация (ГМ)* в производстве ПП обычно включает в себя следующие процессы: предварительное и основное меднение, осаждение сплава олово-свинец, осаждение благородных

металлов. В основе ГМ лежит процесс восстановления положительных ионов металла из электролита на токопроводящей поверхности, к которой подведен отрицательный потенциал относительно другого электрода – анода, изготовляемого обычно из осаждаемого металла (или сплава) и являющегося поставщиком его ионов в электролит. В качестве последних в производстве ПП применяют водные растворы солей осаждаемых металлов.

ГМ является управляемым процессом (в том числе автоматизированными методами), обеспечивает довольно высокую скорость осаждения пленок (до 100 и более мкм в час). Основным недостатком ГМ является не всегда достаточно равномерная толщина покрытия. Особенно это касается сложных поверхностей, к которым относятся металлизированные поверхности ПП (токопроводящий рисунок и стенки отверстий). Например, толщина гальванически осажденного металла в отверстиях ПП, как правило, меньше, чем на ее поверхности, а в центре заготовки она меньше, чем по краям. Это объясняется неравномерной концентрацией линий тока у поверхности катода. Поэтому, чтобы обеспечить минимальную толщину меди в отверстиях, находящихся в центре ПП (обычно это 25 мкм), приходится осаждать лишнюю медь в другие отверстия и на поверхность ПП, что приводит к нежелательному «разрастанию» проводников и контактных площадок (рис. 4.22).

На гальваническую медь осаждают сплав олово-свинец (толщиной 8...20 мкм), который защитит ее при последующем травлении и обеспечит паяемость при сборке. Чаще всего применяют эвтектический сплав ПОС61 (61%Sn-39%Pb).

Некоторые конструкции ПП предусматривают наличие концевых печатных контактов (ламель). Для обеспечения хорошего электрического соединения между пружинами колодки и печатными контактами последние необходимо покрыть металлами, обладающими малым переходным сопротивлением, хорошей износостойкостью и отсутствием каких-либо пленок, ухудшающих контактные свойства. В наибольшей степени перечисленным требованиям удовлетворяет покрытие из золота (толщина 2...3 мкм). Также применяются покрытия из палладия, родия, серебра и никеля.

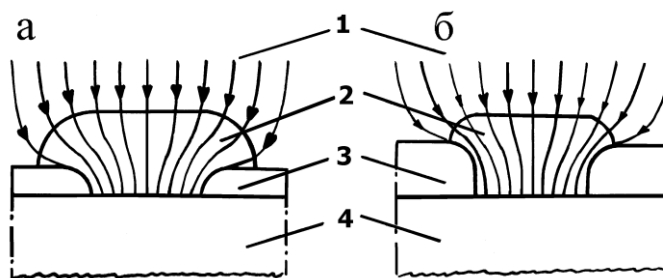


Рис. 4.22. Изменение размеров печатных элементов при ГМ :

- а – толщина ФР  $\approx$  10 мкм; б – толщина ФР  $\approx$  40 мкм; 1 – линии тока;
- 2 – гальваническая медь; 3 – КМ;
- 4 – фольгированный диэлектрик

Основным оборудованием, применяемым при электролитической металлизации, является гальваническая ванна, оснащенная механизмом качения катодной штанги (рис. 4.23).

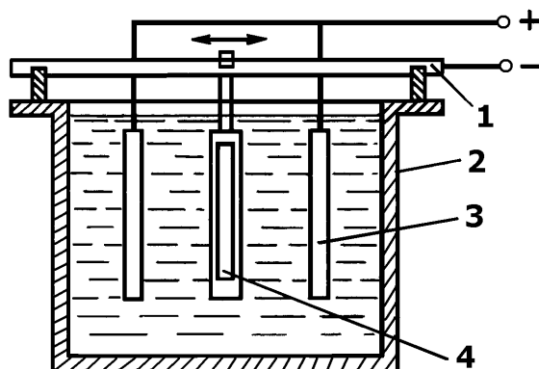


Рис. 4. 23. Схема гальванической металлизации ПП:  
1 – шина; 2 – ванна; 3 – аноды; 4 – ПП

В промышленных условиях химическую и гальваническую металлизацию ПП (в том числе осаждение сплава олово-свинец) выполняют на линиях, содержащих до 3...4 десятков ванн, смонтированных в общем каркасе длиной до 20...30 м. Линии обслуживаются одним или несколькими автооператорами с микропроцессорным управлением.

### Получение КМ

КМ в производстве ПП получают с использованием следующих видов резистов: ФР, трафаретных красок и осаждаемых гальванически металлических пленок (металлорезистов, например, сплав олово-свинец). По выполняемым функциям выделяют следующие типы КМ:

1. КМ, защищающие медь в растворах травления. Широко применяются все три вида резиста, поэтому его выбор определяется конкретными решаемыми задачами (например, требуемая разрешающая способность, себестоимость, наличие оборудования и т.п.).

2. Гальваностойкие КМ. Более жесткие условия гальванического осаждения по сравнению с травлением (агрессивность электролитов, наличие электрического поля, время обработки) предъявляют более высокие требования к стойкости резистов. Гальваностойкие КМ получают из ФР достаточной толщины (обычно СПФ), либо (в неотчетственных случаях) с использованием трафаретных красок.

3. Защитная маска (ЗМ). Защитная (паяльная) маска наносится на одну или обе стороны ПП. ЗМ образует рисунок, покрывающий поверхность проводников и диэлектрика за исключением мест будущих паяк (контактных площадок), печатных разъемов и контрольных точек. ЗМ может наноситься на печатный рисунок как с покрытием (напри-

мер, олово-свинец), так и без него (непосредственно на медь). Последний случай является более предпочтительным, так как в процессе пайки припой под ЗМ может расплавиться и привести к вздутиям ЗМ или замыканиям. Поэтому оловянно–свинцовый резист перед нанесением ЗМ часто удаляют. ЗМ получают трафаретной печатью (для несложных ПП) или с использованием жидких и сухих ФР.

4. Маркировка. Маркировочные знаки указывают, где и какой элемент должен монтироваться на плату. Их наносят обычно трафаретной печатью до или после нанесения ЗМ.

В производстве ПП для получения КМ наиболее широко применяется СПФ, представляющий собой трехслойную пленку: загущенный раствор фотополимера, заключенный между полиэтиленовой (защитной) и лавсановой (прозрачной для УФ лучей) пленками толщиной 25 мкм (рис. 4.24). СПФ наносят на одну или обе (одновременно) стороны заготовки ПП на специальных установках – ламинаторах (рис. 4.25)

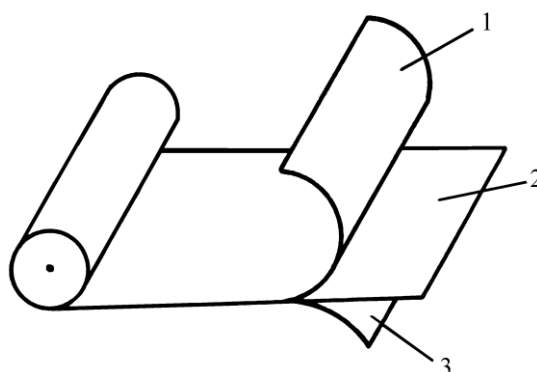


Рис. 4.24. Структура СПФ:  
1 – полиэтиленовая пленка; 2 – светочувствительный состав; 3 – лавсановая пленка

С использованием СПФ получают КМ, защищающие медь при травлении и гальваническом осаждении (например, СПФ-2 с толщиной светочувствительного слоя 20, 40 и 60 мкм, проявление и снятие которого осуществляется в органических (весьма токсичных) растворителях, или СПФ-Вщ, обрабатываемый в слабощелочных растворах), а также в качестве ЗМ (например, СПФ3 – защитный СПФ).

Если СПФ-2 и СПФ-Вщ наносят на гладкие поверхности (в том числе с заранее просверленными и металлизированными отверстиями), то СПФ3 наносят на рельефные поверхности с вытравленным печатным рисунком. В последнем случае используют вакуумные ламинаторы, в которых СПФ3 напрессовывается на поверхность ПП в вакууме при повышенной температуре. Заготовка ПП и СПФ3 располагаются в рабочей камере между двух эластичных мембран. При создании вакуума в рабочей камере мембраны под действием атмосферного воздуха прижимают СПФ3 к заготовке.

## Травление меди

В производстве ПП участки меди, не защищенные резистом, обычно удаляют жидким химическим травлением. Растворы для травления должны удовлетворять ряду требований: высокая скорость травления; взаимодействие раствора и продуктов реакции с защитным слоем резиста и изоляционным материалом подложки должно быть минимальным; раствор должен быть дешевым и недефицитным, безопасным в работе и приготовлении, легко подвергаться регенерации (т.е. восстановлению меди, так как 60...90% фольги уходит при травлении в раствор) и т.д. В промышленных условиях наиболее часто применяются растворы на основе хлорного железа (высокая скорость травления, но не подвергается регенерации и разрушает оловянно-свинцовые резисты) и хлорной меди (меньшая скорость травления, но подвергается регенерации и не разрушает оловянно-свинцовые резисты).

Для улучшения разрешающей способности применяют:

- материалы с тонкой медной фольгой (5 мкм);
- струйную подачу травильного раствора (фактор травления 1,3...1,5).

В промышленных установках в основном применяется двусторонняя (одновременно на обе стороны заготовки) вертикальная (свер-

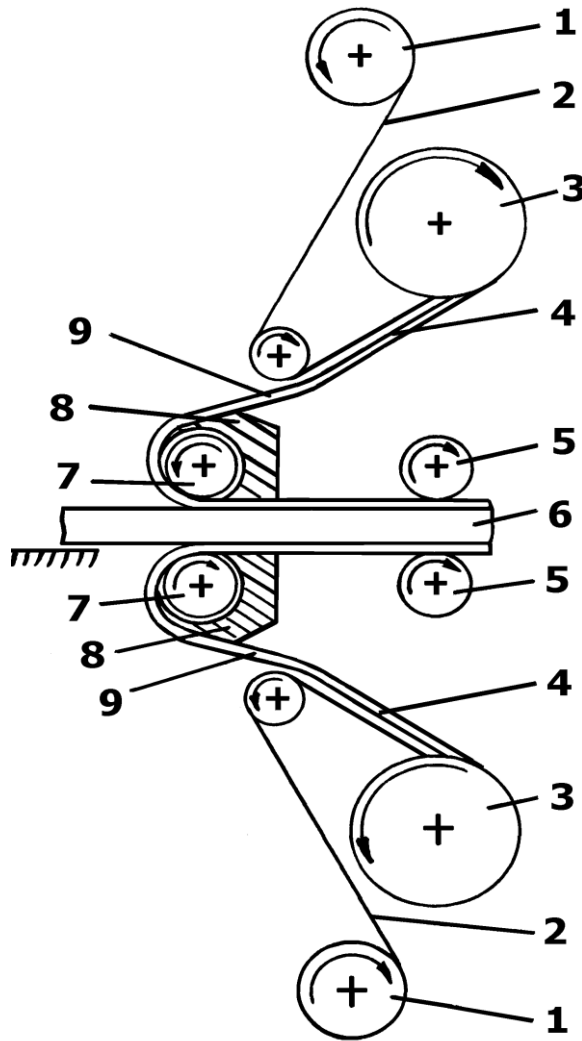


Рис. 4. 25. Схема установки для нанесения СПФ:

1 – наматывающие катушки для полиэтиленовой пленки; 2 – полиэтиленовая пленка; 3 – сматывающая катушка с СПФ; 4 – СПФ; 5 – транспортирующие валки; 6 – заготовка с нанесенным СПФ; 7 – накатывающие валики; 8 – нагревающие башмаки; 9 – светочувствительный слой с лавсановой пленкой



ху и снизу) струйная подача травильного раствора к заготовке, расположенной горизонтально и перемещаемой по конвейеру (рис. 4.26).

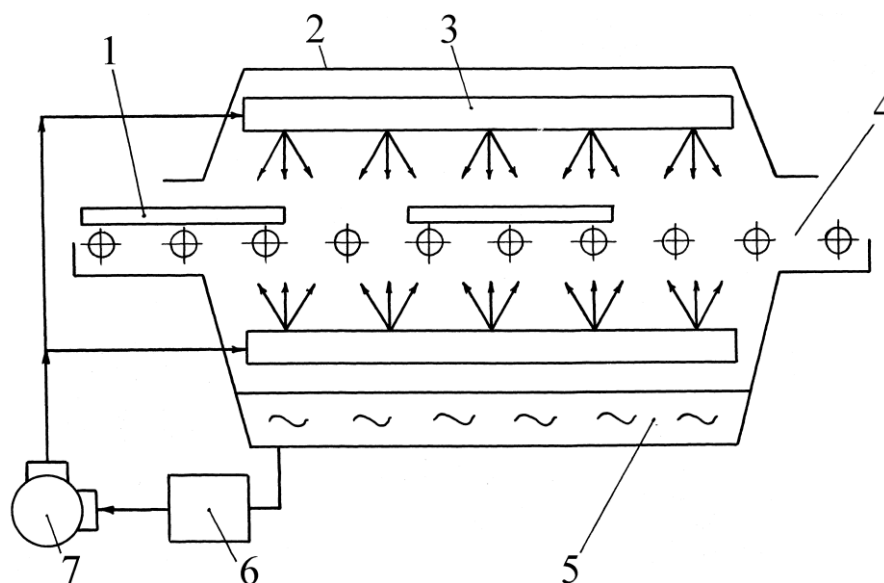


Рис. 4. 26. Схема установки струйного травления:  
 1 – заготовка; 2 – корпус; 3 – разбрызгивающее устройство; 4 – конвейер;  
 5 – травильный раствор; 6 – регенератор отработанного раствора;  
 7 – система трубопроводов с насосом

### Осветление и оплавление покрытия олово-свинец

В процессе травления ПП в щелочном растворе хлорной меди оловянно-свинцовое покрытие частично разрушается, образуя на поверхности темный налет (шлам) в виде продуктов реакции, который препятствует выполнению последующих операций (оплавлению или пайке выводов ЭРЭ). Для удаления травильного шлама с поверхности покрытия платы обрабатывают в течение 3...5 мин, в так называемом осветляющем растворе (тиомочевина + соляная или борфтористоводородная кислота + добавки). Осветление может производиться на линии травления (в едином цикле с травлением) или в отдельной установке.

Гальванически осажденное покрытие олово-свинец после травления меди и осветления имеет пористую структуру, быстро окисляется, теряя способность к пайке. Создается эффект нависания покрытия (рис. 4.27). Для устранения этих недостатков производят оплавление металлорезиста. В результате оплавления при кратковременном воздействии температуры, превышающей точку плавления сплава олово-свинец, происходит изменение физического состояния и кристаллической структуры покрытия. Поверхность покрытия становится гладкой, блестящей, не корродирует в течение длительного

времени. Платы приобретают хорошую паяемость. Оплавленные кромки металлорезиста за счет сил поверхностного натяжения смачивают боковые поверхности проводников, предохраняя их от коррозии.

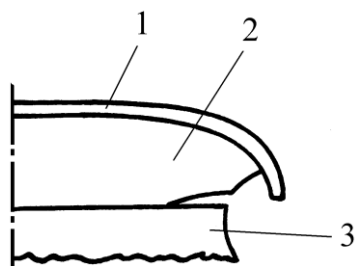


Рис. 4.27. Профиль печатного проводника после травления:  
1 – металлорезист;  
2 – гальваническая медь;  
3 – фольга

Оплавление может производиться погружением платы в нагретый до  $230 \pm 10^\circ\text{C}$  теплоноситель, в качестве которого используют жидкости, обладающие устойчивостью при этой температуре (например, олигоэфир ОЖ-1). Лучшие результаты по качеству и производительности дает оплавление на конвейерных линиях: на волне теплоносителя ОЖ-1 и с инфракрасным нагревом. Оплавлению обычно предшествует флюсование в спиртоканифольном флюсе.

### Лужение

В некоторых вариантах технологических процессов изготовления ПП припойные покрытия на поверхности медного рисунка (всего или части) наносятся методом горячего лужения. В промышленности применяют два способа горячего лужения ПП. Первый способ предусматривает нанесение на плату расплавленного припоя в избыточном количестве с последующим выравниванием его слоя по поверхности проводящего рисунка и удалением излишков. Припой может наноситься методом погружения в него платы, поливом с последующим центрифугированием или волной (рис. 4.28).

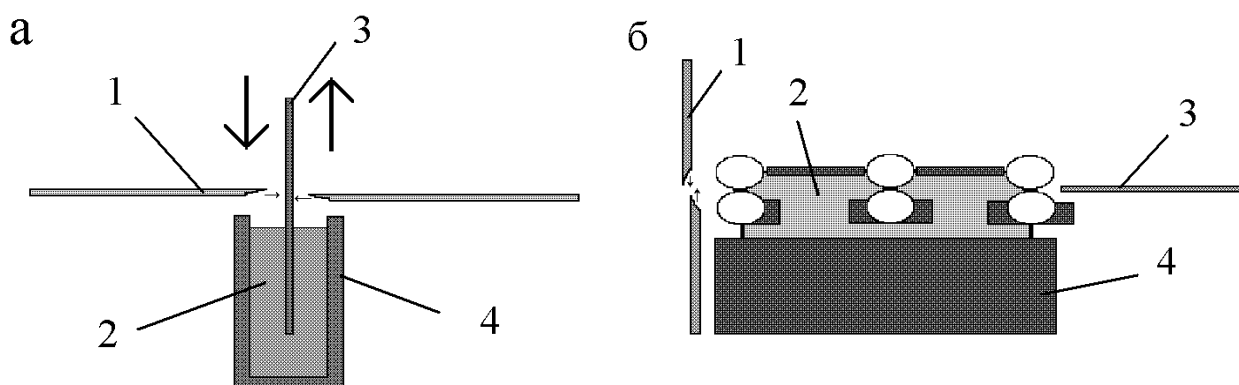


Рис. 4.28. Лужение с выравниванием припоя горячим воздухом в установках вертикального (а) и горизонтального (б) типов:

1 – воздушные ножи; 2 – припой; 3 – ПП; 4 – емкость с припоем

Это осуществляется с помощью специальных паст или валками, вращающимися в расплавленном припое.

## Прессование

Прессованием в производстве МПП обычно называют осуществляемый при повышенных температуре и давлении процесс соединения отдельных заготовок слоев в монолитную конструкцию с помощью склеивающих прокладок. Заготовки слоев МПП представляют собой одно- или двусторонние ПП, содержащие вокруг рисунка технологическое поле, на котором выполнены фиксирующие и технологические отверстия.

Прессование является наиболее ответственным этапом процесса изготовления МПП. Качество выполнения этого этапа в значительной степени определяет как электрические и механические характеристики МПП, так и ее функциональную надежность при последующей эксплуатации.

В качестве склеивающих прокладок применяют листы прокладочной стеклоткани, которая обеспечивает: прочное сцепление слоев между собой; заполнение вытравленных участков медной фольги; необходимые зазоры между слоями; электрические параметры (сопротивление, прочность) между слоями; заданную толщину МПП.

Процесс прессования включает в себя следующие основные операции: подготовку заготовок слоев, формирование пакета, прессование (склеивание).

Заготовки слоев МПП очищают от загрязнений механическим способом или в установках для химической подготовки внутренних слоев, содержащих модули обезжиривания, промывки в проточной и дистиллированной воде, декапирования и сушки. Тщательность выполнения очистки определяет электроизоляционные параметры МПП, так как оставшиеся не удаленными ионные примеси загрязнений при повышенной влажности могут вызвать изменение сопротивления изоляции между проводниками, утечку тока, миграцию ионов металла и другие процессы.

Прессование (склеивание) осуществляется в пресс-формах, состоящих из двух стальных плит. В нижней плите закреплены фиксирующие штыри в координатах, соответствующих расположению ФО и ТО в заготовках слоев и прокладочной стеклоткани. Верхняя плита содержит отверстия, позволяющие надевать ее на фиксирующие штыри. Длина штырей должна превышать суммарную толщину размещаемого в пресс-форме пакета, но при этом штыри не должны выступать за поверхность верхней плиты.

В одной пресс-форме устанавливают до трех пакетов заготовок МПП. В этом случае между пакетами необходимо проложить лист из нержавеющей стали толщиной 1,0...1,5 мм.

Собранные пресс-формы устанавливают (вручную или с помощью подъемного устройства) между плитами пресса (одна пресс-форма между одной парой плит). Для прессования МПП применяют специализированные многоярусные гидравлические прессы с полу- или полностью автоматической системой управления. Многоярусный принцип позволяет за один цикл одновременно прессовать МПП в нескольких пресс-формах. Плиты пресса оборудованы встроенными системами нагрева и охлаждения. Двухъярусный пресс, открытый для загрузки, показан на рис. 4.29.

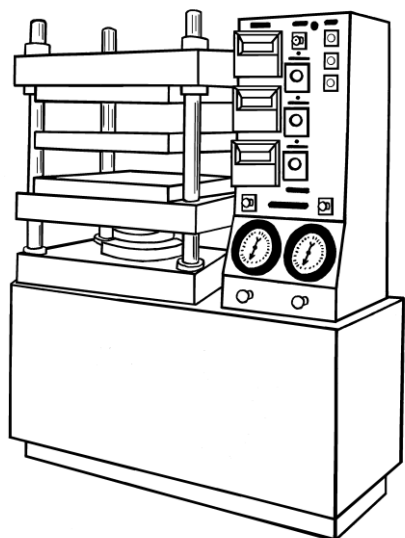


Рис. 4. 29. Двухъярусный пресс для изготовления МПП

Операцию прессования обычно выполняют следующим образом. Собранные пресс-формы помещают между плитами пресса, которые должны быть нагреты до температуры  $175 \pm 5^\circ\text{C}$ . Далее плиты пресса приводят в соприкосновение с пресс-формой и предварительно сжимают их с удельным давлением около 100 кПа, что обеспечивает нагрев пакета с использованием его теплопроводности. По мере нагрева смола прокладочной стеклоткани расплавляется, смачивает слои, заполняет полости и вытесняет воздух из зазоров между слоями. Внешне это проявляется в виде пузырей на кромках пакета, где также выделяется смола. В этот момент температура смолы составляет около  $120^\circ\text{C}$ . С ростом температуры и продолжительности воздействия начинается этап желатинизации смолы (переход в состояние геля). Смола перестает течь, пузырится, вязкость ее нарастает. В этот момент плиты пресса необходимо сжать с удельным давлением 2...4 МПа (в зависимости от типа и состояния связующего) и выдерживать в течение 0,5...1 ч. Температура пакета быстро приблизится к температуре плит, ускоряя процесс необратимой полимеризации смолы и склеивания слоев. После окончания полимеризации плиты пресса охлаждают. Во избежание коробления плат охлаждение производится без снятия давления. Важным фактором процесса прессования является момент приложения второй степени давления. Если она приложена до стадии желатинизации, то большое количество жидкой смолы выдавливается и в плате образуются обессмоленные участки. Если давление создают после стадии желатинизации, то смола, переходящая в твердое состояние, дробится, образуя пустоты, а между слоями ухудшается связь.

Взаимосвязь изменений температуры, давления и объемного электрического сопротивления изоляции прокладочной стеклоткани в процессе прессования показана на рис. 4.30.

Для повышения производительности и сокращения технологического цикла применяют раздельное прессование на линии, состоящей из двух рядом расположенных прессов, плиты одного из которых должны быть постоянно нагреты до температуры прессования, а плиты другого – постоянно охлаждены. Во втором прессе производится только охлаждение плат под давлением.

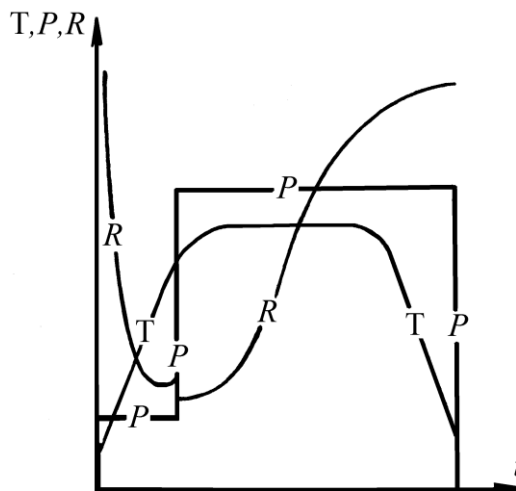


Рис. 4.30. Характер изменения температуры ( $T$ ), давления ( $P$ ) и сопротивления изоляции прокладочной стеклоткани ( $R$ ) в процессе прессования МПП

### Контроль и испытания

Технологические процессы изготовления ПП (и особенно МПП) относятся к категории сложных, многооперационных и многофакторных процессов. Действие большого количества неконтролируемых и неуправляемых факторов приводит к нестабильности свойств получаемой продукции, различного рода дефектам (дефект – каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям). Причинами дефектов ПП принято считать скрытые дефекты исходных материалов, нестабильность технологического процесса, субъективные ошибки рабочих. В производстве ПП дефекты могут возникать на самых различных этапах ТП. Поэтому, чтобы не допустить дефектные материалы и полуфабрикаты на последующие стадии обработки, в ТП вводятся операции технического контроля.

Контролируемые характеристики могут быть качественными (например, наличие или отсутствие признаков) или количественными (измеряемыми признаками). В зависимости от этапа процесса производства контроль может быть входным, операционным и приемочным.

Входному контролю могут подвергаться многие материалы, например такие, как химикаты, фоторезисты, трафаретные краски, прокладочная стеклоткань, но наибольшее значение имеет входной контроль диэлектрика, особенно тонкого для МПП. Объем входного контроля фольгированного диэлектрика обычно оговаривается в ТУ на ПП и производится по методике, изложенной в ГОСТе (ТУ) на матери-

ал. Особое внимание обращается на проверку следующих параметров: прочность сцепления фольги с диэлектриком, сопротивление изоляции, стойкость к воздействию повышенной температуры, размерная стабильность тонких диэлектриков.

Операционный контроль - контроль продукции или ТП во время выполнения или после завершения определенной операции. Операционный контроль позволяет выявить брак на ранних стадиях изготовления, выяснить и устранить его причины и тем самым повысить качество и надежность продукции и вместе с тем снизить себестоимость изделий. Количество и объем контрольных операций, не регламентируемых ТУ и стандартами, устанавливается предприятием - изготовителем. Обычно чем сложнее конструкция ПП и выше требования, предъявляемые к ней, а также менее совершенен и стабилен технологический процесс, тем больше должно быть в нем предусмотрено контрольных операций. Чрезмерное увеличение количества и объема контрольных операций отрицательно сказывается на себестоимости изделия.

Наиболее тщательно контролируют фотошаблоны, сетчатые трафареты, слои МПП, качество межслойных соединений. Правильно организованный и выполненный операционный контроль сводит к минимуму число дефектных изделий на выходном (приемочном) контроле. Приемочному контролю подвергаются готовые ПП. Обычно он включает в себя следующие проверки: контроль внешнего вида (производится визуально, в т.ч. с использованием оптических устройств, например установок автоматического оптического контроля, в которых рисунок платы сравнивается с эталоном); контроль геометрических параметров (сюда входят измерения размеров печатных элементов, зазоров между ними, размеров и координат расположения печатных элементов, монтажных и крепежных отверстий, габаритных размеров и т.д.); контроль качества металлизации отверстий (оценивается толщина меди на стенках отверстий, а также их устойчивость к токовой перегрузке); контроль электрических параметров (проверяется целостность цепей, сопротивление цепей, сопротивление изоляции электрически разобщенных цепей).

Для контроля электрических параметров сложных ПП (особенно МПП) применяются автоматические установки, оснащенные компьютером.

В устройствах одного типа ПП при помощи контактного устройства (адаптера) соединяют на входе через коммутатор с блоком опроса, а на выходе – с измерительным устройством. Контактное устройство состоит из двух матриц, содержащих индивидуально подпружиненные контакты («ложе ножей»), расположение которых соответствует координатам контрольных точек на ПП. Для обнаружения коротких замы-

каний и обрывов используется низкое напряжение (10 В). Высоким напряжением (500 В) изоляция тестируется на утечку и пробой.

Устройства другого типа (более подходящие для производств с большой номенклатурой) работают по методу «летающих пробников». Суть его в том, что тестеры имеют несколько головок с приводами по осям X, Y, Z, на каждой из которых установлен пробник. Головки поочередно контактируют с платой, при этом происходит подача и измерение сигнала. При таком тестировании не требуется дополнительных адаптеров. Для перехода от одной платы к другой достаточно изменить программу тестирования.

С целью проверки работоспособности ПП в условиях эксплуатации, а также выявления скрытых дефектов платы подвергают испытаниям климатическим, механическим, электрическим и др. Объем испытаний, методика их проведения и применяемое оборудование указываются в ТУ на ПП. Испытания подразделяют на приемосдаточные, периодические и типовые.

Приемосдаточные испытания включают в себя:

1) стопроцентный контроль соответствия общим требованиям ТУ и КД, внешнего вида проводящего рисунка и диэлектрического основания, величины изгиба и скручивания, правильности монтажных соединений и сопротивления изоляции (при автоматизированном контроле);

2) выборочный контроль толщины металлизации в отверстиях, паяемости контактных площадок и металлизированных отверстий, а также устойчивости их к перепайкам.

Периодические испытания проводятся с целью контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска. Периодические испытания ПП проводятся не реже одного раза в шесть месяцев на 5...10 платах, отобранных случайным образом из числа прошедших приемосдаточные испытания (в дальнейшем эти платы не используются).

Программа периодических испытаний обычно включает в себя:

многократные изгибы (для ГПП и ГПК);

проверку омического сопротивления металлизированных отверстий и их устойчивости к кратковременной токовой перегрузке;

контроль электрических параметров после воздействия климатических факторов, устанавливаемых в зависимости от группы жесткости.

Типовые испытания проводятся с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию или ТП. Программа испытаний ПП составляется предприятием - изготовителем и согласовывается с разработчиком.

## Ремонт

Рост сложности конструкций ПП, сопровождающийся, как правило, увеличением числа дефектов, привел к необходимости разработки технологического процесса ремонта, включающего в себя следующие приемы и операции:

удаление режущим инструментом дефектов проводящего рисунка (выступов, перемычек, отслоившихся контактных площадок и участков проводников), а также диэлектрического основания (инородных включений, расслоившихся участков и т.п.);

восстановление поверхности основания (заполнение выемок, царапин, следов от режущего инструмента) эпоксидным компаундом (заподлицо);

удаление металлизированных стенок отверстий путем высверливания сверлом большего диаметра;

восстановление металлизации в отверстиях путем установки в них трубчатых переходов (пустотелых заклепок), которые затем развальцовывают и опаивают;

устранение коротких замыканий на внутренних слоях МПП путем высверливания места дефекта с последующим заполнением отверстия эпоксидным компаундом;

восстановление отсутствующих (или удаленных) фрагментов проводящего рисунка (контактной площадки, контактной площадки с отрезком проводника, участка печатного проводника длиной до 2 мм) осуществляется путем приклеивания на их место соответствующих фрагментов, изготовленных из фольги толщиной 35-50 мкм, имеющей покрытие ПОС 61, нанесенное горячим или гальваническим способом; соединение с действующим печатным проводником производят пайкой внахлестку на длине не менее 3...5 мм с последующей затиркой места пайки эпоксидным компаундом;

соединение при помощи перемычки из медной проволоки, имеющей покрытие ПОС61, нанесенное горячим или гальваническим способом; перемычкой могут быть соединены две контактные площадки, окружающие дефектное переходное металлизированное отверстие (с последующей двусторонней опайкой перемычки), или разрывы печатных проводников от 2 до 20 мм; в последнем случае перемычка накладывается на печатный проводник внахлестку на длине не менее 3 мм и припаивается;

соединения перемычками из монтажного провода применяются для ремонта печатных проводников при длине разрыва более 20 мм, а также для восстановления нарушенных (или отсутствующих) электрических связей в МПП.



Примеры ремонта элементов печатного монтажа приведены на рис. 4.31.

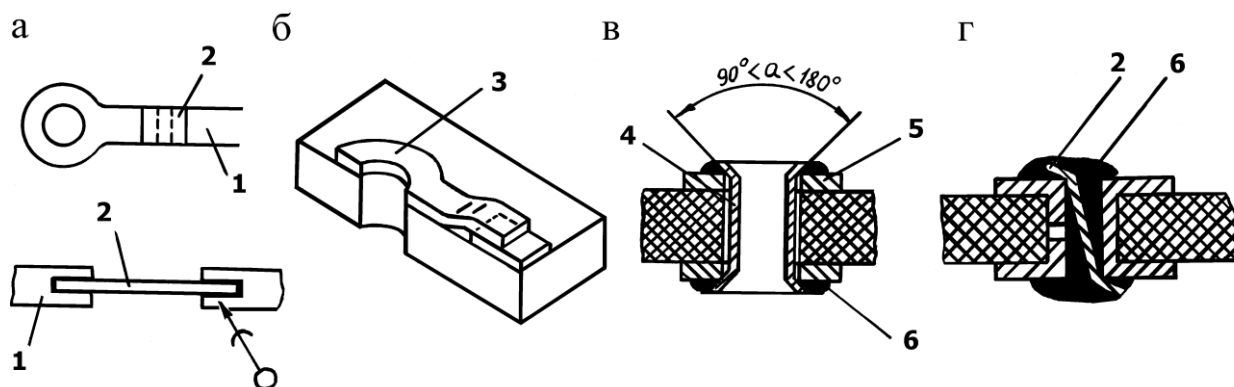


Рис. 4.31. Ремонт элементов печатного монтажа:  
 а – печатных проводников; б – контактной площадки; в – монтажного металлизированного отверстия; г – переходного металлизированного отверстия;  
 1 – поврежденный печатный проводник; 2 – перемычка; 3 – новая контактная площадка; 4 – трубчатый переход; 5 – контактная площадка; 6 – припой

Количество допустимых мест ремонта по каждому виду оговаривается в КД и ТУ. ПП после ремонта должны также соответствовать ТУ.

### 4.3. Гибридные интегральные схемы и микросборки

Гибридные интегральные схемы (ГИС) и микросборки (МСБ) основное применение получили в специализированных ЭС. Тем не менее, на ГИС была построена широко распространенная в свое время американская система IBM360, ставшая впоследствии прототипом ЕС ЭВМ.

ГИС и МСБ могут быть аналоговыми, цифровыми и аналого-цифровыми.

МСБ, в отличие от ГИС, разрабатываются под конкретную аппаратуру, они могут быть корпусными и бескорпусными, характеризуются меньшей степенью унификации как в части подложек с печатной схемой, так и в части монтируемых на нее навесных компонентов.

Печатные элементы и межэлементные соединения ГИС и МСБ получают в основном методами тонко- и толстопленочной технологии.

### Подложки

Подложки служат диэлектрическим и механическим основанием для пленочных элементов и навесных компонентов, а также выполняют функцию теплоотвода.

Основные параметры подложек: диэлектрические характеристики (объемное и поверхностное удельное сопротивление, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс потерь); теплопроводность; химическая стойкость (к обрабатываемым реактивам) и химическая инертность (к осаждаемым материалам); термическая стойкость (к высокотемпературным методам обработки); механическая прочность и обрабатываемость; плоскостность и шероховатость поверхности; влагопоглощение; отсутствие газовыделений при большой температуре и вакууме; согласованность температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с ТКЛР материалов наносимых пленок; стоимость.

Наибольшее распространение в ГИС и МСБ получили подложки из ситалла и керамики размеров 60x48 мм, толщиной 0,5...1,0 мм.

*Ситаллы* – стеклокристаллические материалы, получаемые термической обработкой стекол, в результате чего формируется однородная, полностью или частично кристаллическая структура с размерами кристаллов порядка 1 мкм. Ситаллы характеризуются низким ТКЛР, высокой химической стойкостью, невысокой теплопроводностью (коэффициент теплопроводности  $a_m = 1... 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ), диапазон рабочих температур составляет от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+700^\circ\text{C}$ .

Ситалловые подложки (например, СТ-50-1) являются наиболее распространенными в тонкопленочных ГИС. Так как минимальная толщина пленочных элементов (в частности, резисторов) может составлять десятые доли мкм, то для их надежного функционирования шероховатость подложки должна быть не ниже 12...14 класса ( $R_a \leq 0,025 \text{ мкм}$ ). С этой целью на рабочую сторону ситалловых подложек (при их изготовлении) наносят глазурь.

Толстопленочные схемы работают, как правило, с большими мощностями, а при их изготовлении используется высокотемпературная обработка – вжигание паст при  $500...1000^\circ\text{C}$ . Поэтому подложки для толстопленочных схем должны обладать высокой теплопроводностью и термостойкостью. Этим требованиям удовлетворяют подложки из окисной керамики, такие как ВК 94-1 (22ХС), ВК 100-1 (Поликор), Брокерит, термостойкость которых превышает  $2000^\circ\text{C}$ .

Наибольшее распространение в толстопленочных ГИС и МСБ получили подложки типа ВК 94-1 (алюмооксидная керамика с содержанием оксида алюминия около 94%). Характеризуются высокой химической стойкостью, шероховатость поверхности после обработки соответствует 8...10 классу ( $R_a = 0,1-0,4 \text{ мкм}$ ), хорошая теплопроводность (см. табл. 3.1).

ВК 100-1 (алюмооксидная керамика с содержанием оксида алюминия более 99%). Отличается лучшей теплопроводностью (см. табл. 3.1) и возможностью получения 12-го класса шероховатости

поверхности. Последнее обстоятельство позволяет использовать поликор и для тонкопленочных схем. Но подложки из него значительно дороже традиционных (СТ-50-1 и ВК 94-1).

Брокерит – керамика, 99,7% которой составляет окись бериллия. Обладает высокими механическими и электрическими свойствами, а также химической стойкостью. Теплопроводность ее выше, чем у некоторых металлов и сплавов (см. табл. 3.1). Существенным недостатком является токсичность ее паров и пыли.

### Пленочные элементы

Примеры пленочных элементов приведены на рис. 4.32.

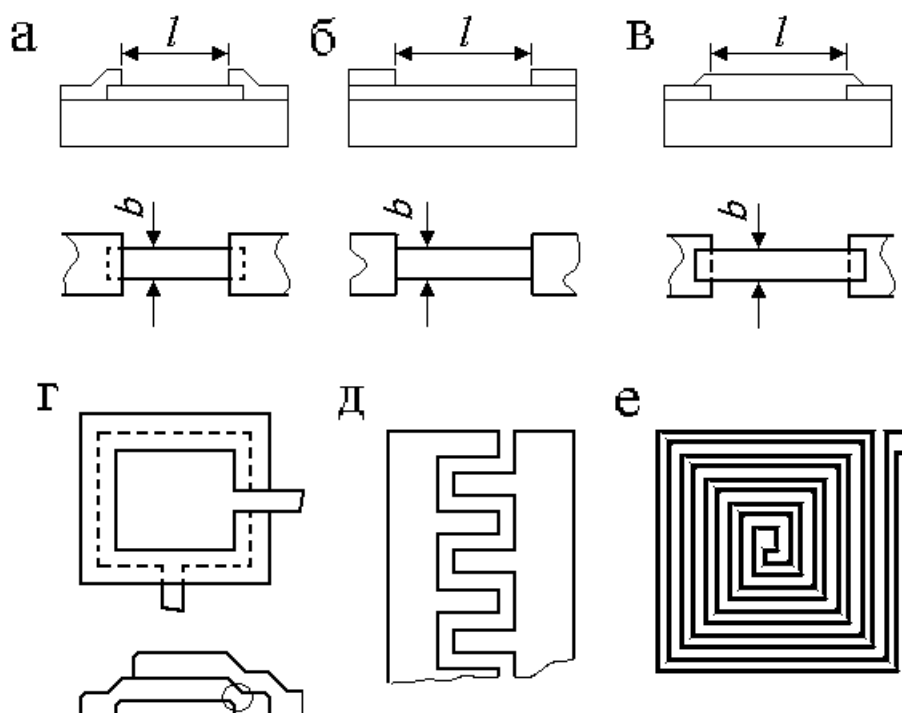


Рис. 4.32. Пленочные элементы: а, б, в – резисторы; г, д – конденсаторы; е – индуктивность

Пленочные резисторы состоят из частично перекрывающихся участков двух пленок: резистивной и проводящей (коммутационной). Резисторы, изображенные на рис 4.32, а, б получают по тонкопленочной, а на рис.4.32, в – по толстопленочной технологии. Известно, что сопротивление обычного (объемного) резистора определяется как  $R = \rho_v l / S$  (где  $\rho_v$  – объемное сопротивление материала,  $l$  – длина, а  $S$  – площадь поперечного сечения). При расчете пленочных резисторов вместо  $\rho_v$  используют величину  $\rho_s = \rho_v / h$ , представляющую собой удельное поверхностное сопротивление (сопротивление квадрата

пленки толщиной  $h$ ). В этом случае сопротивление пленочного резистора определится как  $R = \rho_s l/b$  (где  $b$  – ширина резистора, определяемая по резистивной пленке, а  $l$  – его длина, определяемая по проводящей пленке). Для каждой марки материала, предназначенного для получения пленочных резисторов, существует рекомендуемый диапазон значений  $\rho_s$ .

Пленочные конденсаторы обычно выполняют по двум вариантам: в несколько слоев (рис. 4.32, г.) и в один слой (рис. 4.32, д). В первом случае нижний и верхний слой выполняют из проводящего материала, а промежуточный – из диэлектрика. Гребенчатые конденсаторы (рис. 4.32, д) обычно используются в высокочастотных схемах. Роль обкладок в них выполняют пленочные проводники в форме гребенки.

Пленочные индуктивности (рис. 4.32, е) представляют собой плоские спирали из проводящего материала.

Пленочные элементы занимают довольно много места на подложке и имеют сравнительно узкий диапазон номиналов (особенно это касается индуктивностей и конденсаторов). Кроме того, тонкопленочные трехслойные конденсаторы не всегда оказываются достаточно надежными (из-за проколов диэлектрика и его (помечено кружком) утонения). Поэтому конденсаторы и индуктивности в ГИС и МСБ чаще применяются в виде навесных компонентов.

Из пленочных элементов наибольшее распространение в ГИС и МСБ получили тонкопленочные резисторы, благодаря высокой точности (отклонение от номинала после подгонки до 0,01%) и стабильности, минимуму шумов, относительно широкому диапазону удельных характеристик и т.д. Тонкопленочные резисторы, выполненные на отдельной миниатюрной подложке (часто в виде резистивных матриц), применяются также в толстопленочных МСБ в качестве навесных компонентов.

### **Методы получения тонких плёнок**

В тонкопленочной технологии резистивные, коммутационные и диэлектрические пленки толщиной 0,1...2 мкм получают главным образом термическим испарением в вакууме и распылением ионной бомбардировкой.

Первый метод основан на свойстве атомов (молекул) металлов и некоторых других материалов при испарении в условиях высокого вакуума перемещаться прямолинейно (лучеобразно) и осаждаться на поверхности, поставленной на пути их движения. Упрощенная схема рабочей камеры установки термического испарения в вакууме показана на рис. 4.33.

Работа на установке включает в себя следующие действия. При поднятом колпаке устанавливают подложки и испаритель с испаряемым веществом. Затем колпак опускают и включают систему вакуумных насосов (вначале форвакуумный механический для предварительного разрежения, затем высоковакуумный диффузионный, которые включены последовательно).

Для ускорения десорбции воздуха с внутренних поверхностей и сокращения времени откачки в трубопровод подают горячую проточную воду. По достижении давления внутри камеры порядка  $10^{-4}$  Па (контроль по манометру) включают нагреватели испарителя и подложек. По достижении рабочих температур (контроль с помощью термопар) заслонку отводят в сторону и пары вещества достигают подложки, где происходит их конденсация и рост плёнки. Система автоматического контроля за ростом плёнки фиксирует либо толщину плёнки (для диэлектрика плёночных конденсаторов), либо поверхностное сопротивление (для резисторов), либо время напыления (проводники и контакты, защитные покрытия). Выработываемый при этом сигнал об окончании напыления после усиления воздействует на соленоид заслонки, перекрывая ей поток пара. Далее отключают нагреватели испарителя и подложек, выключают насосы, а в трубопровод подают холодную проточную воду. После остывания подколпачных устройств через натекаТЕЛЬ плавно впускают атмосферный воздух. Выравнивание давлений внутри и вне колпака даёт возможность поднять его и начать следующий цикл обработки.

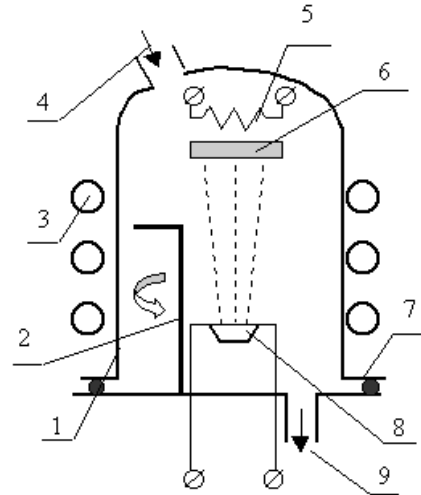


Рис. 4.33. Схема рабочей камеры установки термического вакуумного нанесения:

- 1 – вакуумный колпак из нержавеющей стали;
- 2 – заслонка;
- 3 – трубопровод для водяного нагрева или охлаждения колпака;
- 4 – игольчатый натекаТЕЛЬ для подачи атмосферного воздуха в камеру;
- 5 – нагреватель подложки;
- 6 – подложкодержатель с подложкой;
- 7 – герметизирующая прокладка из вакуумной резины;
- 8 – испаритель с испаряемым веществом;
- 9 – откачка

Температура нагрева вещества в испарителе должна обеспечивать достаточно высокую интенсивность испарения, которая обычно характеризуют упругостью пара (давлением пара в состоянии насыщения)  $P_S$ . Оптимальной интенсивностью испарения принято считать интенсивность, при которой  $P_S \approx 1,3$  Па. Соответствующая этой упругости температура испарения называется условной ( $t_{усл}$ ) – табл. 4.5.

Таблица 4.5

## Температуры плавления и испарения некоторых элементов

Элемент	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$t_{исл}, ^\circ\text{C}$	Элемент	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$t_{исл}, ^\circ\text{C}$
Ag	961	1047	Ni	1455	1510
Al	660	1150	Pd	1555	1566
Au	1063	1465	Pt	1774	2090
Cr	1800	1205	Ta	2996	3070
Cu	1083	1273	Ti	1725	1546
Mo	2622	2533	W	3382	3309

Вакуум в рабочей камере необходим для обеспечения свободной диффузии атомов вещества испарителя в объём рабочей камеры и прямолинейного движения атомов вещества с минимальными столкновениями с молекулами остаточного воздуха, снижающими скорость осаждения. Поэтому на участках подложки, более удаленных от точечного источника испарения, толщина пленки оказывается меньше.

Важными характеристиками осажденных пленок являются: структура; химическая чистота и адгезия к подложке.

Зернистость металлических пленок в основном зависит от температур испарения и подложки. Для получения крупнозернистой структуры (а такие пленочные резисторы более стабильны в работе) осаждение производят на подложку, нагретую до 150...350 °С.

Источники загрязнения пленок: пары материала, из которого изготовлен испаритель (поэтому для испарителя выбирают материал, упругость пара которого при температуре испарения намного ниже упругости пара осаждаемого вещества, например W, Mo); остаточные газы (борьба с этим явлением – глубокий вакуум, но он обходится дорого); примеси, адсорбированные на испаряемом веществе и испарителе (поэтому первую порцию материала осаждают на заслонку, перекрывая ею поток к подложке; в это время также происходит вывод испарителя на рабочую температуру).

Причинами плохой адгезии пленок могут быть: существенное различие в ТКЛР подложки и материала пленки (в этом случае пленка, осажденная на нагретую подложку при остывании может попросту отслоиться в виде шелушения); наличие на подложке органических и неорганических загрязнений (поэтому ситалловые подложки предварительно очищают, например, кипячением в водном растворе перекиси водорода и аммиака и хранят в эксикаторах или в 95% - ном этиловом спирте; нагрев подложек также способствует десорбции с ее поверхности газов, влаги, паров масла).

Время откачки вакуумной камеры (около 1,5 часа) значительно превышает время осаждения одного слоя (обычно 1...5 минут). Поэтому в промышленных установках стараются за один цикл загрузки и откачки обработать максимальное количество подложек и нанести несколько слоев. С этой целью подложки в количестве от 6 до 60 шт. располагают на вращающихся относительно испарителя каруселях (рис. 4.34, а) или барабанах (рис. 4.34, б).

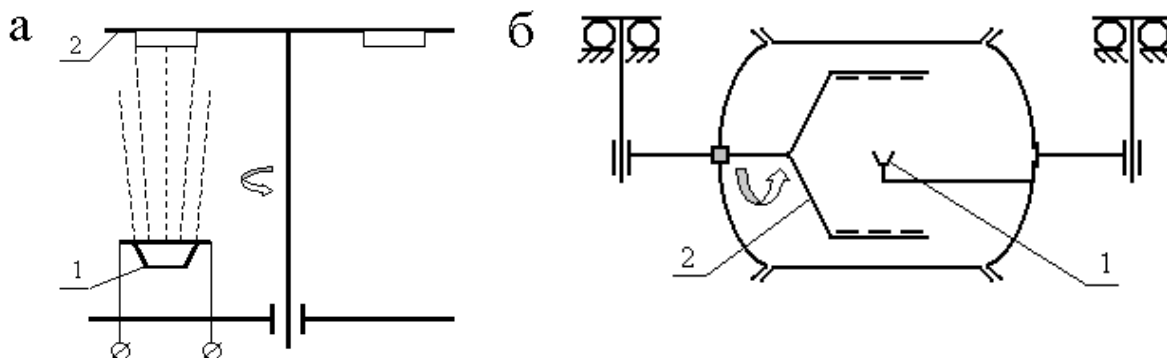


Рис. 4. 34. Схемы установок термовакuumного нанесения карусельного (а) и барабанного (б) типов:  
1 – испаритель; 2 – карусель (барабан) с подложками

Для нанесения нескольких слоев из разных материалов без разгерметизации камеры предусматривается поочередное включение различных испарителей (обычно до 5), управляемое извне.

При нагреве сплава более легкоплавкий компонент испаряется с большей скоростью и его доля в осажденной пленке оказывается выше. Для получения пленок из сплавов без изменения исходного состава применяют взрывное (мгновенное) испарение, при котором порошкообразный материал дозированно (из вибробункера) подается на ленту (обычно из Мо), температура которой на 100...200 °С превышает температуру испарения самого тугоплавкого компонента. Микродозы с ленты испаряются полностью и практически мгновенно.

*Распыление ионной бомбардировкой.* В этом методе атомарный (или молекулярный) поток вещества получают, бомбардируя поверхность твердого образца (называемого мишенью) ионами инертного газа (обычно аргона), которые разгоняют до энергии сотни и тысячи электрон-вольт. Энергия ионов аргона после разгона в электрическом поле в несколько раз превышает теплоту сублимации поверхностных атомов мишени, поэтому последняя интенсивно испаряется. Потребность в разработке подобных процессов возникла из-за необходимости получения пленок тугоплавких металлов (Ta, W, Mo) для ГИС военного применения.

Простейшим вариантом распыления материалов ионной бомбардировкой является катодное распыление на постоянном токе самостоятельного тлеющего разряда (рис. 4.35).

Подложки размещают на заземленном аноде. Катод – мишень из материала, подлежащего распылению, находится на расстоянии  $L = 25...75$  (чаще 60) мм от анода. Диаметр мишени обычно 300...350 мм.

Сначала в вакуумной камере создается низкое давление ( $10^{-3}...10^{-4}$  Па), после чего ее заполняют аргоном при давлении 1...10 Па. При подаче напряжения  $U_{\Pi} = 1...5$  кВ между электродами возникает самостоятельный тлеющий разряд. Разряд разделён на две зоны: тёмное катодное пространство ( $d_{\text{ТП}}$ ) и светящаяся область (плазма). На тёмное катодное пространство приходится основное падение напряжения (рис. 4.36).

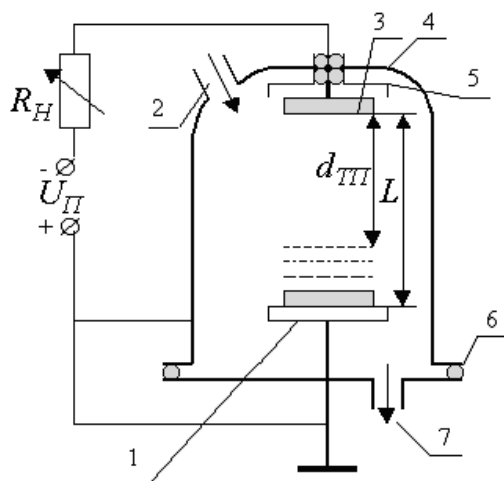


Рис. 4.35. Упрощенная схема рабочей камеры установки катодного распыления:  
1 – анод с подложками; 2 – игольчатый натекатель; 3 – катод - мишень; 4 – колпак из нержавеющей стали; 5 – экран;  
6 –герметизирующая прокладка;  
7 – откачка

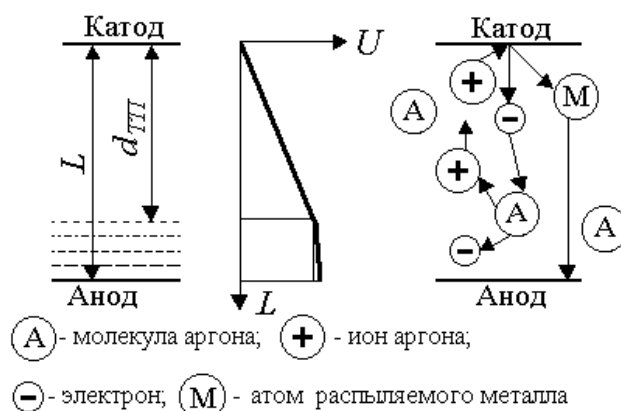


Рис. 4.36. Распределение потенциала и виды частиц в межэлектродном пространстве

На этом участке ионы разгоняются до энергии, достаточной, чтобы, бомбардируя поверхность мишени–катода, вызвать ее разрушение, сопровождаемое распылением атомов и освобождением электронов (если мишень из проводящего материала). Один ион в зависимости от его энергии, материала мишени и угла падения может распылять до 10 и более атомов. Предполагается, что распыление происходит по двум механизмам: в результате сильного локального разогрева поверхности мишени падающим ионом и в результате его ме-



ханического взаимодействия (передачи импульса) с атомами материала мишени.

Освобожденные из мишени электроны разгоняются на участке  $d_{\text{ТП}}$  и ионизируют молекулы (атомы) аргона. При ионизации образуются ионы аргона, которые, ускоряясь, движутся к мишени, и электроны, которые, как и «отработанные», дрейфуют к аноду в слабом поле светящейся области.

Атомы материала мишени покидают ее в различных направлениях с энергией порядка 20...50 эВ. Далее, преодолевая столкновения с молекулами и ионами аргона, они под различными углами достигают поверхности подложки. Их энергии обычно достаточно для проникновения в поверхностные слои подложки, что обеспечивает получаемым пленкам хорошую адгезию (при термовакuumном осаждении средняя энергия атомов, подлетающих к подложке, на 1...2 порядка меньше). Таким образом, непрерывный поток ионов бомбардирует мишень и непрерывный поток атомов вещества движется к подложке.

В процессе распыления непрерывно работает система откачки, а аргон поступает через натекаатель для поддержания заданного давления.

Экран, расположенный на 1...5 мм вокруг катода, необходим для локализации разряда (чтобы тлеющий разряд не распространялся от катода к колпаку). Сопротивление  $R_H$  используется для регулировки тока разряда. Распыление ионной бомбардировкой, по сравнению с термовакuumным способом, имеет ряд преимуществ: возможно получение пленок тугоплавких материалов и сплавов; пленки более равномерны по толщине (благодаря большим размерам мишени, малому расстоянию до подложки и разному углу падения атомов на нее); высокая адгезия пленок; отсутствие разогретых деталей в камере; безынерционность процесса (при отключении питания процесс сразу же прекращается); мишень может служить несколько месяцев (что облегчает автоматизацию процесса и обеспечивает однородность получаемых пленок); возможно так называемое реактивное распыление (например Ta), осуществляемое в смеси аргона и активных газов (кислорода, азота), что позволяет получать пленки с самыми различными свойствами.

Основные недостатки катодного распыления – приблизительно на порядок меньшая скорость осаждения пленок и сильная их загрязняемость атомами аргона – являются следствием более низкого вакуума. Кроме того, катодным методом можно распылять только электропроводящие материалы.

Если в процессе катодного распыления начать повышать вакуум, то темное катодное пространство будет растягиваться, достигая анода, после чего тлеющий разряд погаснет и распыление прекратится.

При низком давлении разряд гаснет из-за недостаточной ионизации аргона вторичными электронами, эмитируемыми катодом.

Основные промышленные варианты распыления ионной бомбардировкой: ионно-плазменное, высокочастотное, магнетронное.

В установках ионно-плазменного распыления, в отличие от катодного, используется дополнительный электрод – термокатод, эмитирующий электроны, поддерживающие плазму несамостоятельного тлеющего разряда. Для повышения степени ионизации аргона по оси разряда накладывают продольное магнитное поле, заставляющее электроны двигаться по спирали. Ионно-плазменное распыление проводят при давлении  $10^{-1} \dots 10^{-2}$  Па.

Распылению диэлектриков при постоянном напряжении питания препятствует положительный заряд, скапливающийся на их поверхности от бомбардирующих ионов. При замене постоянного напряжения на переменное этот заряд в положительный полупериод компенсируется электронами. В отрицательный полупериод мишень бомбардируется ионами и распыляется. Предполагается, что при частоте 13,56 МГц (принятой в нашей промышленности) электроны (которые подвижнее ионов) оседают на поверхности диэлектрика и создают отрицательное смещение, суммируемое с питающим ВЧ-напряжением. Часть электронов, находящихся в срединной части высокочастотного разряда (при соответствующем расстоянии от мишени до подложки), не успевают достигать электродов за время полупериода, а совершают колебательные движения, интенсивно ионизируя аргон. Это позволяет проводить распыление при давлении 0,5...5 Па.

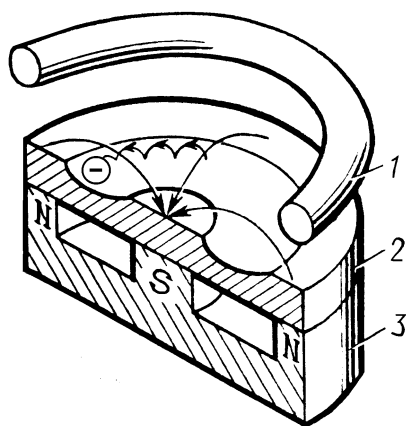


Рис. 4.37. Схема магнетронного распыления:

1 – кольцевой анод; 2 – катод-мишень; 3 – магнитная система

но ионизируя аргон. Подложки (на рис. 4.37 не показаны) располагаются над анодом рабочей поверхностью вниз.

Схема одного из вариантов магнетронного распыления приведена на рис. 4.37. При подаче постоянного напряжения между электродами возникает неоднородное электрическое поле, силовые линии которого скрещиваются с линиями магнитного поля. В условиях тлеющего разряда эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки вторичные электроны перемещаются к аноду. Но магнитное поле возвращает их к катоду. В результате электроны движутся у поверхности катода по траекториям, близким к циклоидальным, эффективно ионизируя аргон.

Давление аргона в магнетронных системах составляет 0,1... 0,5 Па, а напряжение питания 0,7...1 кВ. Скорость роста плёнок достигает нескольких нм/с, что сравнимо со скоростями в процессах термовакуумного осаждения.

Ионно-плазменное и магнетронное распыление могут также осуществляться при подаче ВЧ-напряжения.

### **Получение тонкопленочных резисторов**

Для получения тонкопленочных резисторов необходимо на диэлектрической подложке (чаще всего из ситалла) получить и соответствующим образом сконфигурировать пленки из резистивных и проводящих материалов.

Основные требования к материалам резистивных пленок: стабильность во времени; минимальное значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС); хорошая адгезия к подложке; коррозионная стойкость; стойкость к воздействию высоких температур; технологические свойства (легкость испарения, конфигурирования и т.п.).

Для получения тонкопленочных резисторов используются различные материалы: металлы, металлические сплавы, оксиды металлов, металлокерамические соединения. В качестве чистых металлов для резистивных пленок наибольшее применение нашли тугоплавкие металлы, такие как Ta и W, благодаря высокой стабильности и низким значениям ТКС ( $\leq 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ ), а также Cr. Пленки из Cr удовлетворяют большинству из перечисленных требований (особенно по адгезии). Cr входит в состав многих резистивных сплавов, таких как нихром (80%Ni+20%Cr), металлосилицидные сплавы МЛТ и РС. Резистивные сплавы типа РС (табл. 4.6) разработаны на основе системы Cr-Si с легирующими добавками Fe, Ni и др. Сплавы типа РС поставляются в виде порошков (для термического и взрывного испарения) или в виде дисков-мишеней (для распыления ионной бомбардировкой).

Толщина резистивных пленок обычно составляет от нескольких десятков до сотен нм. С уменьшением толщины резистивных пленок значения ТКС, как правило, также снижаются и в некоторых случаях могут быть даже отрицательными. Но очень тонкие пленки крайне нестабильны.

Выводы пленочных резисторов являются частью рисунка коммутации, который в общем случае может включать в себя также: обкладки конденсаторов, индуктивности, коммутационные дорожки и контактные площадки, предназначенные для соединения с выводами навесных компонентов, выводами корпуса, проволочными перемычками.

Таблица 4.6

## Свойства сплавов РС

Марка сплава	$\rho_s$ , Ом/□	ТКС, 10 <sup>-4</sup> 1/°С	$P_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	Необратимые изменения за 1000 ч при 85°С при нагрузке 1 Вт/см <sup>2</sup> , не более
PC5006	3—20	0,5	5	0,02
PC5402	5—100	0,5	2	0,01
PC5406К	10—500	0,5	2	0,01
PC5406Н	50—500	0,3	2	0,01
PC3710	50—3000	1	5	0,005
PC4800	100—1000	2	5	0,01
PC1714	300—500	2	5	0,01
PC4206	1000	0,5	2	0,005
PC4400	1000—5000	3	10	—
PC1004	3000—50000	15	5	0,02
PC2310	10000—30000	12	5	0,02
PC2005	30000—500000	12	5	0,02

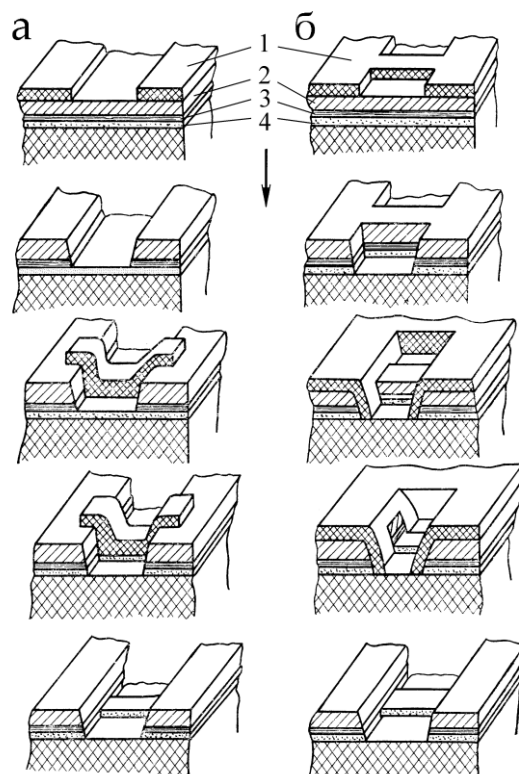
$P_0$  – допустимая удельная мощность рассеивания

Требования к материалам коммутационных пленок: низкое омическое сопротивление; образование с соединяемыми пленками невыпрямляющих контактов; бесфлюсовая свариваемость и паяемость с проволокой и выводами навесных компонентов (флюсы коррозионно опасны и после их применения требуется тщательная отмывка); хорошая адгезия к подложке (в т.ч. при воздействии высоких температур в процессе сварки или пайки); коррозионная стойкость и т.д.

Ни один металл полностью этим требованиям не удовлетворяет. Поэтому коммутацию обычно делают многослойной (в 2 или 3 слоя из различных металлов с общим рисунком). Нижний слой (подслой) толщиной 10...30 нм выполняют из материала с высокой адгезией к подложке: Cr (и его сплавы), Ti, V и др. Основной слой толщиной 0,5...1,5 мкм выполняют из металла с высокой проводимостью Al, Cu, Au и др. Пленки из Al плохо поддаются сварке и пайке, а из Cu – не стойки к коррозии. Поэтому они обычно покрываются защитной пленкой, например, из Ni толщиной 30...50 нм.

Конфигурирование резистивных и коммутационных пленок может осуществляться как с использованием свободных масок (трафаретов, поочередно прикладываемых к подложке при осаждении), так и фотолитографией. Свободные маски применяют только при термовакuumном осаждении. В методах распыления ионной бомбардировкой свободные маски не применяют из-за быстрого их разрушения, а также получения размытого рисунка (вследствие рассеянного падения атомов на подложку). Резисторы, соответствующие рис. 4.32, а получают

по следующей схеме: термовакuumное осаждение резистивной пленки (через свободную маску) или любым методом в виде сплошного слоя с последующим его конфигурированием фотолитографией); далее все повторяется для коммутации. Если все пленки по приведенной схеме конфигурируют фотолитографией, то такой способ называют последовательной фотолитографией. Альтернативным вариантом является селективная фотолитография (рис. 4.38), осуществляемая в следующей последовательности: осаждение один на другой сплошных слоев резистивного и коммутационных материалов; последовательное конфигурирование слоев фотолитографией (при этом травитель одного слоя не должен разрушать нижележащий слой, т.е. обладать селективным действием). В этом случае осаждение всех слоев может быть выполнено за один цикл откачки (при смене испарителей), но выбор материалов слоев ограничен их стойкостью к травителям.



Вариант резистора, полученного селективной фотолитографией, соответствует рис. 4.32, б.

Отклонение от номинала тонкопленочных резисторов обычно составляет  $\pm 10...20\%$ . Для получения прецизионных (высокоточных) резисторов применяется подгонка. Наибольшее распространение получил лазерный метод. Резистор сначала получают с заниженным значением номинала, а затем его повышают путем лазерного фрезерования, например, как на рис. 4.39.

Рис. 4.38. Получение тонкопленочного резистора селективной фотолитографией с последовательным (а) и сквозным (б) травлением: 1 – ФР; 2 – проводящая пленка (например, Au); 3 – промежуточный слой (например, Cr); 4 – резистивный слой (например, МЛТ или РС)

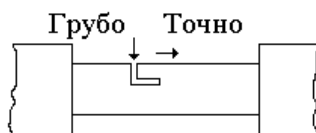


Рис. 4.39. Лазерная подгонка резистора

Таким способом получают резисторы с точностью 0,01%.

## Толсто пленочная технология

Пленки, получаемые по этой технологии, представляют собой слои стеклоэмали толщиной 10...100 мкм с мелкодисперсным наполнителем, называемым функциональной фазой.

Функциональной фазой проводниковых пленок являются порошки (с размерами частиц порядка единиц мкм) высокопроводящих металлов, не имеющих на поверхности окисных пленок (Ag, Pd, Au), а резистивных – смеси порошков металлов и окислов металлов в различных пропорциях, что позволяет варьировать удельное поверхностное сопротивление в широких пределах (рис. 4.40). Чтобы проводниковые пленки имели минимальное поверхностное сопротивление ( $\rho_s \leq 0,05$  ом/□, при толщине 10...25 мкм), а также имели способность к облуживанию, соотношение содержания металлического порошка и стекла в них должно быть порядка 9:1. Диэлектрические слои конденсаторов содержат порошки сегнетоэлектриков (например, титаната бария BaTiO<sub>3</sub>), которые, обладая большим значением относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , обеспечивают большие значения удельных емкостей  $C_0$  [Ф/см<sup>2</sup>]. Изолирующие слои, наоборот, создаются на основе порошков стёкол с малыми  $\epsilon$  и  $C_0$ .

Толсто пленочные элементы получают путем неоднократного повторения цикла «нанесение пасты трафаретной печатью – сушка – вжигание» (рис. 4.41.).

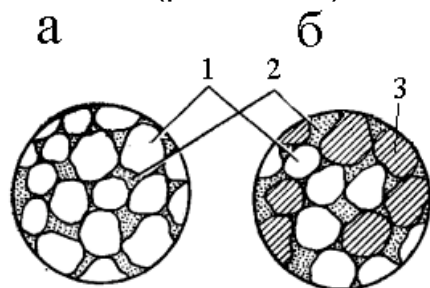


Рис. 4.40. Структура толсто пленочных проводников (а) и резисторов (б):  
1 – частицы металла; 2 – стеклоэмаль; 3 – частицы окисла металла



Рис. 4.41. Структурная схема технологического цикла толсто пленочной печати

Пасты – суспензии порошкообразных неорганических материалов в органическом связующем. В качестве неорганических материалов используют порошки стекла, керамики, металлов, окислов металлов, солей. Органическая связка с растворителем служит средой для равномерного распределения в ней компонентов пасты и придания ей свойств, необходимых для трафаретной печати. Органические составляющие паст играют вспомогательную роль, но от них зависит

разрешающая способность печати и будущая структура пленок. В качестве органических компонентов обычно используют: ланолин (воск животного происхождения), растительные масла (льняное, касторовое и др.), канифоль, растворители.

Пасты наносят через сетчатые трафареты. Для трафаретов используют сетки из нержавеющей стали с размерами ячеек 40...100 мкм и диаметром нитей 25...55 мкм.

В процессе сушки (температура 120...200 °С) происходит удаление летучих органических растворителей. Лучшее качество сушки обеспечивают ИК-лучи.

Вжигание паст производят при температуре 500...1000 °С в конвейерных электропечах (рис. 4.42).

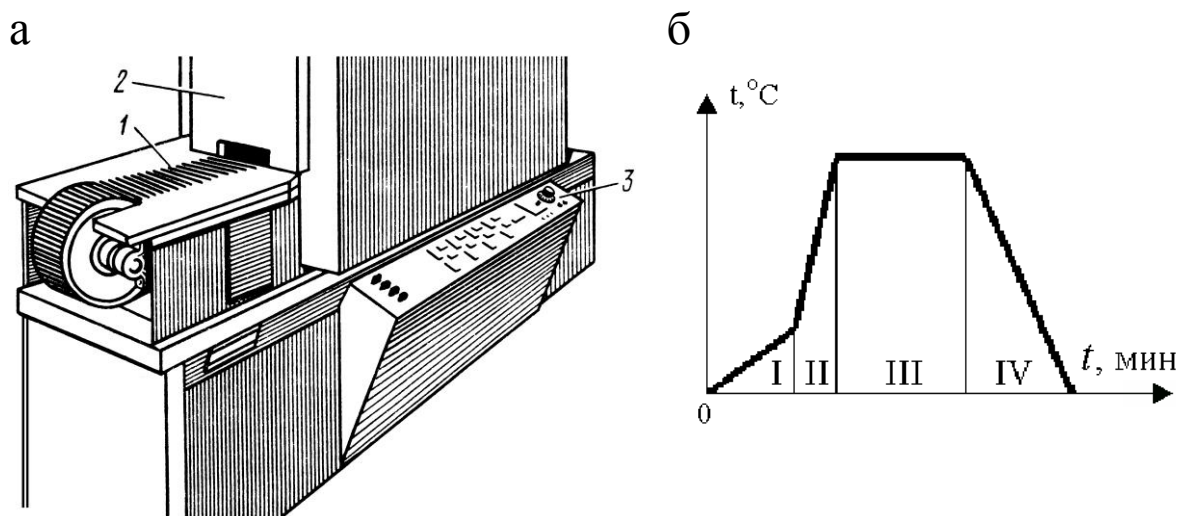


Рис. 4.42. Общий вид конвейерной печи (а) и график вжигания (б):  
1 – лента конвейера; 2 – кожух печи; 3 – пульт управления;  
I, II, III, IV – этапы вжигания

На этапе I (с температурой до 300...400 °С) происходит разложение и удаление органических компонентов. Их состав, а также скорость нагрева должны быть подобраны таким образом, чтобы с ростом температуры компоненты удалялись не одновременно (иначе пленка получится пористой). На этом этапе нельзя допускать попадания выделяющихся активных газов ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) во внутрь печи, где они могут взаимодействовать с металлическими составляющими паст. С этой целью в печах предусматривается регулируемый наклон канала (входное отверстие несколько приподнимают), либо встречная подача воздуха под давлением. На этапе II происходит расплавление стеклянного порошка и смачивание функциональных компонентов и подложки, Этап III – выдержка при относительно постоянной температуре в течение 7...15 мин. На этом этапе происходят сложные фазовые превращения, поэтому допускаемые отклонения от рекомендуемых режимов вжигания составляют, например, для резисторов  $\pm 1...2$  °С.

Далее (на этапе IV) подложки медленно охлаждают, чтобы избежать внутренних напряжений и растрескиваний. Время вжигания одного слоя составляет 0,5...2 часа. Каждый последующий слой вжигается, как правило, при более низкой температуре. Кроме проводниковых, резистивных и диэлектрических паст в толсто пленочной технологии применяются лудящие пасты. Они состоят из частиц припоя, смоченных раствором флюса (например, канифоль в спирте). После нанесения через сетчатый трафарет на толсто пленочные монтажные площадки и сушки, покрытие подвергается оплавлению (~230°C).

После формирования всех слоёв резисторы и конденсаторы проходят подгонку (обычно лазерную) до заданной точности.

Толсто пленочная технология, по сравнению с тонко пленочной, более проста в реализации (меньше единовременные затраты на освоение производства, не требуется вакуума, короче технологический цикл, простота автоматизации, легкость перехода на новый тип схем). Толсто пленочные элементы могут быть рассчитаны на относительно большие мощности рассеивания. К недостаткам следует отнести необходимость высокотемпературной обработки, относительно высокую стоимость некоторых паст, меньшую разрешающую способность (хотя ее можно улучшить, применяя фотолитографию). Кроме того, толсто пленочные резисторы уступают тонко пленочным по ТКС.

### **Многоуровневая коммутация ГИС и МСБ**

Рост степени интеграции ГИС и МСБ сопровождается заменой большей части пленочных элементов на навесные компоненты, занимающие меньше места на подложке. Кроме того, вместо бескорпусных диодов, транзисторов и матриц применяются бескорпусные полупроводниковые ИС. Все это предъявляет повышенные требования к коммутации (необходимо коммутировать большее количество точек на единице площади подложки).

В таких случаях коммутацию делают многоуровневой с межслойной изоляцией, которая должна обеспечивать минимум помех в соседних слоях. Материалы изолирующих слоев должны обладать низкой диэлектрической проницаемостью, высокой электрической прочностью и высоким сопротивлением изоляции. Проводящие и изолирующие слои получают методами, отработанными при изготовлении различных типов ПС.

В тонко пленочных ГИС и МСБ проводящие слои (Au, Cu, Al) получают термовакуумным осаждением. Толщина слоя обычно не превышает 10 мкм вследствие сравнительно высоких растягивающих внутренних напряжений. Применение гальванических методов наращивания на тонкие вакуумные конденсаты позволяет получать метал-



личные пленки толщиной до 50 мкм с меньшими внутренними напряжениями. Для изоляционных слоев применяют неорганические и органические диэлектрики (рис. 4.43).

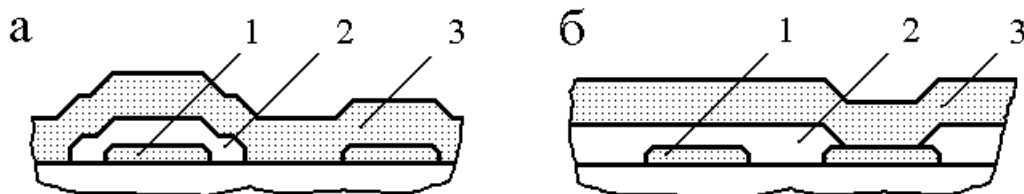


Рис. 4.43. Многоуровневая коммутация в тонкопленочных ГИС и МСБ с неорганическим (а) и органическим (б) диэлектриком:

1 – коммутация 1-го уровня; 2 – диэлектрик; 3 – коммутация 2-го уровня;  
4 – подложка

Неорганические диэлектрики (например, SiO) осаждают обычно термовакuumным методом через маску (так как травители ухудшают диэлектрические свойства). Малая толщина ( $\leq 10$  мкм) и пористость таких пленок, а также наличие «ступенек» приводят к значительной паразитной емкости и снижают надежность изоляции.

В качестве органических диэлектриков используют слои полимеров толщиной более 3...4 мкм (например, некоторые типы ФР), которые наносят центрифугированием или пульверизацией. Метод прост в реализации, позволяет получать слои с хорошими диэлектрическими свойствами, но адгезия наносимых на диэлектрик металлических слоев часто недостаточна.

Вышеназванные причины приводят к тому, что тонкопленочные ГИС и МСБ на жестких подложках (ситалле, поликоре) выполняют обычно не более чем с двухуровневой металлизацией.

Более высокую коммутирующую способность обеспечивают многоуровневые коммутационные платы, состоящие из проводящих и изоляционных слоев и представляющие собой аналоги МПП. Их получают преимущественно методами толстопленочной печати и с применением гибких полиимидных подложек. В этих случаях толщина изоляционных слоев составляет 25...100 мкм, что обеспечивает высокий уровень изоляции и минимальные паразитные наводки.

Толстопленочная многоуровневая разводка реализуется в двух вариантах: в виде нескольких чередующихся проводящих и изолирующих слоев, расположенных на одной или двух сторонах монолитной керамической подложки, и в виде многослойной керамики.

В первом случае (рис. 4.44) межслойной изоляцией является слой вожденной диэлектрической пасты. Поскольку толщина межслойной изоляции в 2...3 раза превышает толщину проводящего слоя, для получения качественных контактных переходов производят предвари-

тельно одно– или двукратное нанесение проводящей пасты в окна изолирующего слоя по циклу «нанесение пасты через трафарет – сушка» с последующим вжиганием совместно с проводящим слоем.

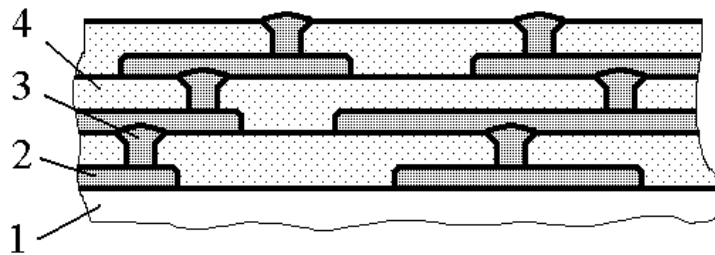


Рис. 4.44. Толстопленочная многослойная разводка в виде последовательно вжигаемых слоев:

1 – подложка; 2 – проводящий слой; 3 – переход; 4 – изоляционный слой

При вжигании каждого последующего слоя необходимо обеспечить стабильность состава и свойств нижележащих (вожженных) слоев. Это налагает ряд требований к выбору паст, особенно для изоляционных слоев. Для них используются пасты на основе кристаллизующихся стекол и композиционных материалов (стекло – керамика). После вжигания температура повторного размягчения этих материалов будут уже существенно выше.

На заключительном этапе формируются монтажные площадки, которые покрываются лудящей пастой. По данной технологии получают платы, которые содержат до 15 проводящих слоев, но в серийном производстве оптимальным считается 2...6 проводящих слоя, так как с их увеличением снижается выход годных изделий, а также надежность соединений.

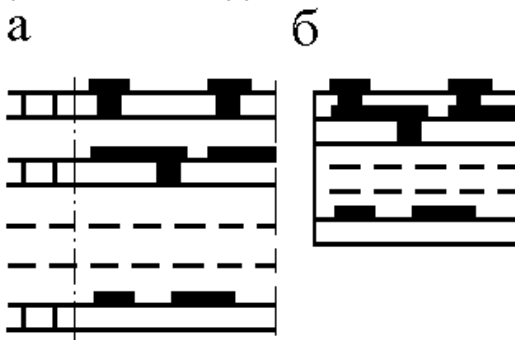


Рис. 4. 45. Коммутационная плата на основе многослойной керамики: а – отдельные керамические подложки с проводящим рисунком; б – плата в сборе

Платы на основе многослойной керамики получают в следующей последовательности (рис. 4.45). Исходные заготовки – листы необожженной алюмооксидной керамики толщиной 0,1 мм получают методом экструзии (выдавливанием пластичной керамической массы через щелевидный фильер). В углах каждого листа пробивают отверстия, при базировании на которые в слоях получают переходные отверстия диаметром 0,1...0,4 мм. Далее на поверхность и

в отверстия трафаретной печатью наносят проводящую пасту. После сушки и проверки листы собираются в определенной последовательности в пакеты и спрессовываются под высоким давлением и небольшим нагреве. После обработки контура подложки подвергаются спе-

канию при температуре 1400...1700 °С в атмосфере водорода с постепенным (для удаления органики из пасты) нагревом. При отжиге протекают два параллельных процесса: вжигание проводящего рисунка в керамику и спекание (взаимодиффузия) частиц окислов, из которых состоит керамическая масса. Из-за высоких температур отжига вместо высокоэлектропроводных серебряно-палладиевых паст используют пасты на основе частиц тугоплавких (но менее электропроводных) металлов (W или Mo). Выходящие на поверхность платы монтажные площадки из пасты на основе вольфрама или молибдена не допускают сварки и не смачиваются припоем. Поэтому их покрывают слоем Ni или Au, после чего облуживают. Известен пример изготовления многослойной керамической платы, содержащей 33 проводящих слоя, но для серийного производства обычно рекомендуется не более 6...8.

Многослойные платы на полиимидной пленке формируются на базе двусторонних гибких коммутационных плат толщиной 25...50 мкм, из которых изготавливают многослойные пакеты, устанавливаемые на жесткое основание. Последовательность изготовления двусторонних плат (рис. 4.46, а): получение отверстий фотолитографией (диаметр отверстий примерно равен толщине подложки); вакуумная металлизация полиимида слоем Cr – Cu – Cr толщиной 1...2 мкм; получение КМ из ФР; травление Cr с открытых участков; гальваническое осаждение Cu – Ni – SnBi; удаление ФР; последовательное травление слоев Cr, Cu, Cr.

Многослойные платы получают (рис. 4.46, б) путем установки двухслойных плат (обычно не более 10) на жесткое основание с контактными площадками для соединения через фигурные изоляционные прокладки из полиимида. Соединение с контактными площадками производится с помощью пайки через переход-

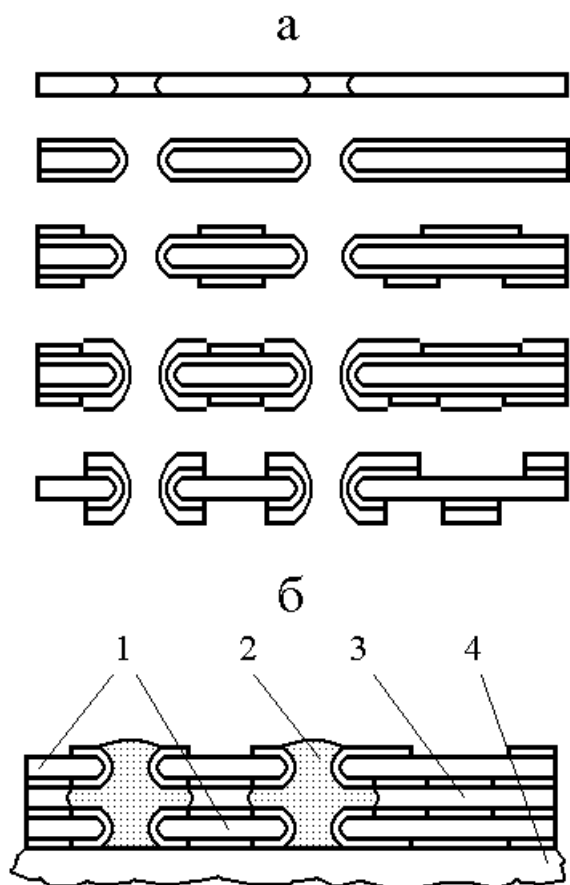


Рис. 4.46. Коммутационные платы на полиимидной пленке:  
а – изготовление отдельных плат; б – платы в сборе: 1 – двусторонние платы; 2 – переходы; 3 – изоляционные прокладки из полиимида; 4 – подложка

ные металлизированные отверстия. В качестве жесткого основания используют металлические пластины с диэлектрической изоляцией, что обеспечивает хороший теплоотвод.

Чаще всего применяют анодированный алюминий, на поверхности которого тонкопленочной технологией нанесен коммутационный рисунок (иногда с резисторами).

#### 4.4. Полупроводниковые интегральные схемы

Полупроводниковые интегральные схемы (ППИС) являются наиболее распространенной элементной базой ЭС.

ППИС значительно превосходят ГИС по степени интеграции и быстродействию, но уступают им по точности и стабильности пассивных элементов.

Базовыми элементами большинства ППИС являются биполярные и униполярные (полевые) транзисторы. На основе их структуры могут быть получены диоды, резисторы и конденсаторы. Простейшие варианты структур этих элементов приведены на рис. 4.47.

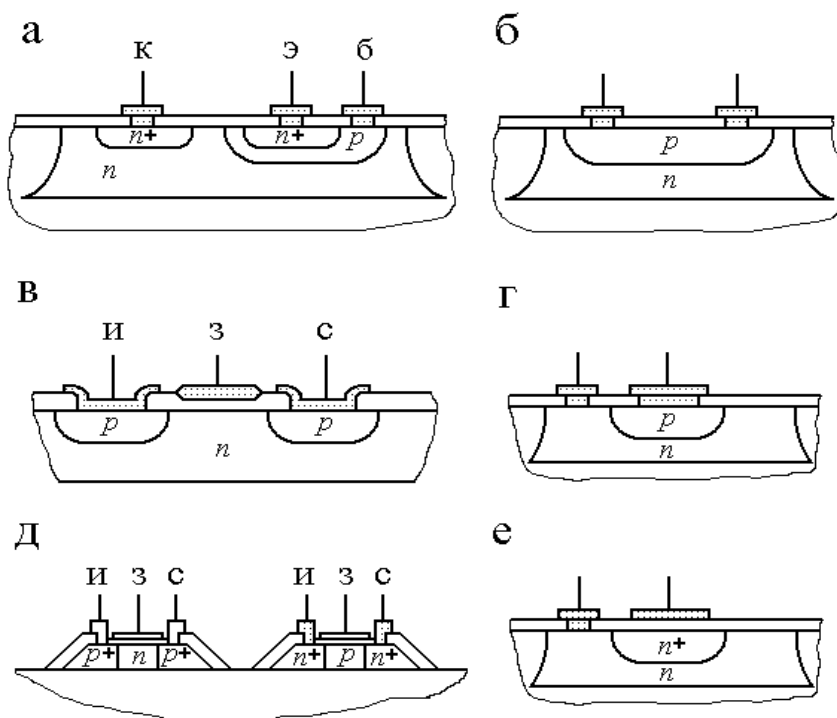


Рис. 4.47. Элементы ППИС:

- а – биполярный транзистор; б – диффузионный резистор; в – полевой (МДП) транзистор; г – диффузионный конденсатор; д – КМДП-транзисторы на сапфире; е – МДП-конденсатор

Элементы ППИС соединяются тонкопленочной металлизацией.

Пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивности) также могут быть сформированы по тонкопленочной технологии на поверхности полупроводниковой подложки (такие схемы называют совмещенными).

Биполярные транзисторы, по сравнению с полевыми, обладают большим быстродействием, но занимают больше места на подложке, так как нуждаются в изоляции друг от друга (обратно смещенным  $p-n$  переходом, диэлектриком и т.д.).

Полупроводниковые структуры могут быть сформированы как в активной (полупроводниковой) подложке, так и в тонком эпитаксиальном слое, осажденном на поверхность пассивной (диэлектрической) подложки.

Формирование МДП- транзисторов на монокристаллических диэлектрических подложках (например, сапфире – монокристалле  $Al_2O_3$ ) позволяет снизить паразитные связи между элементами.

Для изготовления ППИС чаще всего (более 90% мирового производства) используют подложки из монокристаллического кремния с определенным удельным сопротивлением и типом проводимости ( $n$  или  $p$ ). Толщина подложек составляет от нескольких десятков до сотен мкм, а диаметр - 100...300 мм с постоянной тенденцией к увеличению верхней границы, что позволяет более эффективно использовать групповые методы обработки. Круглая форма подложек определяется основным способом получения монокристаллических слитков – вытягиванием из расплава.

Перспективным материалом считается арсенид галлия. Он обладает высокой подвижностью электронов, прозрачен в инфракрасной области, имеет высокую теплопроводность и хорошие электрооптические свойства. Схемы, построенные на арсениде галлия, превосходят кремниевые по быстродействию и радиационной стойкости. Широкое использование арсенида галлия ограничивается трудностями получения монокристаллов больших размеров и создания изолирующих слоев.

Производство ППИС отличается повышенными требованиями к чистоте помещений, прецизионности оборудования, квалификации персонала и т.д.

Основными технологическими процессами, применяемыми для формирования полупроводниковых структур, являются: оксидирование кремния, диффузия, эпитаксия, ионное легирование, литография, металлизация (получение внутренних соединений).

## Оксидирование кремния

На поверхности кремниевых подложек сравнительно легко создаются пленки  $\text{SiO}_2$ . Они имеют тот же химический состав, что и кварцевое стекло, обладают хорошими диэлектрическими свойствами и стойкостью к физическим и химическим активным средам. Пленки  $\text{SiO}_2$  (толщиной от десятых долей мкм до 1 мкм) после соответствующей конфигурации (например, фотолитографией) используются в качестве изолирующих и защитных слоев, подзатворного диэлектрика в МДП-структурах, а также в качестве КМ при локальном изменении типа проводимости (рис. 4.48).

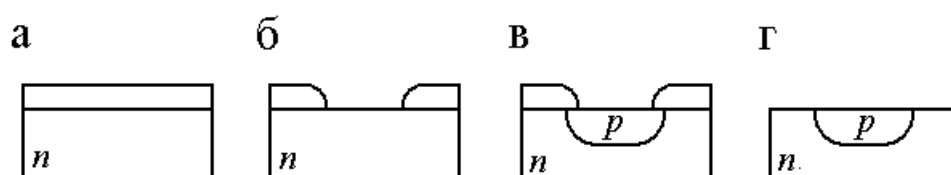


Рис. 4.48. Локальное изменение типа проводимости кремния:  
а – окисление поверхности; б – фотолитография; в – внедрение примеси;  
г – травливание окисла

Пленки  $\text{SiO}_2$  на поверхности кремниевой подложки могут быть получены путем окисления последней (термическим или анодным), а также осаждением из газовой или жидкой фазы. Наибольшее распространение получил метод термического окисления в потоке сухого кислорода и увлажненных газов (рис. 4.49, а).

Термическое оксидирование проводится при температуре  $1100^\circ\text{C}$  обычно с чередованием окисления в сухом и во влажном кислороде (парах воды). В первом случае получают пленки  $\text{SiO}_2$  высокого качества, но скорость роста пленок не высока. Скорость роста пленок во влажном кислороде более высокая, но их качество несколько ниже.

Тонкие пленки подзатворных диэлектриков выращиваются в сухом кислороде или в газовой среде кислорода с хлорсодержащими добавками. Эти добавки способствуют нейтрализации примесных ионов калия и натрия, в результате чего повышается электрическая прочность окисных пленок.

## Диффузия

Диффузия – процесс переноса легирующих примесей из областей с большей концентрацией в области с меньшей концентрацией. Движущей силой диффузии является градиент концентраций. Нагрев

способствует ускорению диффузии. Рассмотренный выше процесс термического окисления также является разновидностью диффузии  $O_2$  в Si. В производстве ППИС диффузия применяется, чаще всего, для локального изменения типа проводимости путем внедрения атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку полупроводника. При этом образуется область с противоположным типом проводимости, ограниченная  $p-n$ -переходом (рис. 4.48, в). Количество вводимой примеси должно быть достаточным для компенсации существующей примеси и создания избытка, обеспечивающего проводимость противоположного типа.

Для легирования кремния чаще всего используются атомы III (акцепторы, например, В) и V (доноры, например, Р) групп периодической системы. В первом случае кремний приобретает проводимость  $p$ -типа, а во втором –  $n$ -типа. Легирующие примеси используются обычно в виде соединений (ангидридов, галогенидов, гидридов), обладающих достаточной летучестью и обеспечивающих необходимую концентрацию примеси. Такие соединения называют диффузантами. В зависимости от их состояния при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  различают твердые, жидкие и газообразные диффузантами. В зону диффузии диффузантами вводят в парообразном (твердые и жидкие после соответствующего нагрева) или газообразном состоянии.

В установках диффузии из газообразных источников (рис. 4.49, б) в качестве последних используют, в основном, гидриды примесей ( $PH_3$ ,  $B_2H_6$  и др.). Они поставляются в баллонах в смеси с инертным газом.

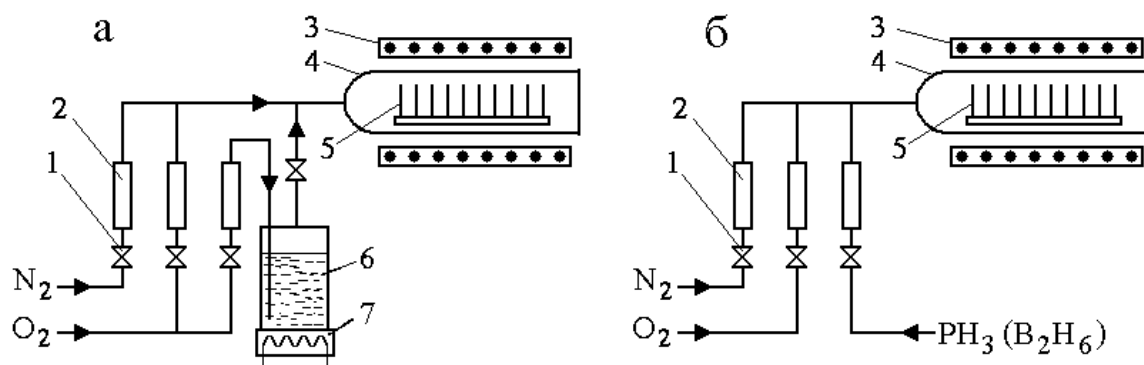


Рис. 4.49. Схемы установок термического окисления кремния (а) и диффузии из газообразных источников примеси (б):

1 – вентили; 2 – ротаметры для измерения расхода газов; 3 – печь; 4 – кварцевая труба;

5 – подложки на подставке; 6 – деионизованная вода; 7 –нагреватель

Пластины кремния помещают в кварцевую трубу, нагреваемую однозонной печью до температуры  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поддерживаемой с точностью  $0,2...0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Первая стадия процесса, называемая «загонкой примеси», начинается с пропускания инертного газа ( $N_2$  или Ar) через всю систему с целью ее очистки. Затем некоторое время пропускается смесь  $O_2 + N_2$ , чтобы получить тонкую пленку, предохраняющую поверхность кремния от испарения, травления и т.д. После подачи газообразной примеси (в присутствии  $O_2$ ) происходит формирование слоя  $SiO_2$ , содержащего заданную концентрацию диффузанта, и начинают протекать реакции диффузанта с кремниевой подложкой с выделением донорной (или акцепторной) примеси.

Во второй стадии осуществляется собственно диффузия легирующего элемента в полупроводник. При этом диффузанта и  $O_2$  либо по-прежнему подаются, либо их подача прекращается. Эта стадия называется «разгонка примеси».

Однозонные диффузионные печи могут быть использованы как для термического оксидирования, так и жидкостной или газовой диффузии (при соответствующей замене питателей).

## Эпитаксия

Эпитаксией называют процесс наращивания слоев с упорядоченной кристаллической структурой путем использования ориентирующего действия подложки (повторения ее структуры). Если подложка и слой состоят из одного вещества, то процесс называют гомоэпитаксией (например, кремний на кремнии), если из различных – гетероэпитаксией (например, кремний на сапфире).

В процессе выращивания эпитаксиальной пленки в нее можно вводить легирующие примеси, создавая полупроводниковые пленки с определенными свойствами (типом проводимости, удельным сопротивлением и т.д.). Например, на поверхности кремния *n*-типа проводимости можно вырастить слой кремния (толщиной обычно 1...25 мкм) *p*-типа проводимости. В отличие от диффузии, здесь удастся получить четкие границы между слоями с различным типом проводимости.

Для получения эпитаксиальных слоев кремния наибольшее распространение получил хлоридный метод. Процесс протекает в реакторе вертикального (рис. 4.50) или горизонтального типа, содержащем кварцевую трубу, установленную в индуктор ВЧ-генератора.

Подложки устанавливают на графитовой пирамиде, грани которой имеют наклон  $5...7^\circ$ . Каждый из газов подается из баллона по отдельной магистрали, содержащей фильтр, регулятор давления, запорный вентиль, манометр, ротаметр и электромагнитный клапан.

После загрузки пластин и герметизации реактора систему продувают азотом (для удаления воздуха), а затем водородом. Далее следует нагрев до  $1200^\circ C$  и выдержка в атмосфере водорода, в течение



которой происходит восстановление окисных пленок кремния и их удаление с поверхности.

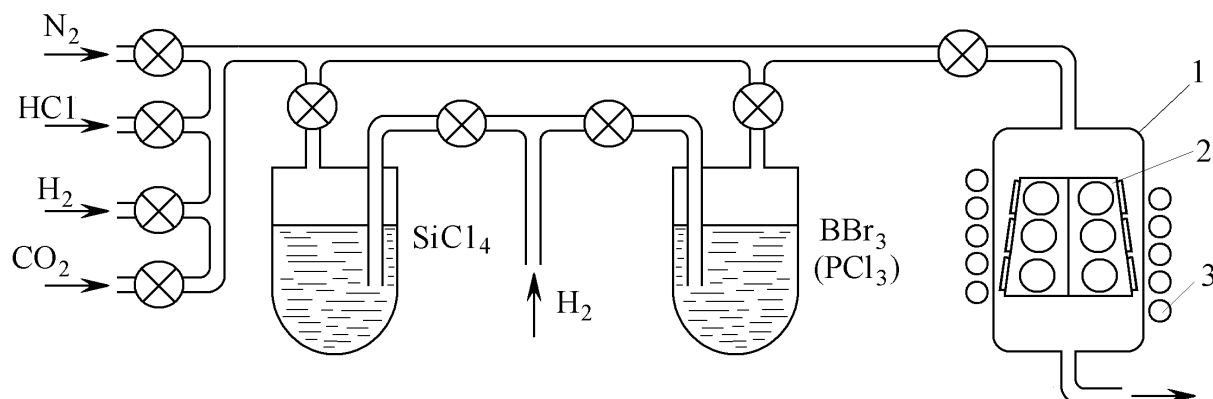
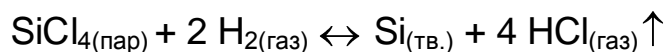


Рис. 4.50. Схема установки эпитаксиального наращивания из парогазовой фазы с вертикальным реактором:

1 – реактор; 2 – держатель пластин; 3 – индуктор

Затем камеру заполняют газовой смесью HCl + H<sub>2</sub> для травления (на глубину в несколько мкм) нарушенного слоя и остатков SiO<sub>2</sub>. После очистки систему продувают водородом, после чего подают SiCl<sub>4</sub> и легирующую примесь (BBr<sub>3</sub> или PCl<sub>3</sub>).

В результате реакции



тетрахлорид кремния разлагается и на кремниевую подложку осаждается кремний, который принимает структуру лежащего под ним слоя. При подаче CO<sub>2</sub> на поверхности эпитаксиальной пленки может быть получена пленка SiO<sub>2</sub>. После окончания процесса подложку охлаждают потоком чистого водорода.

### Ионное легирование

Ионное легирование (или ионная имплантация – способ получения *p-n*-переходов путем введения примеси в виде ускоренных ионов (рис. 4.51, а).

Ионы легирующего элемента образуются в плазме дугового разряда, создаваемого в газоразрядной камере установки, куда поступают пары рабочего вещества, содержащего легирующий элемент.

Положительные ионы вытягиваются электрическим полем и попадают в магнитный сепаратор (масс-анализатор). Там под действием

магнитного поля ионы (в т.ч. сопутствующие) движутся по дугам окружностей, радиусы которых для ионов различной массы будут различными. Ионы легирующего элемента выделяются с помощью щелевой диафрагмы. Далее поток выделенных ионов попадает в ускоритель, фокусируется и с высокой скоростью бомбардирует поверхность подложки. В зависимости от конструкции установки пучок ионов, падающих на подложку, может быть широким (площадь в несколько см<sup>2</sup>), щелевым или остросфокусированным. Он также может быть стационарным или сканирующим. В системе поддерживается вакуум порядка 10<sup>-4</sup> Па, чтобы ионы не испытывали столкновений со средой и не рассеивались.

Схема одного из вариантов рабочей камеры приведена на рис. 4.51, б.

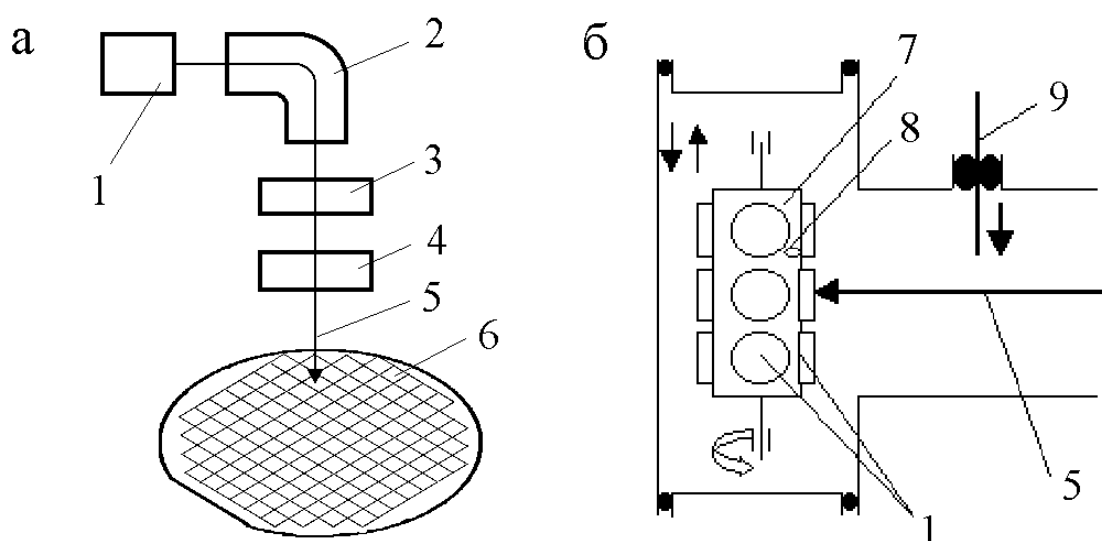


Рис. 4.51. Схемы установки (а) и рабочей камеры (б) ионного легирования:  
 1 – источник ионов; 2 – магнитный сепаратор; 3 – ускоритель; 4 – фокусирующее устройство; 5 – пучок ионов; 6 – подложка; 7 – держатель подложек; 8 – датчики; 9 – вакуумный затвор

Подложки с оксидной маской размещаются по периферии держателя (контейнера) в несколько ярусов. В процессе облучения подложек неподвижным ленточным лучом держатель вращается и совершает возвратно-поступательное движение. Подложки, таким образом, постепенно набирают необходимую дозу легирования, контролируруемую датчиками, которые располагаются между ними. По достижении необходимой дозы системой контроля вырабатывается сигнал, отключающий ионный луч.

Перед выгрузкой контейнера с обработанными подложками вакуумный затвор отсекает рабочую камеру от остального объема установки, камеру открывают и производят замену контейнера с пласти-

нами. После закрытия камеры и открывания затвора вакуумные насосы восстанавливают рабочее давление и начинается следующий цикл обработки.

Глубина проникновения ионов в подложку, главным образом, зависит от их энергии и размеров и обычно не превышает 1...2 мкм.

При торможении ионов в подложке происходит деформация кристаллической решетки. Внедренная примесь может оказаться как в узлах, так и между узлами решетки. Установлено, что примесь может эффективно проявлять донорные или акцепторные свойства находясь преимущественно в узлах решетки. Для восстановления нарушенного слоя и перевода внедрённой примеси в активное состояние прибегают к отжигу поверхностного слоя путём облучения коротким (порядка 1 мс) и мощным импульсом инфракрасного излучения.

Ионная имплантация (как и диффузия) допускает полное (все поверхности подложки) и локальное легирование. Локальное легирование производится через КМ (обычно из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) или сканированием сфокусированным ионным пучком. Материал КМ должен обеспечивать более сильное (по сравнению с материалом подложки) торможение ионов и слабо распыляться под действием ионной бомбардировки.

Основные преимущества ионной имплантации, по сравнению с термической диффузией:

1) процесс не требует нагрева пластин и, следовательно, не приводит к изменению параметров ранее сформированных слоёв (за счёт диффузионной разгонки);

2) так как ионный пучок перпендикулярен к пластине, размеры легированной области более точно соответствуют размерам окна в КМ;

3) количество введённой примеси точно дозируется (контролируется в процессе облучения).

Недостатком процесса ионной имплантации является то, что при постоянной энергии ионов невозможно получить глубоко залегающий переход с одновременным присутствием примеси на поверхности. В связи с этим на практике применяют один из процессов (рис. 4.52).

1. Ступенчатый процесс - непрерывное и глубокое распределение примеси от поверхности до перехода обеспечивается несколькими ступенями легирования при различных энергиях, причём первый (глубокий) профиль обеспечивает заданную глубину залегания  $p$ - $n$  перехода  $X_n$ , а последний (у поверхности) - необходимую поверхностную концентрацию  $N_0$  (рис. 4.52, а).

2. Комбинированный процесс – имплантационная загонка примеси при низкой энергии обеспечивает необходимую дозу легирования и

присутствие примеси на поверхности, а диффузионная разгонка – заданную глубину залегания  $p$ - $n$ -перехода  $X_n$  (рис. 4.52, б).

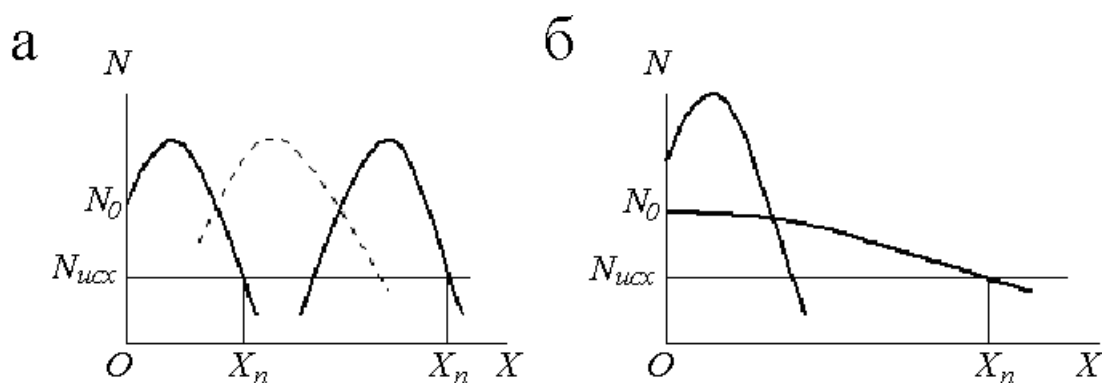


Рис. 4.52. Формирование глубоких профилей:  
 а – ступенчатый процесс; б – комбинирование имплантационной загонки с диффузионной разгонкой

## Литографические процессы в производстве ППИС

При изготовлении ППИС применяют (в зависимости от размеров элементов) различные виды литографии: фото-, рентгено-, электроно- и ионную литографию.

Разрешающая способность фотолитографии с  $\lambda = 300...400$  нм и ФШ, выполненными в масштабе 1:1, ограничивается, главным образом, дифракционными явлениями. Для уменьшения дифракции прежде всего используют источники облучения с меньшей длиной волны.

*Рентгеновская литография* (РЛ) является разновидностью оптической печати на микрозазоре, в которой длина электромагнитной волны экспонирующего облучения лежит в диапазоне 0,4...5 нм (мягкие лучи). Вследствие малой длины рентгеновских лучей существуют технические трудности по их отражению и преломлению с использованием зеркал и линз. Поэтому применение РЛ ограничено теневой печатью (рис. 4.53).

Рентгеновское излучение получают в результате облучения мишени (анода) потоком ускоренных электронов. Чтобы избежать термического испарения мишени её вращают с большой скоростью (8000 об/мин) и охлаждают водой. Лучи проходят через окно вакуумной камеры и через рентгеношаблон экспонируют специальный резист (рентгенорезист).

Вакуумная камера заполняется гелием ( $\sim 1,3$  Па), слабо поглощающим рентгеновское излучение. Тонкая бериллиевая фольга (10...30 мкм) изолирует камеру от внешней среды и задерживает вторичные электроны.

Длина волны излучения зависит от материала мишени – 0,837 нм (для Al) и 0,437 нм (для Pd).

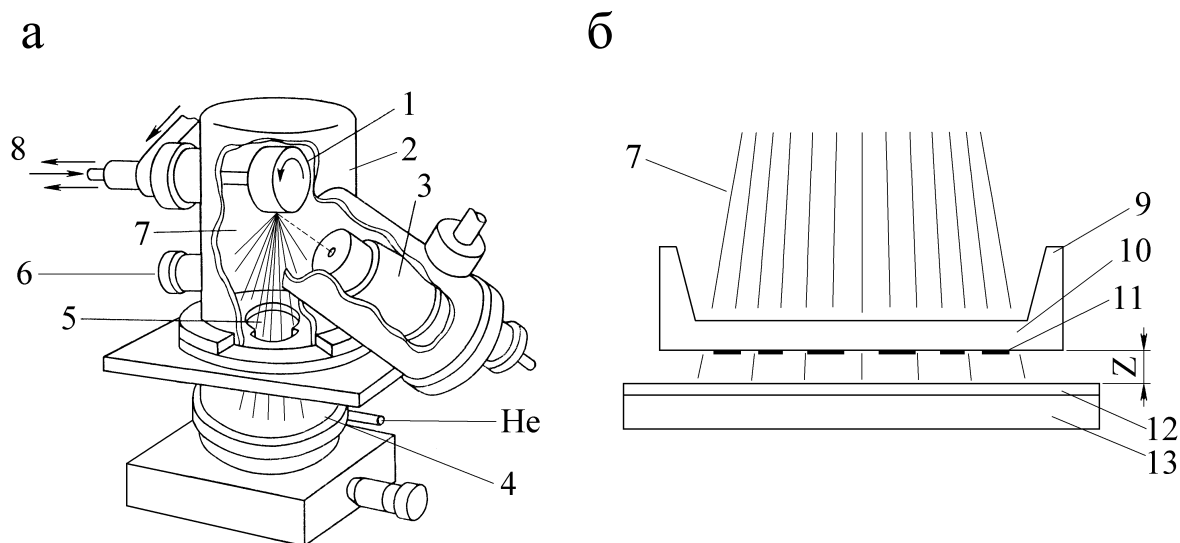


Рис. 4.53. Установка РЛ (а) и схема экспонирования (б):

1 – мишень; 2 – вакуумная камера; 3 – электронная пушка; 4 – подложка и рентгеношаблон;

5 - бериллиевое окно; 6 – патрубок для откачки; 7 – рентгеновские лучи; 8 – вода;

9 – рамка рентгеношаблона; 10 – мембрана рентгеношаблона (толщиной ~ 6 мкм);

11 – тонкопленочный рисунок; 12 – рентгенорезист; 13 – подложка;

Z – зазор (~ 10 мкм)

Рентгеновские шаблоны состоят из участков слабо и сильно поглощающих рентгеновские лучи. Конструкция таких шаблонов состоит из подложки в виде рамки с тонкой мембраной (обычно из Si), на поверхность которой нанесен тонкопленочный рисунок (из Au).

Расходящиеся лучи вносят искажения в размеры печатаемых элементов, что ограничивает разрешающую способность РЛ.

В целом, по сравнению с традиционной фотолитографией, РЛ обладает более высокой разрешающей способностью, но установки для её проведения уникальны и дороги, их использование оправдано при изготовлении ППИС с субмикронными размерами элементов. Конкурирующим способом является электронная литография.

В основе *электроно - лучевой литографии* (ЭЛЛ) лежит избирательное экспонирование потоком электронов специального резиста, называемого электронрезистом.

В отличие от УФ и рентгеновских лучей, поток электронов не является электромагнитным излучением. Поэтому эффекты дифракции и интерференции здесь практически отсутствуют. С другой стороны, в отличие от электрически нейтральных фотонов, электроны несут заряд, что позволяет формировать и отклонять пучок электронов с ис-

пользованием электрических и магнитных полей, т.е. средствами электронной оптики.

Длина волны движущегося прямолинейно электрона зависит от его энергии и может быть оценена как  $\lambda = h/mv$ , где  $h$  – постоянная Планка;  $m, v$  – соответственно масса и скорость электрона. Заменяя  $mv^2/2 = eU$  и подставляя константы, получим  $\lambda = \sqrt{1,5/U}$ , где  $U$  – напряжение ускоряющего электрического поля. При  $U = 15$  кВ получим  $\lambda = 0,01$  нм, т.е. в десятки тысяч раз меньше длины волны УФ излучения и почти в 100 раз меньше рентгеновского.

ЭЛЛ может быть проекционной и сканирующей (рис. 4.54).

В проекционных вариантах ЭЛЛ изображение может передаваться в масштабе 1:1 или с уменьшением. На рис. 4.54, а приведен пример проекционной ЭЛЛ, основанный на использовании фотокатода.

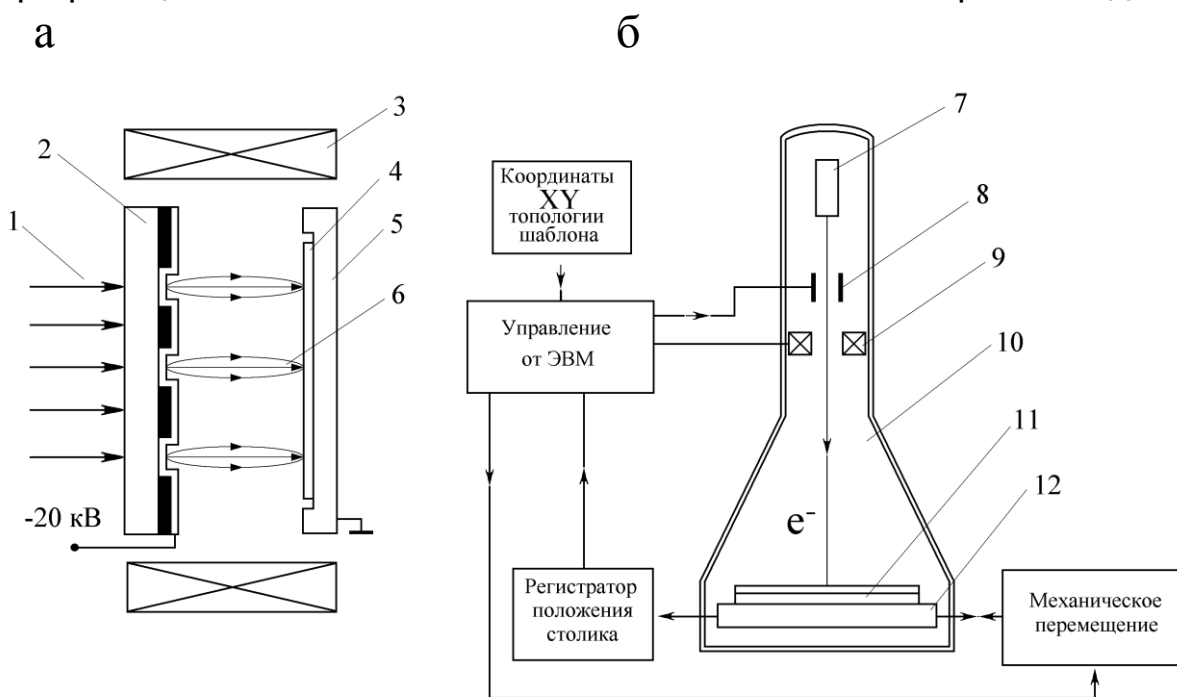


Рис. 4. 54. Схема ЭЛЛ: а – проекционной; б – сканирующей:

- 1 – УФ излучение; 2 – шаблон-фотокатод; 3 – магнитная система; 4 – подложка с электронрезистом; 5 – анод; 6 – поток электронов; 7 – электронная пушка; 8 – прерывание луча; 9 – отклоняющие катушки, линзы; 10 – вакуумная камера; 11 – подложка с электронрезистом; 12 – столик

Шаблон представляет собой кварцевую пластину (хорошо пропускающую УФ лучи) с тонкопленочным рисунком и покрытием из материала, обладающим высокими фотоэмиссионными свойствами (например, CsJ). Формирование изображения происходит в однородных электрическом и магнитном полях. Эмиттированные фотоэлектроны ускоряются электрическим полем и с помощью магнитной фокусирующей системы проецируют изображение с катода на слой электро-

норезиста практически без искажений. Такой вариант ЭЛЛ позволяет изготавливать ППИС с минимальной шириной линии около 1 мкм.

Сканирующие системы позволяют получать линии шириной 0,1...0,4 мкм.

Установлено, что экспонированная линия электронорезиста оказывается шире размера сечения электронного луча примерно на толщину слоя резиста. Это объясняется значительным рассеиванием электронов в слое электронорезиста, что ограничивает разрешающую способность ЭЛЛ.

Меньшее рассеивание, и, следовательно, более высокую разрешающую способность можно получить, если заменить электроны на частицы, производящие аналогичные преобразования в резисте, но отличающиеся большей массой – например, ионами.

Технологический процесс, использующий обработку резистов лучом, состоящим из потока ускоренных ионов, получил название ионной или *ионно-лучевой литографии* (ИЛЛ). В установках ИЛЛ обычно используются ионы газов (водорода, гелия) или легкоплавких металлов (галлия, висмута и др.).

Проекционный вариант ИЛЛ с экспонированием резиста лучами, прошедшими через подложку шаблона, трудно реализуем из-за малой проникающей способности ионов. Иногда применяют (рис. 4.55, а) шаблоны в виде тонкой фольги с отверстиями (аналогичные используются и в ЭЛЛ). Но это возможно лишь для относительно простых рисунков. Сканирующая установка ИЛЛ (рис. 4.55, б) подобна применяемой в ЭЛЛ.

Поток ускоренных ионов может производить изменения не только в структуре органических резистов, но и в пленках других материалов (например, Ni, SiO<sub>2</sub>). Облученные участки в результате радиационного повреждения приобретают (в отличие от остальных) способность к растворению в определенных травителях (рис. 4.55, в), что позволяет конфигурировать пленки по безмасочной технологии.

Сканирующие варианты ЭЛЛ и ИЛЛ обладают высокой разрешающей способностью, но производительность их не высока. Например, для обработки пластины диаметром 125 мм электронным лучом 0,5 мкм требуется около 1 часа. Поэтому основное применение сканирующей ЭЛЛ – производство шаблонов для фото-, рентгено- и электронолитографии.

Методы проекционной фотолитографии обладают высокой производительностью и требуют менее сложного оборудования. Поэтому их развитию уделяется большое внимание, особенно в области дальнего ультрафиолета ( $\lambda = 10...200$  нм). Одним из таких направлений является EUV (Extreme Ultra Violet) – литография, использующая излучение с длиной волны порядка 13 нм. Электромагнитные волны с

малой длины волны испытывают сильное преломление и поглощение при прохождении через стеклянные ФШ и линзы. Поэтому в области дальнего ультрафиолета используются отражательные системы.

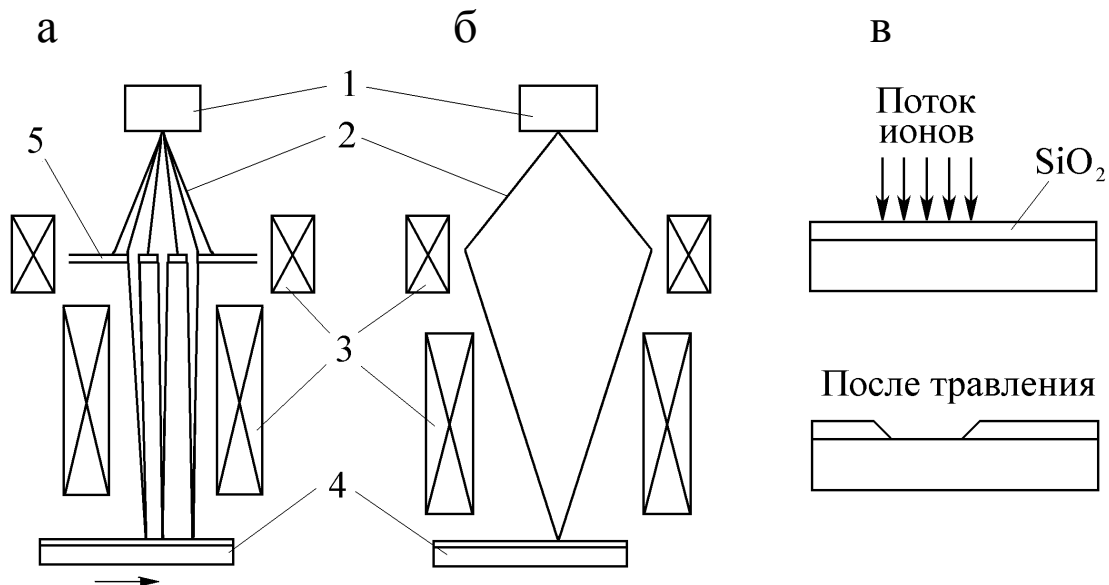


Рис. 4.55. Схемы проекционной (с уменьшением изображения) (а), сканирующей остросфокусированным ионным пучком (б) и безрезистивной ИЛЛ (в): 1 – источник ионов; 2 – ионный пучок; 3 – фокусирующая система; 4 – подложка; 5 – шаблон с отверстиями

Схема одного из вариантов EUV-литографии приведена на рис. 4.56.

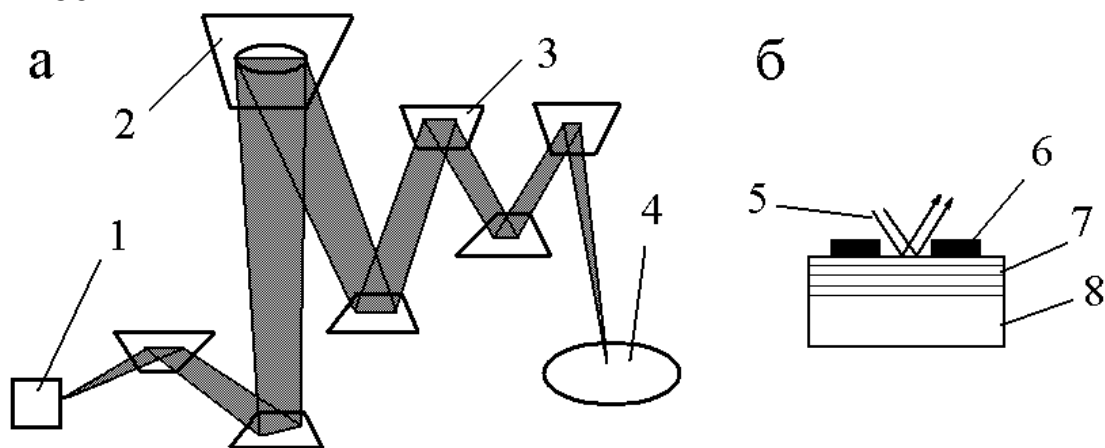


Рис. 4.56. Схема EUV-литографии (а) и разрез отражающего шаблона (б): 1- источник излучения; 2- шаблон; 3 – зеркала; 4 – подложка; 5 – EUV-лучи; 6 – поглощающие участки; 7 – покрытие из 40...80 парных слоев Mo/Si; 8 – подложка шаблона

Отражающие участки ФШ и вогнутые поверхности зеркал содер-



жат покрытие из нескольких десятков парных слоев Mo/Si с толщиной каждого слоя в несколько атомов ( $\sim \lambda/4$ ).

Ожидается, что применение EUV-литографии позволит получать элементы шириной 30 и менее нм (рис.4.57)

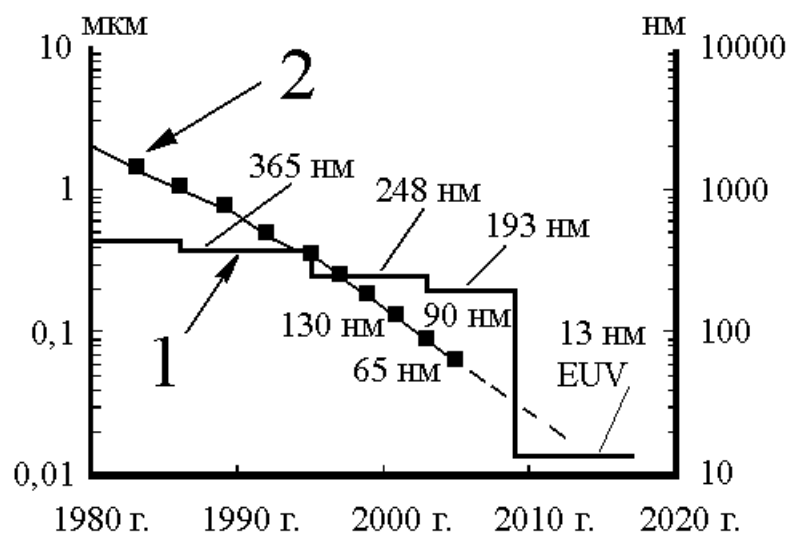


Рис. 4.57. Динамика развития фотолитографических процессов:  
1 – длина волны актиничного излучения; 2 – минимальные размеры элементов ППИС

Большое влияние на разрешающую способность литографических процессов оказывает метод травления. Для несложных ППИС применяется влажное травление (погружением или пульверизацией), а для БИС и СБИС – сухое плазменное.

Для влажного химического травления характерна высокая селективность (различие в скоростях травления разных материалов, например слоя и КМ), изотропность, высокая токсичность применяемых химикатов и загрязняемость подложек.

В сухих методах продуктами реакций являются летучие вещества, удаляемые через откачную систему. Сухие плазменные процессы проводятся в вакуумных камерах, содержащих ионизированный газ – плазму. В составе плазмы, кроме отрицательных и положительных ионов, электронов и нейтральных молекул, могут также находиться свободные радикалы – крайне активные атомы или молекулы (например, F, CF<sub>3</sub>, SiF<sub>3</sub>). Радикалы образуются в плазме из специально вводимых соединений (CF<sub>4</sub>, SiF<sub>4</sub> и др.).

В зависимости от материала слоя, подлежащего травлению (металл, диэлектрик, полупроводник), способа возбуждения и поддержания плазмы, давления в рабочей камере ( $10^{-2} \dots 10^3$  Па), состава газовой смеси и конструкции устройства при травлении слоев может преобладать тот или иной механизм: физическое распыление в результа-

те бомбардировки ионами инертных газов (ионное травление), химическое взаимодействие с активными заряженными или нейтральными частицами (плазмохимическое травление), а также комбинированное воздействие (ионно-плазменное травление).

Ионы инертных газов, направляемые перпендикулярно подложке, позволяют получать рисунки с практически вертикальными стенками, но селективность такого процесса низка (примерно с той же скоростью идет разрушение КМ).

При плазмохимическом травлении разряд возбуждается в химически активных газах или парах, ионы и радикалы которых химически взаимодействуют с поверхностным слоем. Плазмохимическое травление имеет высокую селективность, но степень анизотропии его не высока.

Более широкие возможности у ионно-плазменного травления, сочетающего достоинства двух предыдущих методов. При этом физическое распыление активизирует химические реакции, а химические реакции, ослабляя связи поверхностных атомов, способствуют физическому распылению.

## Металлизация

Металлизация ППИС включает в себя процессы получения контактов, межсоединений и контактных площадок. По основным требованиям и применяемой технологии внутренняя электрическая разводка ППИС и тонкопленочных ГИС во многом схожи. Главная особенность металлизации ППИС связана с необходимостью контактирования с активными (*p*- или *n*- типа) областями, а также, как правило, предельной микроминиатюризацией.

Например, при ширине линий  $< 2$  мкм возрастает интенсивность электромиграции, теоретически оптимальное круглое сечение проводников не может быть реализовано в планарных структурах, поэтому для субмикронных линий необходим переход к квадратному сечению и т.д. Металлизация ППИС может быть одно- или многоуровневой, выполняться из одного или разных материалов (рис. 4.58).

Наиболее предпочтительным является вариант «б», но для его реализации трудно подобрать высокопроводящий материал, который бы обеспечивал надежный контакт с активными областями (без химического взаимодействия и взаимной диффузии). В структурах, выполненных по варианту «в», в качестве контактного слоя используют W, Mo, Cr, Ti, а коммутацию выполняют из драгметаллов (Au, Pt).

Основным материалом для создания контактов, затворов в МДП-структурах и контактных площадок в кремниевых ППИС по варианту «б» является Al. Он отвечает многим требованиям, но с областями

$n$ -типа образует выпрямляющий контакт. Чтобы этого избежать, при-  
 контактную область выполняют высоколегированной ( $n^+$ ) с концентра-  
 цией примеси не менее, чем  $5 \cdot 10^{17}$  атомов/см<sup>3</sup> (рис. 4.58, а).

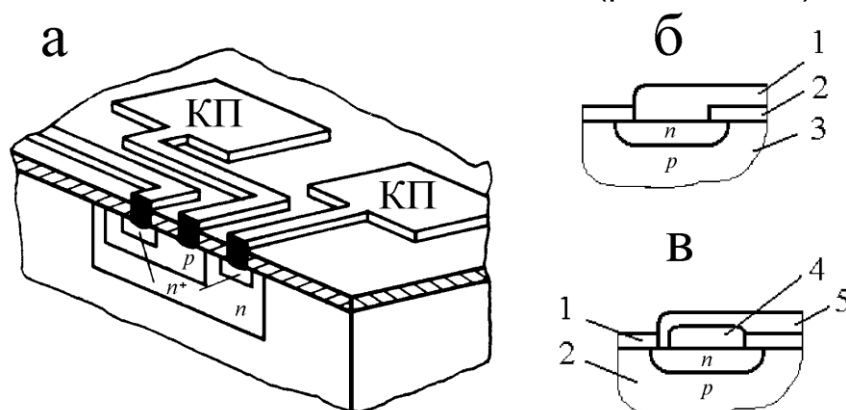


Рис. 4.58. Фрагмент одноуровневой коммутации ППИС и варианты её выполнения:  
 а – из одного материала; б – из двух материалов; 1 – контактные площадки для  
 внешних связей; 2 – SiO<sub>2</sub>; 3 – полупроводниковая структура;  
 4 – контакт и коммутация из одного материала; 5 – контакт; 6 – коммутация

При многоуровневой коммутации (в настоящее время до 8 слоев)  
 Al используют для внутрислойных соединений, а для межслойных ис-  
 пользуется W. Межслойную изоляцию обычно выполняют из SiO<sub>2</sub>.

С уменьшением размеров проводников существенно возрастает  
 удельное сопротивление металлических пленок, а также возрастает  
 электромиграция (особенно у Al). Поэтому ведущие фирмы при пере-  
 ходе на новую технологию (AMD – на 0,18-микронную, а Intel – на  
 0,13-микронную) стали использовать медные соединения. В отличие  
 от Al, медь характеризуется меньшей электромиграцией и лучшей  
 электропроводностью, но коэффициент ее диффузии в Si на несколь-  
 ко порядков выше, чем у Al. Поэтому в качестве контактов используют  
 W (рис. 4.59) или создают тонкий (порядка 10 нм) барьерный слой,  
 препятствующий диффузии Cu в полупроводник.

Для минимальной задержки сигналов предпочтительно, чтобы  
 отношение толщины медного проводника к его ширине составляло  
 1,6...2. Для получения медных проводников с таким сечением исполь-  
 зуют технологию dual damascene, которая выполняется в следующей  
 последовательности. В слое SiO<sub>2</sub> с использованием литографии вы-  
 травливают канавки, которые покрывают слоем (TiN или TaN), пре-  
 пятствующим диффузии Cu в SiO<sub>2</sub>. Далее термовакuumным методом  
 осаждается сплошной слой Cu с последующим доразращиванием

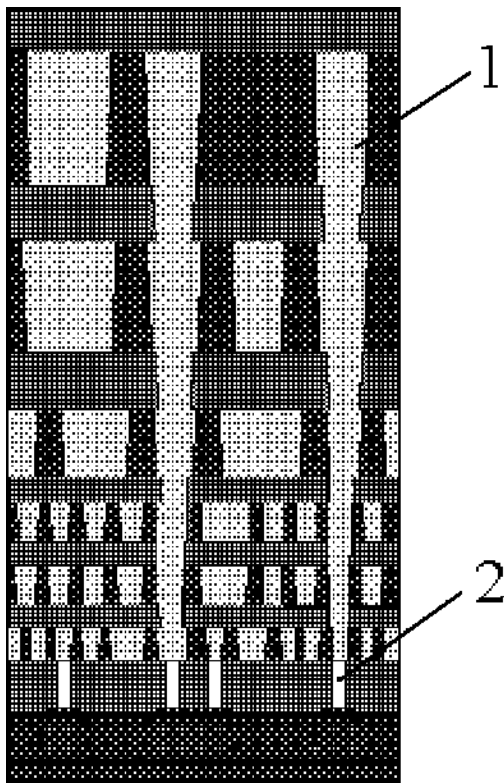


Рис. 4.59. Сечение 6-уровневой металлизации:  
1 – медь; 2 – вольфрам

гальванически. Излишки Cu снимаются шлифованием, в результате чего она остается только в канавках. Затем поверхность покрывается слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , который будет защищать созданную структуру при травлении канавок в очередном (формируемом сверху) уровне коммутации. В качестве диэлектрика для межслойной изоляции применяют  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon = 3,9$ ) и другие материалы с малым  $\epsilon$  (low-k). Ведущие фирмы работают над поиском новых материалов для межслойной изоляции, а также технологических процессов их нанесения (так как высокотемпературные методы осаждения диэлектриков способствуют дополнительной диффузии меди), что приведет к дальнейшему повышению степени интеграции. Например, фирма Intel (табл. 4.7) планирует каждые два года удваивать плотность расположения транзисторов (так называемый «закон Мура»).

Таблица 4.7

Планы фирмы Intel по внедрению новых технологических процессов

Процесс	P856	P858	Px60	P1262	P1264	P1266	P1268	P1270
Начало произ-ва, г.	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Проектная норма, нм	250	180	130	90	65	45	32	22
Диам. подложки, мм	200	200	200/300	300	300	300	300	300
Межсоединения	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	?
МДП-транзистор				Растянутый Si				
Канал	Si	Si	Si					
Диэлектрик	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2$	High-k		
Электрод затвора	Поликристаллический Si					Металл		

После того как максимально использованы групповые методы обработки и схемы прошли тестирование, подложку разделяют (с использованием абразивного инструмента или луча лазера) на отдельные кристаллы, которые в дальнейшем подлежат корпусированию или оформляются в бескорпусном варианте (для использования в ГИС и МСБ).

#### 4.5. Сборка интегральных схем и микросборок

Основные этапы сборки: монтаж компонентов, получение электрических соединений и герметизация (МСБ иногда герметизируют в составе более высоких структур).

Кристаллы монтируют на жесткие и гибкие подложки: основания корпусов (кристаллодержателей), ленточные носители (металлические, полимерные, комбинированные), подложки с тонко- или толсто- пленочной пассивной частью, коммутационные платы и т.д. Кристаллы фиксируют либо по стороне, содержащей структуры, либо – по противоположной (рис. 4.60).

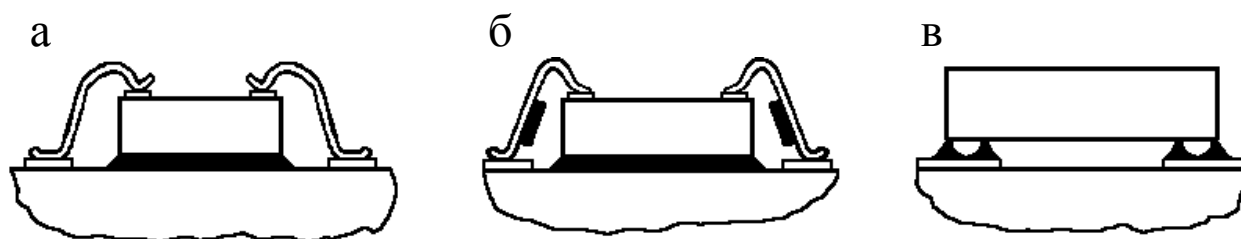


Рис. 4.60. Основные варианты установки и электромонтажа кристаллов: с фиксацией по нерабочей стороне с проволочным (а) или ленточным (б) монтажом; в – беспроводной монтаж методом перевернутого кристалла (flip chip – метод)

Для крепления кристаллов по вариантам (рис. 4.60, а и рис. 4.60, б) применяют клеи (например, эпоксидный с наполнителем в виде порошка Ag или Ni), припои (Au-Sn с  $t_{пл} = 280^{\circ}\text{C}$ , Au-Si с  $t_{пл} = 370^{\circ}\text{C}$  и др.), легкоплавкие стекла и т.д.

Наибольшее распространение получил проволочный монтаж, с использованием проволоки из Au или Al диаметром 20...30 мкм. Для получения контактных соединений проволоки применяют различные методы микросварки: термокомпрессионную, ультразвуковую, лазерную и др.

Основные виды соединений при термокомпрессионной сварке (ТКС) – внахлест и встык (рис. 4.61). В первом случае участок проволоки, нагреваемый от инструмента (обычно импульсом тока) до  $t = 300...500^{\circ}\text{C}$ , прижимается к контактной площадке с давлением порядка  $100 \text{ Н/мм}^2$ . При этом увеличивается площадь контакта и создаются условия для взаимной диффузии материалов проволоки и контактной площадки.

Для получения стыкового соединения на конце проволоки формируют шарик размером два-три диаметра проволоки. Шарик образуется за счет оплавления выступающего на 2...3 мм ниже торца инструмента конца проволоки в пламени водородной горелки или высоковольтного искрового разряда. Затем инструмент опускают на контакт-

ную площадку. Остывающий шар под давлением деформируется и принимает форму шляпки гвоздя. В отличие от соединения внахлест стыковое соединение характеризуется более высокой прочностью и для него требуется меньший размер контактной площадки. Второй конец проволоки обычно подсоединяют внахлест.

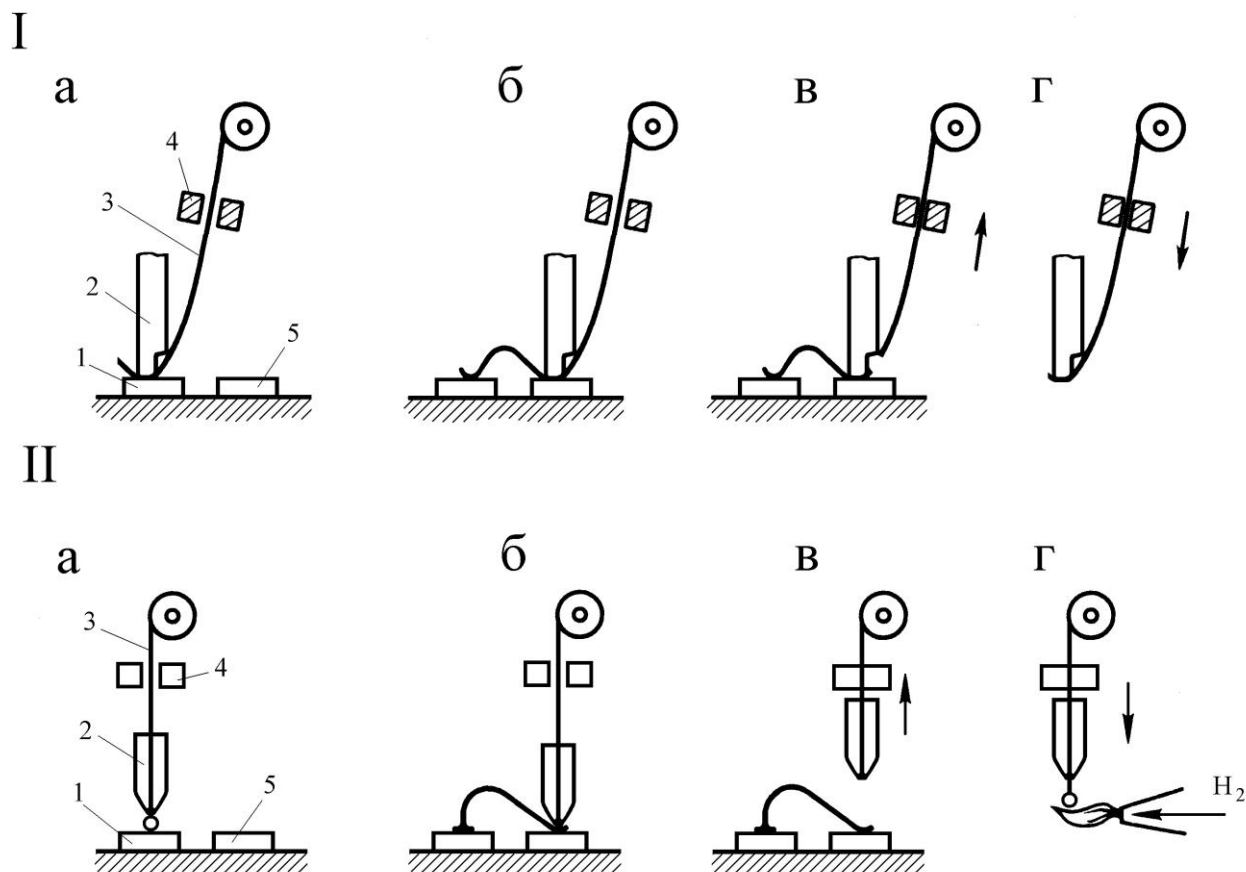


Рис. 4.61. Варианты выполнения сварки термокомпрессией: без оплавления проволоки (I) и с оплавлением (II): а – первая сварка; б – вторая сварка; в – обрыв проволоки; г – подготовка проволоки к следующей сварке: 1 – контактная площадка кристалла; 2 – сварочный инструмент; 3 – проволока; 4 – зажим; 5 – контактная площадка на монтируемой подложке (или вывод корпуса)

При ультразвуковой сварке (УЗС) инструменту передаются колебания с частотой 60...80 кГц и амплитудой 0,5...2 мкм (рис. 4.62). Давление инструмента составляет 20...450 Н/мм<sup>2</sup>. Его заточка должна исключать скольжение по верхней поверхности вывода. В результате трения участка проволоки о поверхность контактной площадки происходит нагрев области контакта и пластическая деформация проволоки. При этом разрушаются окисные пленки, обнажая чистые поверхности.

Иногда применяют комбинированный вариант ТКС и УЗС (называемый термозвуковой сваркой) с рабочей  $t = 100 \dots 240 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

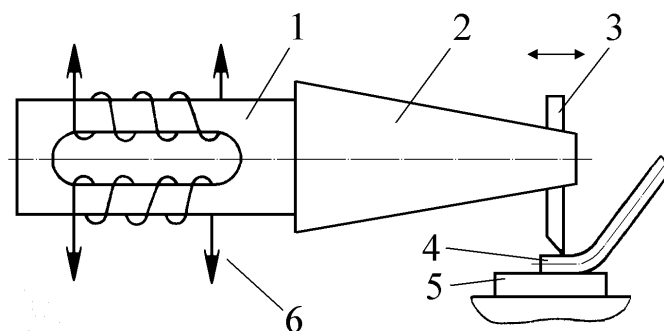


Рис. 4.62. Схема УЗС:

1 – преобразователь (вibrator); 2 – концентратор (волновод); 3 – инструмент;  
4 – проволока; 5 – контактная площадка; 6 – обмотки

Монтаж кристаллов по вариантам (рис. 4.60, б, в) реализуется преимущественно в ГИС и МСБ. Кристаллы для такого монтажа по варианту (рис. 4.60, б) выпускаются в бескорпусном виде: на ленточных носителях (рис. 4.63) и с объемными выводами.

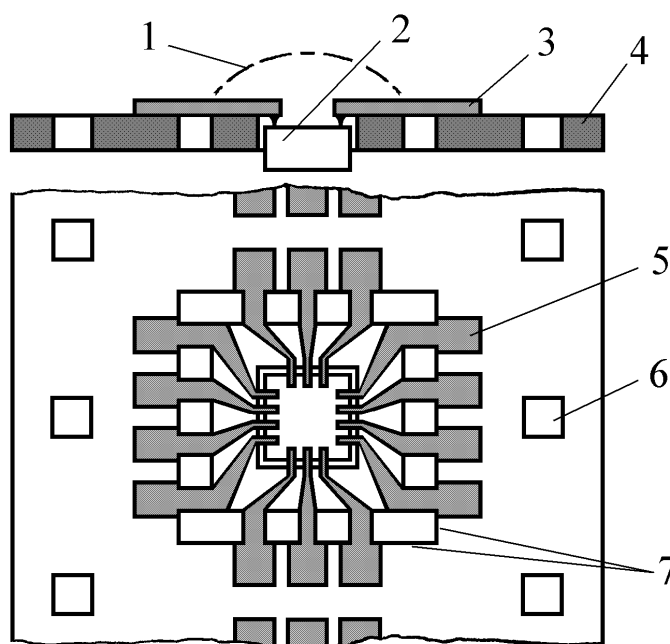


Рис. 4.63. Кадр ленточного носителя с кристаллом БИС:

1 – защитный компаунд; 2 – кристалл; 3 – выводы; 4 – полиимидная пленка-носитель; 5 – контактная площадка для контроля параметров ИС;  
6 – перфорационное отверстие; 7 – границы вырубляемого фрагмента

Ленточные кристаллодержатели обычно выполняют двухслойными, состоящими из слоя фольги из  $\text{Cu}$  или  $\text{Al}$  толщиной  $20 \dots 70 \text{ мкм}$

и слоя полиимида толщиной 40...100 мкм. Для конфигурирования металлической и изоляционной пленок используется фотолитография. На концах выводов (или на кристалле) формируют бугорки толщиной около 30 мкм. Кристаллы автоматизированным методом соединяют с выводами сваркой (ТКС, УЗС) или импульсной пайкой. Тестирование и установка кристаллов на подложки МСБ или основания корпусов также автоматизированы. После вырубки кристалл монтируют на клей или припой и присоединяют выводы (медные – пайкой, алюминиевые – сваркой).

Для монтажа по варианту (рис. 4.60, в) на кристалле (до разделения подложки) должны быть выполнены бугорки в виде полусфер (рис. 4.64) диаметром 120...500 мкм и соответствующим шагом расположения 0,15...1,0 мм (с тенденцией к постоянному уменьшению).

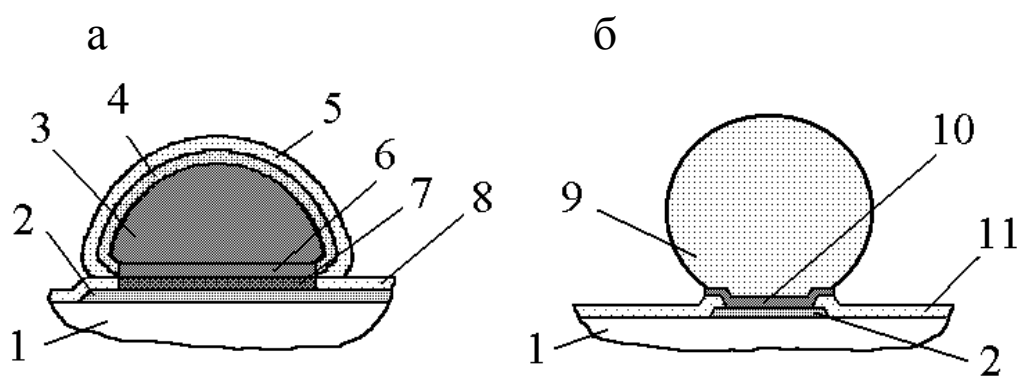


Рис. 4.64. Варианты выполнения жестких объемных выводов на кристалле ППС: 1 – кремниевая подложка; 2 – слой Al; 3 – гальваническая Cu; 4, 5 – покрытие Ni - Au (или Ag – припой); 6 – слой Cu; 7 – слой V; 8 – слой SiO<sub>2</sub>; 9 – шарик из припоя; 10 – подслой (Al-Ni-Cu); 11 – защитный слой (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> или полимер)

Для получения выводов такой формы используется термовакуумное и гальваническое осаждение, а также фотолитография. Выводы из припоя иногда получают трафаретной печатью с последующим оплавлением (в результате припой собирается в шарик). В качестве припоя используют сплавы SnPb или (в связи с отказом передовых стран от применения Pb в ЭА) сплавы Sn с Cu и/или Ag.

При монтаже кристаллов по методу flip chip (рис. 4.60, в) одновременно происходят электрические соединения всех точек. Применяют пайку (например, в струе горячего инертного газа) или сварку (ТКС, УЗС, термозвуковую).

Монтаж кристаллов flip chip – методом на полиимидную коммутационную плату позволяет создавать 3-мерные конструкции с высокой плотностью упаковки (рис. 4.65).



Кристаллы и электрические соединения с ними подлежат защите от внешней среды герметизацией.

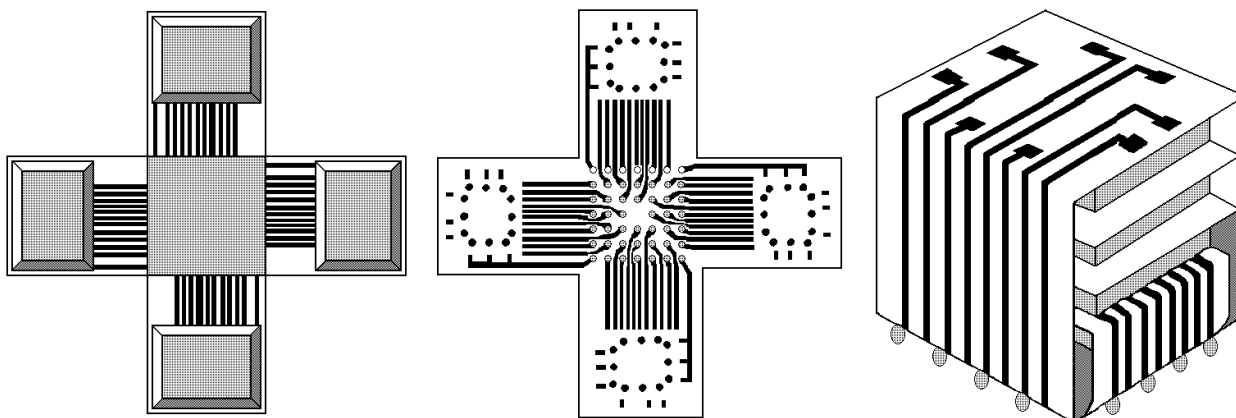


Рис. 4. 65. Свернутый в куб многокристальный модуль на полиимидной коммутационной плате

Применяют бескорпусную (временную) герметизацию, а также с использованием монокристаллических и полых оболочек (рис. 4.66).

Бескорпусная герметизация (рис. 4.66, а) заключается в обволакивании кристалла и мест соединений с ним внешних выводов (обычно в виде золотой проволоки диаметром 20...30 мкм) несколькими слоями полимерных пленок.

Бескорпусная герметизация применяется как временная защита кристаллов, предназначенных для установки в ГИС и МСБ. Кристаллы монтируют на подложки с использованием клеев (эпоксидных или кремнийорганических) и соединяют выводы с контактными площадками сваркой или пайкой.

Герметизацию в монокристаллические оболочки (полимерные корпуса) используют для ИС широкого применения, эксплуатируемых, как правило, в закрытых отапливаемых помещениях. Обычно применяют заливку в разъемные формы, хорошо поддающуюся автоматизации.

Примеры полимерных корпусов: DIP (рис. 4.66, б) с 2-сторонним расположением выводов (8...64 с шагом 1,27...2,5 мм); PLCC (рис. 4.66, в) с 4-сторонним расположением J-образных выводов (20...84 с шагом 1,27 мм); SOIC (рис. 4.66, г) с двусторонним расположением выводов (8...28 с шагом 1,27 мм); LQFP (рис. 4.66, д, е) с 4-сторонним расположением выводов (32...128 с шагом 0,4...0,8 мм); fleBGA (рис. 4.66, ж) с матричным расположением шарообразных выводов (132...280 с шагом 0,65...1,0 мм и диаметром 0,3...0,48 мм, соответственно);  $\mu$ BGA (рис. 4.66, з) с матричным расположением шарообразных выводов (208 с шагом 0,5 мм и диаметром 0,25 мм).

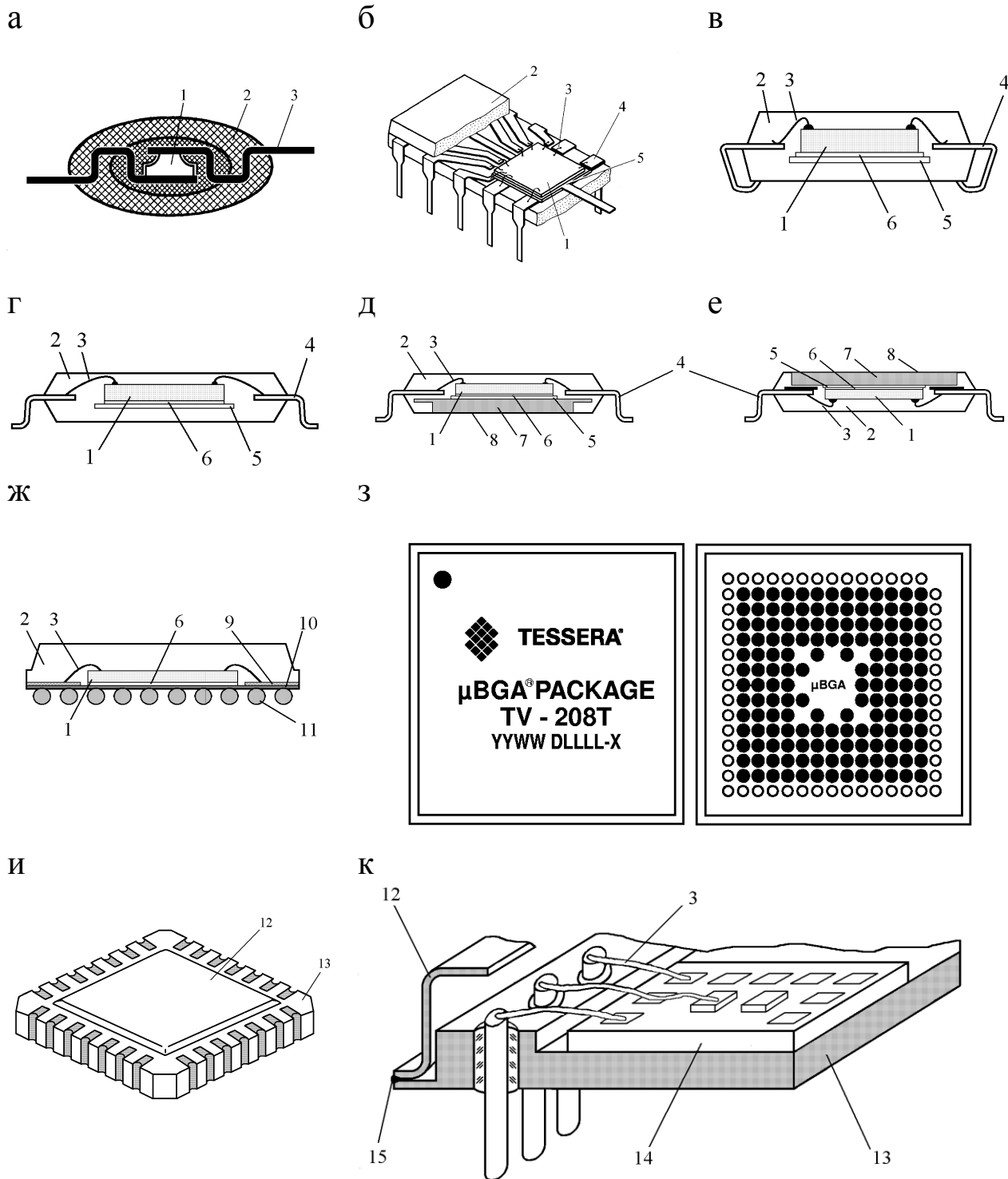


Рис.4. 66. Методы герметизации ИС: бескорпусная (а); в полимерных корпусах типа: DIP (б), PLCC (в), SOIC (г), LQFP (д, е), flexBGA (ж),  $\mu$ BGA (з); в керамическом LCCC (и) и металлическом (к) корпусах:

1 – кристалл; 2 – полимер; 3 – проволока (Au или Al); 4 – медная (с покрытием) выводная рамка; 5 – держатель кристалла; 6 – соединительный слой; 7 – медный теплоотвод; 8 – покрытие Ni; 9 – медный проводник; 10 – полиимидная плата; 11 – шарик из припоя; 12 – крышка; 13 – основание корпуса; 14 – плата с ГИС; 15 – сварной шов

Полые корпуса обеспечивают более высокое качество герметизации и позволяют эксплуатировать ИС в более широком диапазоне температур, но обходятся дороже. Герметизацию в полые корпуса иногда проводят в среде инертного газа (аргона), что создает наиболее благоприятные условия для функционирования элементов схемы. Примеры полых корпусов: LCCC (рис. 4.66, и) и металлический (металлостеклянный) корпус с изоляцией выводов стеклотаблетками (рис. 4.66, к).

Корпус LCCC состоит из керамического основания с 4-сторонним расположением выводов типа «copcave» (16...84 с шагом 1,0...1,27 мм) и крышки (из металла или керамики). Выводы обычно имеют золотое покрытие (реже Sn или Sn-Cu). Металлическую крышку соединяют с керамическим основанием пайкой (используя рамку из припоя), а керамическую – клеями или компаундами.

Основным материалом для металлостеклянных корпусов является ковар (сплав, содержащий 29%Ni + 18%Co + 53%Fe), который по ТКЛР хорошо согласуется с боросиликатным стеклом, используемым в качестве изоляторов выводов. Крышку с корпусом соединяют аргонодуговой или лазерной сваркой. Металлостеклянные корпуса мало унифицированы и обычно применяются для ГИС и МСБ специального назначения.

Герметизацию в полые корпуса проверяют на наличие больших или малых течей. Большие течи выявляют вакуумно-жидкостным или пузырьковым методом. В первом случае ИС помещают в специальную жидкость (уайт-спирит), над которой создают вакуум. Вследствие перепада давления воздух при наличии течей будет выходить из корпуса в виде пузырьков. Аналогичный результат можно получить, поместив корпус в термостойкую жидкость (этиленгликоль), нагреваемую до 120...140 °С.

Малые течи обнаруживают масс-спектрометрическим методом. Контролируемые ИС выдерживают в атмосфере He под давлением 400 кПа в течение 4...6 ч. Благодаря малому размеру молекул He обладает высокой проникающей способностью. Далее при помещении ИС в вакуумную камеру He обнаруживается течеискателем.

Одной из важных характеристик корпусов ИС является коэффициент дезинтеграции, определяемый как отношение объема корпуса к объему кристалла (одного или нескольких). Например, для ИС серии 155 (основной элементной базы ЕС ЭВМ) этот показатель равен 630. За рубежом в последние годы возникло новое направление упаковки кристаллов «chip-scale packages»(CSP), предусматривающее увеличение объема кристалла при его герметизации не более, чем на 20%. К вариантам CSP относят: 3-мерную упаковку кристаллов

(см. рис. 4.65), корпуса  $\mu$ BGA (рис. 4.66, з), монтаж кристаллов непосредственно на ПП (Direct Chip Attach) – рис. 4.67 и др.

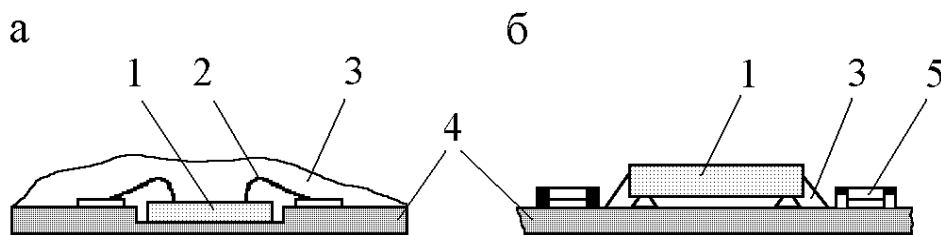


Рис. 4.67. Монтаж кристаллов на ПП:  
 а – с проволочным монтажом; б – flip-chip-методом:  
 1 – кристалл; 2 – проволока; 3 – полимер; 4 – ПП; 5 – пассивный компонент

#### 4.6. Электронные модули на печатных платах

Основные варианты конструкций электронных модулей на ПП (ЭМПП) приведены на рис. 4.68.

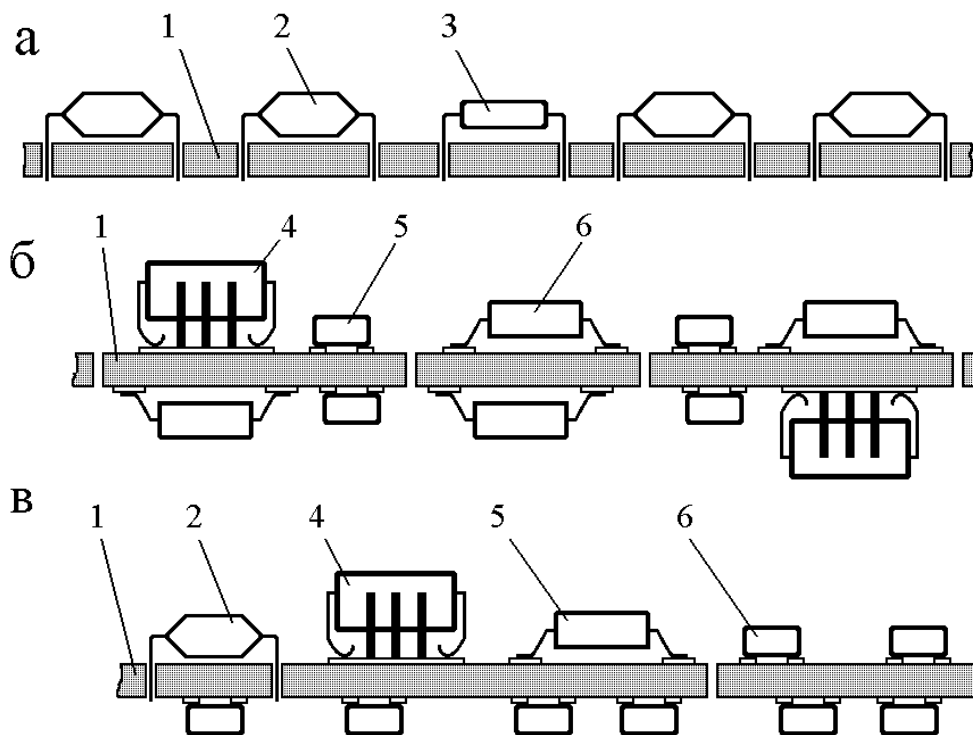


Рис. 4.68. Варианты конструкций ЭМПП:  
 а – с компонентами, монтируемыми в отверстия; б – с компонентами, монтируемыми на поверхность; в – со смешанными компонентами:  
 1 - ПП; 2 – корпус DIP; 3 – компонент с аксиальными выводами; 4 – корпус PLCC;  
 5 – корпус SOIC; 6 – пассивные компоненты для поверхностного монтажа (чип-резисторы и чип-конденсаторы)

ЭМПП являются основными сборочными единицами современных ЭС. Поэтому от их параметров в значительной степени зависят

массогабаритные, надёжные и стоимостные характеристики электронных систем. ЭМПП представляют собой совокупность компонентов (ЭРЭ и ИС), смонтированных на ПП и электрически соединённых с контактными площадками. Таким образом, ПП по отношению к компонентам выполняют одновременно функции несущей основы и коммутирующей схемы.

Многие годы большинство ЭМПП выполнялось по варианту, изображённому на рис. 4.68, а, пока в Японии изготовители электронных устройств в конце 70-х годов не начали первыми в мире монтировать пассивные чип-компоненты, ранее применявшиеся только в ГИС и МСБ (рис. 4.69, а), непосредственно на поверхность ПП. Это новое направление получило название Surface Mount Technology (SMT) – технология поверхностного монтажа. В дальнейшем были разработаны специальные корпуса поверхностно монтируемых компонентов: MELF (Metal Electrode Face Bonded), SOIC (Small Outline Integrated Circuit), PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier), LCCC (Leadless Ceramic Chip Carrier), PQFP (Plastic Quad Flatpack), BGA (Ball Grid Array) и др.

Безвыводные корпуса прямоугольной формы (рис. 4.69, а) являются наиболее распространённым типом корпусов для *R* и *C* компонентов. Они различаются стоимостью, габаритными размерами, рабочим напряжением (или рассеиваемой мощностью). Для указания геометрических размеров таких корпусов используется краткая форма обозначения, например 1206 означает, что компонент имеет длину 0,12 дюйма, а ширину 0,06 дюйма. Чип-компоненты в таких корпусах изготавливаются по тонко- или толстопленочной технологии.

Корпуса типа MELF (Metal Electrode Face Bonded) представляют собой слегка изменённый безвыводной вариант обычного резистора или конденсатора с аксиальными выводами (рис. 4.69, б). В корпусах типа MELF в основном выпускаются керамические конденсаторы и плёночные резисторы, а также кремниевые диоды, катушки индуктивности, устройства защиты.

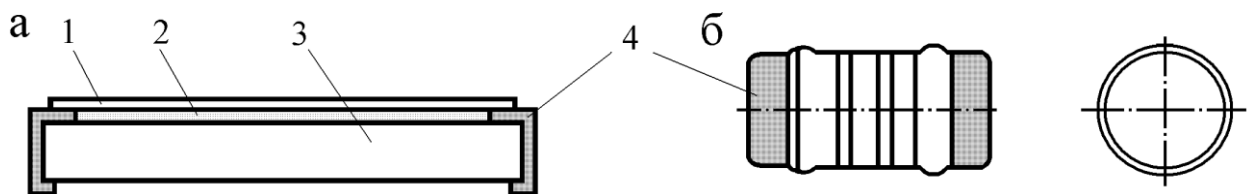


Рис. 4.69. Корпуса пассивных элементов для поверхностного монтажа:

а – прямоугольной формы; б – MELF:

1 – защитное покрытие; 2 – резистивный слой; 3 – керамическое основание;  
4 – контактные поверхности

Корпуса компонентов для поверхностного монтажа (по сравнению с традиционными компонентами) отличаются меньшей массой (что повышает устойчивость к вибрациям) и габаритами (рис. 4.70).

Малая длина выводов уменьшает паразитные связи и способствует повышению быстродействия ЭС.

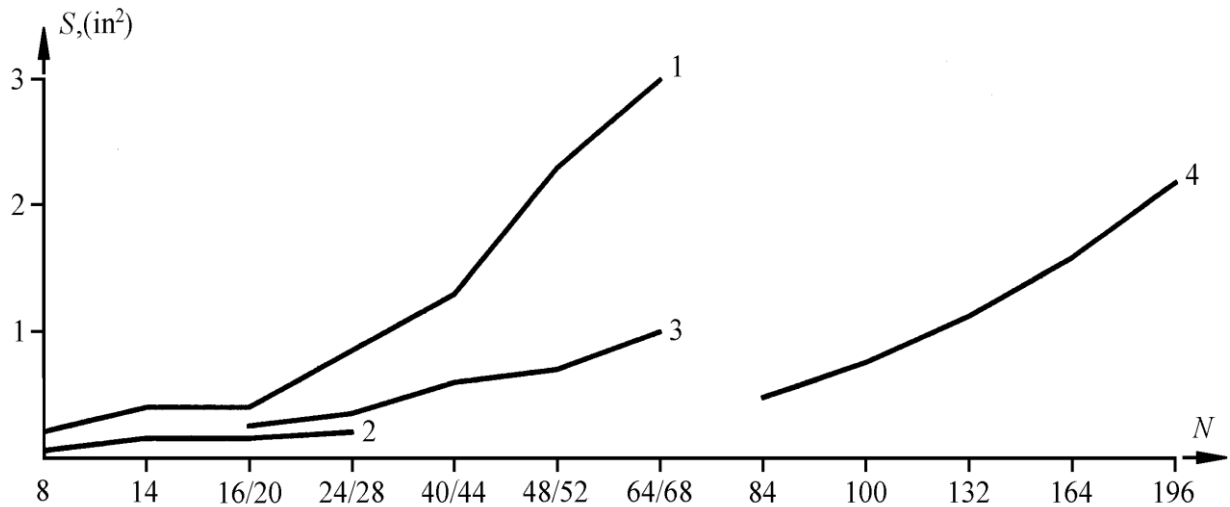


Рис. 4.70. Зависимость площади ( $S$ ), занимаемой различными корпусами на ПП, от числа выводов ( $N$ ): 1 – DIP; 2 – SOIC; 3 – PLCC/LCCC; 4 – PQFP

Производство компонентов в корпусах для поверхностного монтажа постоянно растет, но традиционные компоненты со штыревыми выводами также остаются в применении. Наиболее распространенным вариантом ЭМПП в настоящее время считается конструкция со смешанным монтажом (рис. 4.71).

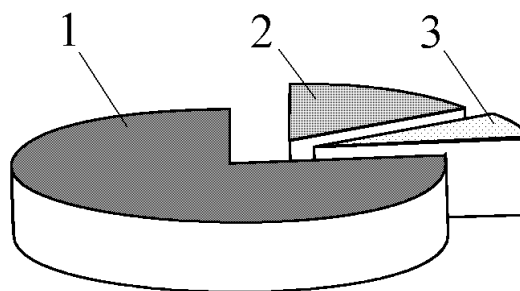


Рис. 4.71. Современное соотношение различных вариантов ЭМПП:  
1 – смешанный монтаж; 2 – поверхностный монтаж; 3 – монтаж в отверстия

Технологический процесс изготовления ЭМПП состоит из следующих основных этапов: подготовка компонентов к монтажу; установка компонентов на ПП; получение электрических соединений выводов компонентов с печатным монтажом; контроль ЭМПП.

## Подготовка компонентов к монтажу

Подготовка компонентов включает в себя: распаковку; рихтовку (исправление ошибочно погнутых выводов), формовку, обрезку и лужение выводов; размещение компонентов в технологической таре (лентах, кассетах и т.д.).

На рис. 4.72 приведены схемы технологических операций подготовки компонентов с осевыми выводами к монтажу. Компонент 1 (рис. 4.72, а) фиксируется прижимом 2 и матрицей 3. При движении пуансонов 4 происходит вначале обрезка выводов в размер  $L$ , а затем – формовка их по матрице. Зазор  $A$  равен диаметру вывода.

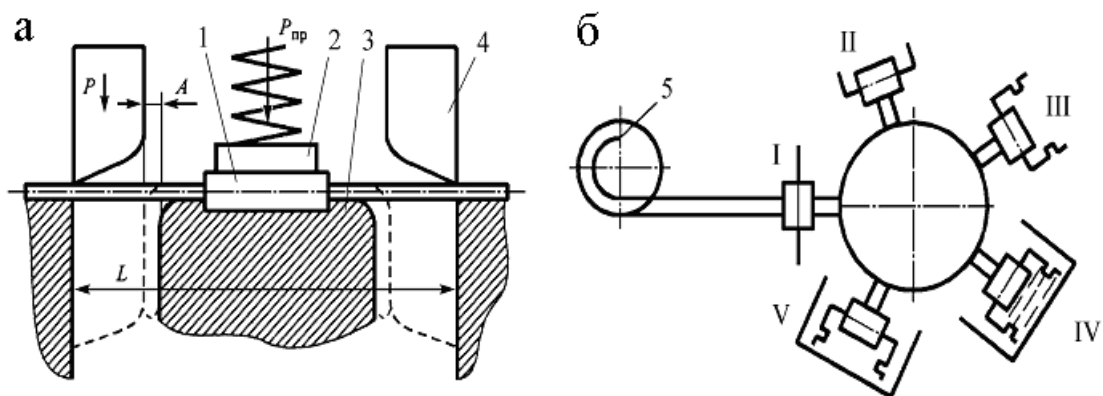


Рис. 4.72. Схемы подготовки компонентов с осевыми выводами к монтажу: а – обрезка и формовка выводов в штампе; б – автоматическая подготовка компонентов

В автоматических установках (рис. 4.72, б) компоненты загружаются в вибробункер (или кассету) 5, откуда поштучно поступают к многопозиционной установке роторного типа. В позиции I происходит загрузка компонента, далее в позиции II выводы формуются и обрезаются, на позиции III выполняется зиг-формовка, на IV – выводы облуживаются и на V – компонент поступает в тару для дальнейшего использования.

Компонентов для поверхностного монтажа поступают от изготовителя с уже оформленными выводами.

## Установка компонентов на ПП

Операция установки компонентов на ПП состоит из следующих переходов: выбор компонента; определение места его установки; перенос или подача компонента к месту установки; ориентация компонента относительно посадочного места; установка компонента. Ком-

поненты со штыревыми выводами фиксируют на ПП путем подгибки или за счет зиг-формовки (рис. 4.73).

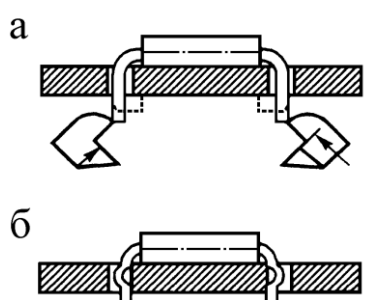


Рис. 4.73. Фиксация компонентов на ПП:  
а – подгибкой выводов;  
б – зиг-формовкой

Установка компонентов может выполняться в ручном режиме (если все переходы выполняются вручную), автоматизированно (если автоматически выполняются отдельные переходы) и автоматически. Ручную установку компонентов с осевыми выводами и их пайку, как правило, выполняют на одном рабочем месте.

Для автоматизированной установки компонентов широко применяются светомонтажные столы (рис. 4.74).

Печатная плата 1 устанавливается на монтажный стол 2, на котором размещаются подготовленные компоненты, разложенные по ячейкам тары 3. Место установки компонента на ПП обозначается лучом света 4. Курсор 5 перемещается по ПП в соответствии с программой от устройства управления 6 и, останавливаясь, указывает место установки компонента. При этом загорается лампочка подсветки ячейки, из которой следует взять и установить компонент на ПП.

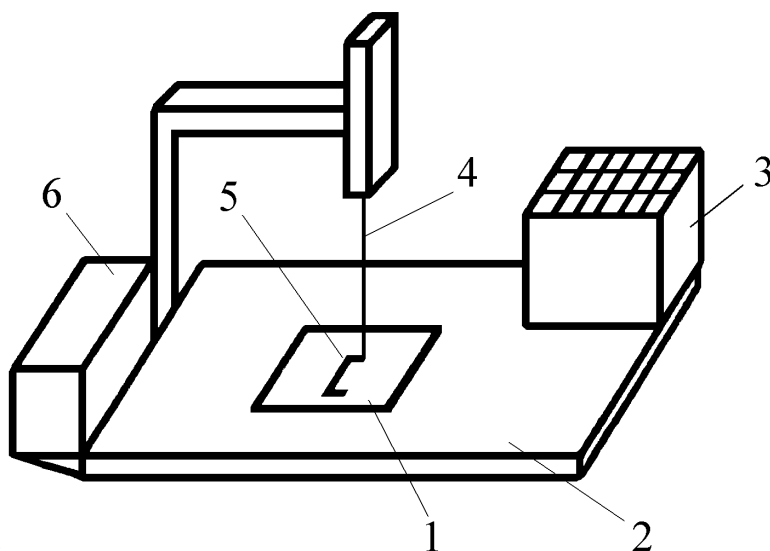


Рис. 4.74. Схема светомонтажного стола

Многообразие типоразмеров корпусов компонентов со штыревыми выводами, а также различные варианты формовки выводов ограничивают универсальность сборочных автоматов. Наиболее эффективно их применение в серийном производстве унифицированных ЭМПП.

Корпуса компонентов для поверхностного монтажа более приспособлены для автоматической установки (меньшее количество ти-



поразмеров, отсутствие вариантов формовки выводов, установка на поверхность может производиться с меньшей точностью, чем в отверстия и т.д.). Схемы автоматов для установки поверхностно-монтируемых компонентов приведены на рис. 4.75.

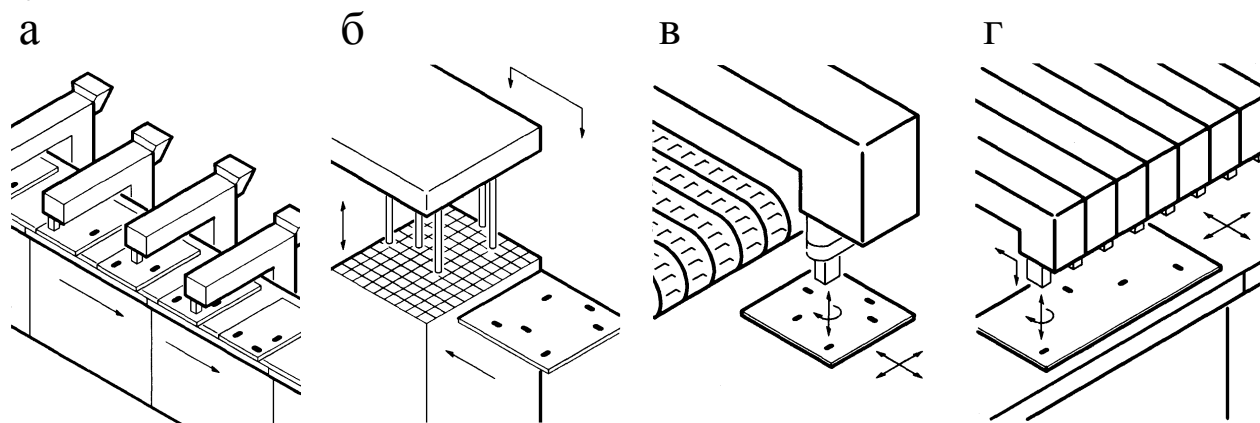


Рис. 4.75. Схемы автоматов для установки поверхностно-монтируемых компонентов:  
с линейным (а), одновременным (б), с последовательным (в) и последовательно-одновременным размещением (г)

Линейные автоматы (см. рис. 4.75, а) имеют блок фиксированных монтажных головок, устанавливающих компоненты (каждая головка устанавливает «свой» компонент) на ПП, перемещаемые двухкоординатным столом.

Автоматы параллельного типа (см. рис. 4.75, б) также имеют блок фиксированных головок, позволяющих осуществлять установку всех элементов на плату одновременно.

Автоматы последовательного действия (см. рис. 4.75, в) имеют простую подвижную монтажную головку, с помощью которой компоненты устанавливают последовательно, друг за другом. Автоматы обладают высокой универсальностью, способны монтировать все типы компонентов, но имеют низкую производительность.

Автоматы последовательно-параллельного типа (см. рис. 4.75, г) представляют собой комбинацию двух систем – параллельной и последовательной, обеспечивающую групповую установку компонентов на подвижную ПП с высокой производительностью (до 0,2 секунды на компонент).

Перед установкой поверхностно-монтируемых компонентов на контактные площадки ПП трафаретной печатью наносят паяльную пасту, представляющую собой мелкодисперсную смесь порошка припоя и связки, состоящей из флюса, растворителей и прочих ингредиентов. Так как паяльная паста сравнительно вязкая и отдельные частицы припоя могут иметь значительные размеры (порядка 150 мкм), то

вместо сетчатых применяют трафареты в виде металлических листов, отверстия в которых получают лазером или фотолитографией. Компоненты устанавливают выводами на пасту, сушка которой обеспечивает их фиксацию. Иногда установку некоторых компонентов (обычно пассивных) производят на клей (например, на эпоксидной основе), наносимый под основание корпуса. В некоторых случаях установку на клей применяют как дополнение к фиксации на паяльной пасте (для улучшения крепления).

### Получение электрических соединений

Для получения электрических соединений выводов компонентов с печатным монтажом чаще всего применяют пайку. Так как потолок термической стойкости большинства компонентов и ПП не превышает 300...350 °С, то используют мягкие припои с  $t_{пл} \leq 200...250$  °С.

Для получения надежного паяного соединения необходимо обеспечить между припоем и соединяемыми металлами образование металлической связи, признаком которой является наличие диффузионной зоны (границы) толщиной 0,1...1 мкм (рис. 4.76). Отсутствие диффузионной зоны указывает на недостаточную связь, в лучшем случае адгезионную.

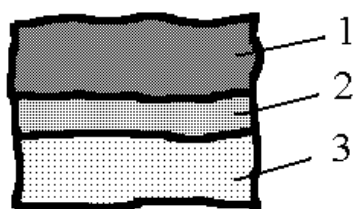


Рис. 4.76. Разрез паяного соединения:

1 – припой; 2 – диффузионная зона; 3 – металл

Схема образования диффузионной зоны приведена на рис. 4.77. Поверхность металла, полученного в вакууме (рис. 4.77, а), характеризуется наличием связей у атомов, лежащих на поверхности, т.е. свободная поверхность всегда обладает избытком энергии (который на рисунке показан в виде стрелок). С термодинамической точки зрения, любая система стремится перейти в состояние с наименьшей свободной энергией. Поэтому в обычных условиях (на воздухе) на чистую поверхность оседают газы (кислород быстро окисляет поверхность), различные загрязнения, снижающие поверхностную энергию (см. рис. 4.77, б). Образовавшиеся пленки обычно химически устойчивы и представляют барьер для всякого процесса соединения. Удаление этих поверхностных пленок и предупреждение их повторного образования – неперемное условие любого процесса пайки.

Для борьбы с окислением, а также для обеспечения смачивания поверхностей и растекания расплавленного припоя в процессе спайки, используют флюсы. Они взаимодействуют с поверхностными пленками загрязнений (рис. 4.77, в), растворяют и восстанавливают окислы, освобождая поверхность металла для смачивания припоем

(рис. 4.77, г). Следующий этап – смачивание поверхности металла жидким припоем и его растекание по поверхности (рис. 4.77, д). При этом происходит взаимодействие жидкой фазы припоя с покрываемым металлом, проявляющееся во взаимном растворении и диффузии (рис. 4.77, е). Скорость этих процессов зависит от природы взаимодействующих металлов, температуры, скорости и времени нагрева. После удаления источника тепловой энергии начинается стадия кристаллизации припоя. Рост кристаллов начинается на покрываемом металле, который оказывает сильное ориентирующее воздействие на припой.

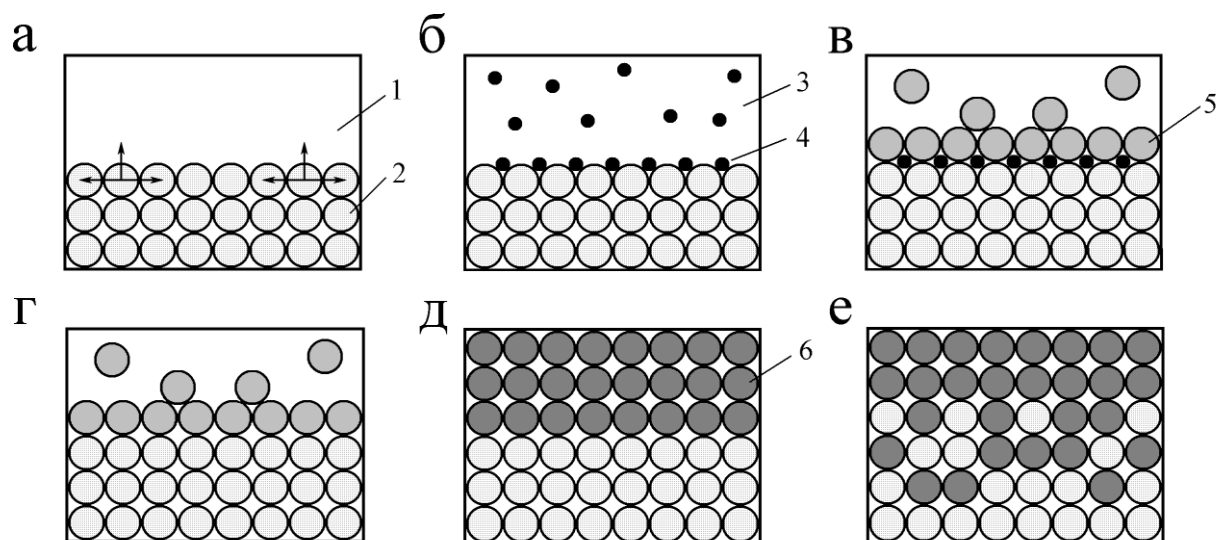


Рис. 4.77. Схема пайки с флюсом:

а – металл в вакууме; б – окисление металла воздухом; в – смачивание окисленной поверхности флюсом; г – восстановление и очистка поверхности металла; д – смачивание поверхности металла припоем; е – возникновение зоны сплава за счет диффузии; 1 – вакуум; 2 – металл; 3 – воздух; 4 – оксидный слой; 5 – флюс; 6 – жидкий припой

При пайке ЭМП используют главным образом органические флюсы: смолосодержащие (на основе канифоли или полиэфирных смол) и смолонесодержащие (водорастворимые). Смолосодержащие флюсы могут быть нейтральными (например, канифоль + этиловый спирт или полиэфирная смола + этилацетат) или активированными (с добавками салициловой кислоты, триэтаноламина и т.д.). Остатки флюса на местах паяк в большинстве случаев являются причиной ухудшения изоляции и коррозионных процессов. Остатки водорастворимых флюсов удаляют струйной промывкой в горячей (а затем холодной) проточной воде с протиркой щетками. Остатки смолосодержащих флюсов удаляются в спиртобензиновой смеси, растворителях типа «Прозон» и др. Разрабатываются безотмывные флюсы (типа

«No-Clean»), активные компоненты которых в процессе пайки взаимно нейтрализуются или разлагаются.

В качестве припоев в технологии ЭС наибольшее распространение получили сплавы Sn и Pb, температура плавления которых определяется процентным содержанием этих компонентов (рис. 4.78). Сплав состава 61,9 % Sn + 38,1% Pb называется эвтектическим (т.е. имеющим наименьшую для данной системы  $t_{пл} = 183 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Близкий по составу сплав  $61 \pm 1\% \text{ Sn} + 39 \pm 1\% \text{ Pb}$  выпускается под маркой ПОС61.

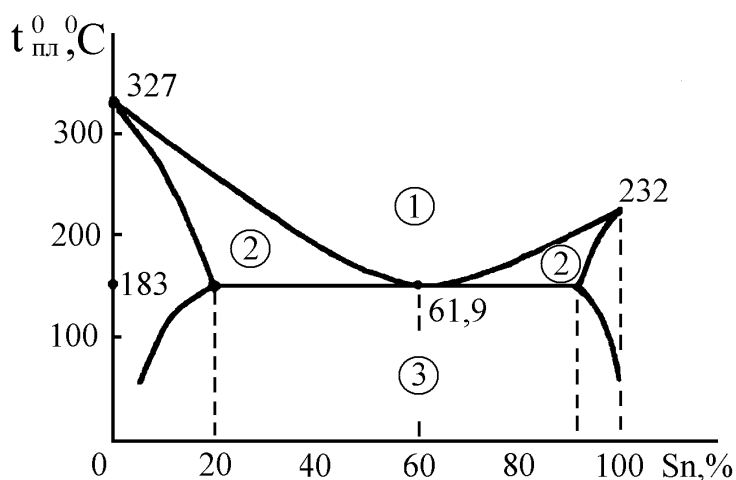


Рис. 4.78. Диаграмма состояния системы Sn – Pb:  
1 – жидкая фаза; 2 – пастообразное состояние; 3 – твердая фаза

Применяются также околоэвтектические припои: 63% Sn+ 37% Pb, 60% Sn+ 40% Pb, легированные припои: 62% Sn+ 36% Pb+2%Ag (добавка Ag до 2% снижает растворимость серебряных покрытий в Sn-Pb припоях), 33% Sn+ 34% Pb+33%Bi (Bi понижает температуру плавления) и др. Припои выпускаются в виде проволоки или заполненной флюсом одно- или пятиканальной трубки. В прессованной проволоке каждое зерно припоя окружено канифолью. Содержание канифоли в целом не превышает 0,8...1,2% от общей массы припоя. Разработан также композитный самофлюсующий припой ПОС61 КП. Его расход на формирование соединений на 10...30% ниже по сравнению с обычным проволочным припоем.

В технологии поверхностного монтажа припой применяется в виде паст. Основным компонентом припойной (паяльной) пасты является порошок припоя (75...95 % по массе) в виде гранул не чисто сферической формы размером 10...150 мкм, получаемых УЗ-распылением жидкого припоя. В качестве связующих веществ используют органические смолы или их смеси. Кроме них в пасту вводят разбавители, пластификаторы, тиксотропные вещества. Последние препятствуют оседанию частиц припоя при хранении, повышают разрешающую

способность пасты, обеспечивают заданный диапазон вязкости. Припой и флюсы, входящие в состав пасты, обычно те же, что используются при обычной пайке.

Одним из основных условий пайки является подвод к соединяемым поверхностям некоторого количества тепла, достаточного для плавления и растекания припоя, а также образования диффузионных зон. Тепло для пайки может переноситься теплопроводностью, конвекцией и излучением. На теплопроводности основано действие паяльников, применяемых в мелкосерийном производстве, а также при ремонтных работах. При ручной пайке должны обеспечиваться следующие условия: терморегулирование, дозированная подача припоя в зону пайки нажатием кнопки (рычага), отсос газов из зоны пайки.

В серийном и массовом производстве применяют групповые методы пайки: волной припоя, в парогазовой фазе (ПГФ), в ИК-лучах.

Пайка волной припоя широко применяется в серийном и массовом производстве ЭМП с компонентами, выводы которых установлены в монтажные (лучше металлизированные) отверстия ПП (см. рис. 4.68, а). Сущность способа заключается в пропускании ЭМП через гребень свободно изливающегося из щелевого сопла расплавленного припоя (рис. 4.79).

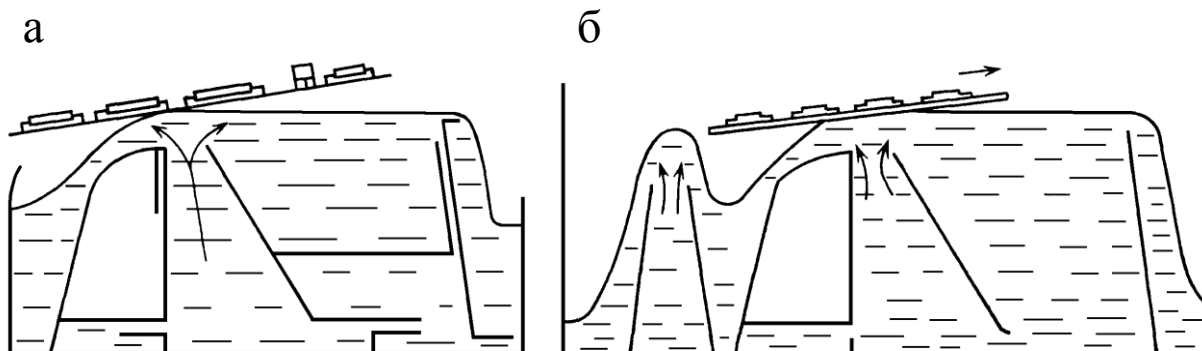


Рис. 4.79. Схемы пайки волной припоя:  
а – одиночной  $\lambda$  – волной; б – двойной волной

Схема классической установка пайки волной припоя приведена на рис. 4.80.

Подача флюса на первой позиции может осуществляться тремя способами: пенным (пропусканием через жидкий флюс сжатого воздуха), волновым (вращающимся распылителем в виде сетчатого барабана с ячеистой поверхностью, полупогруженного во флюс) и струйным.

Предварительный нагрев ( $t = 80 \dots 120$  °С) вводится для испарения избытка растворителя из флюса, повышения его активных свойств, уменьшает термоудар ПП и повышает скорость пайки.

Доказано, что наилучшие результаты при пайке волной припоя наблюдаются с широкой волной припоя и наклонным конвейером. Для широко используемой  $\lambda$  - волны припоя на переднем ее скате перемещается навстречу ПП (обеспечивая хорошее смачивание), а в точке выхода скорости движения ПП и припоя близки как по величине, так и по направлению. В этой точке образуется галтель, стягивающая благодаря наклону излишки припоя с ПП. Зона контакта ПП с волной составляет 2...8 мм, продолжительность 0,7...2 с.

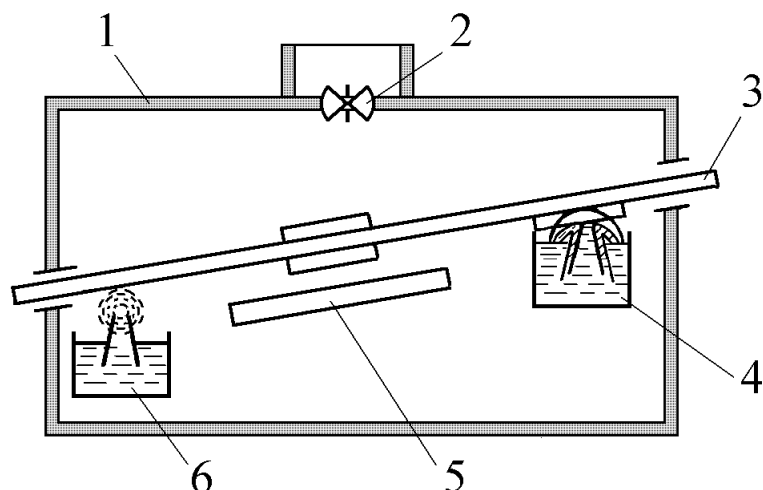


Рис. 4.80. Схема установки пайки волной припоя:

1 – корпус; 2 – вентилятор; 3 – конвейер; 4 – узел пайки; 5 – предварительный нагрев; 6 – узел флюсования

При пайке ЭМПП со смешанным монтажом (см. рис. 4.68, в) возникает «теневая зона», куда припой не попадает и не образует паяных соединений (рис. 4.81).

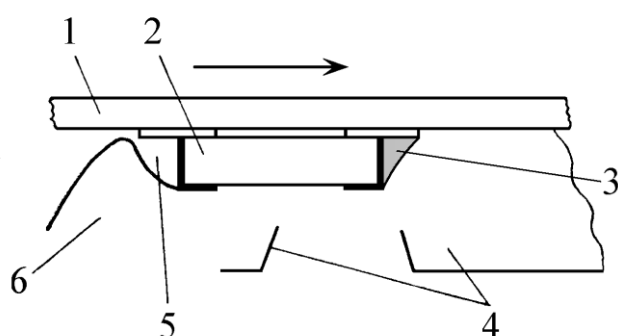


Рис. 4.81. «Теневой эффект» при пайке чип-компонентов волной припоя:

1 – ПП; 2 – чип-компонент; 3 – галтель; 4 – сопло; 5 – «теневая зона»; 6 – волна припоя

В этом случае применяют процесс пайки двойной волной припоя (см. рис. 4.79, б). Первая волна делается турбулентной и узкой. Она исходит из сопла под большим давлением. Турбулентность и высокое

давление потока припоя исключает формирование полостей с газообразными продуктами разложения флюса. Однако турбулентная волна все же образует перемычки припоя, которые разрушаются второй, более пологой ламинарной волной с малой скоростью истечения. Вторая волна обладает очищающей способностью и устраняет перемычки припоя, а также завершает формирование галтелей. Для обеспечения эффективности пайки все параметры каждой волны должны быть регулируемы. Поэтому установки для пайки двойной волной имеют отдельные насосы, сопла и блоки управления для каждой волны.

Некоторые установки пайки волной припоя (как одиночной, так и двойной) оборудуются дешунтирующим воздушным «ножом» (рис. 4.82), который обеспечивает уменьшение количества перемычек припоя. «Нож» располагается сразу же за участком прохождения волны припоя и включается в работу, когда припой находится еще в расплавленном состоянии на ПП. Узкий поток нагретого воздуха ( $t = 375...390\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), движущийся с высокой скоростью, уносит с собой излишки припоя, тем самым разрушая перемычки и способствуя удалению остатков припоя.

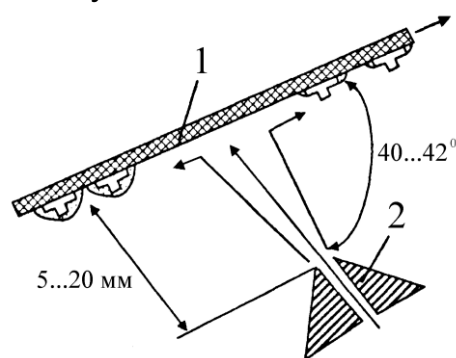


Рис. 4.82. Схема «воздушного ножа»:  
1 – ПП; 2 – сопло

При пайке волной припоя с  $t = 240...260\text{ }^{\circ}\text{C}$  (например, ПОС61) нагрев компонентов, установленных на верхнюю сторону ПП, составляет около  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Пайку ЭМПП, содержащих только поверхностно-монтируемые компоненты (установленные на припойную пасту), осуществляют в установках оплавления: в ПГФ, ИК-лучах или лазером.

Метод пайки в ПГФ (рис. 4.83) основан на использовании для нагрева паяемых изделий скрытой теплоты инертной термостойкой жидкости. Для ПГФ-пайки созданы специальные жидкости (инертные фторуглероды) с температурой кипения выше температуры плавления припоев, практически не разлагающихся и не изменяющих свой состав при испарении. ПП с установленными компонентами перемещаются по конвейеру последовательно по зонам I, II и III. После предварительного нагрева (зона I), способствующего уменьшению термических напряжений в компонентах и местах их контактов с ПП, модуль попадает в зону II, в которой пары фторуглерода (с  $t = 215...220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) конденсируются на всех внешних поверхностях изделия и за 5...30 с нагревают его до температуры пара. При этом припойная паста расплавляется и образует галтель между выводом компонента и контакт-

ной площадкой ПП. Процесс конденсации прекращается, когда температура компонентов и ПП достигнет температуры паров.

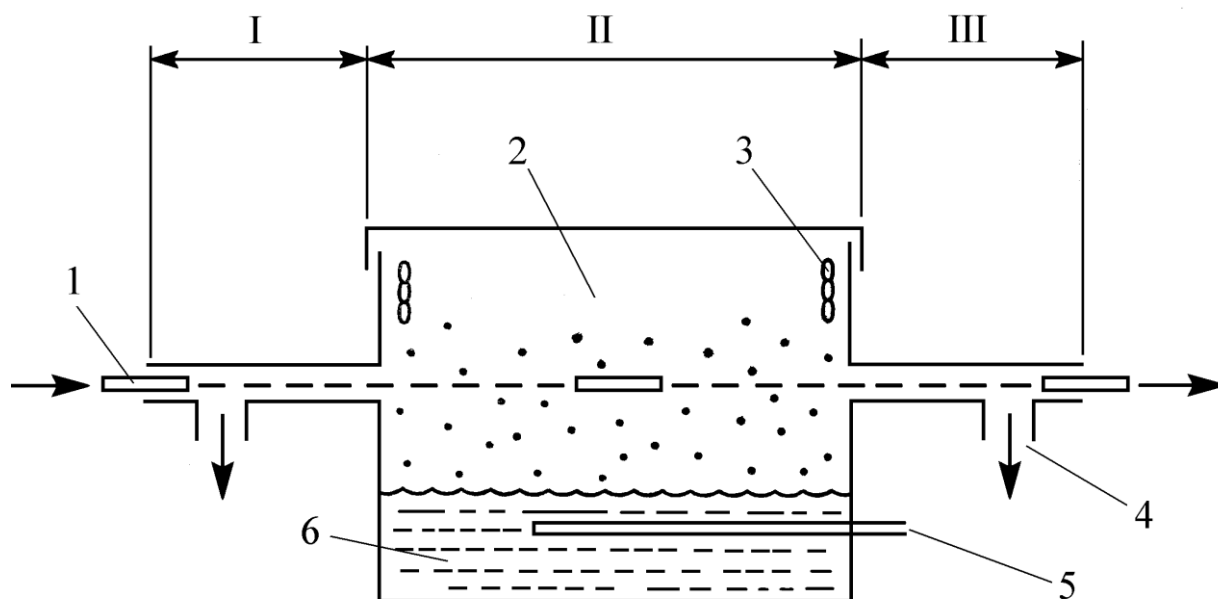


Рис. 4.83. Схема установки пайки в ПГФ:

I – зона подачи изделия и предварительный нагрев; II – зона пайки расплавлением дозированного припоя; III – зона выхода готового изделия и его охлаждение:  
 1 – ПП с установленными компонентами; 2 – пары фторуглерода; 3 – охладитель;  
 4 – вентиляционное отверстие; 5 – нагреватель; 6 – кипящий фторуглерод

В некоторых установках вместо жидкого теплоносителя применяют сухой воздух или азот.

Основным механизмом передачи тепла, используемым в установках пайки с ИК-нагревом, является излучение. Передача тепла излучением имеет большое преимущество перед теплопередачей за счет теплопроводности и конвекции, так как в этом случае тепловая энергия передается по всему объему монтируемого устройства.

Типичная установка ИК-оплавления приведена на рис 4.84. Установка состоит из корпуса 1, внутри которого расположено несколько зон нагрева, в каждой из которых поддерживается заданный тепловой режим. В первой и второй зонах производят постепенный предварительный нагрев изделия 2 с помощью плоских нагревателей 3. Пайку производят в третьей зоне быстрым нагревом объекта выше температуры плавления припоя с помощью кварцевых ИК-ламп 4, затем объект охлаждают с помощью устройства 5. Печатные платы транспортируются через установку на ленточном (обычно сетка из нержавеющей стали) конвейере 6. Режимы работы нагревателей и скорость движения конвейера регулируются с помощью микропроцессорной системы 7, температурный профиль вдоль установки отображается в графической и цифровой форме на экране дисплея 8. Характеристики температурного профиля, т. е. значения температур в каждой



зоне, можно изменять в широких пределах, также возможно иметь библиотеку типовых режимов оплавления.

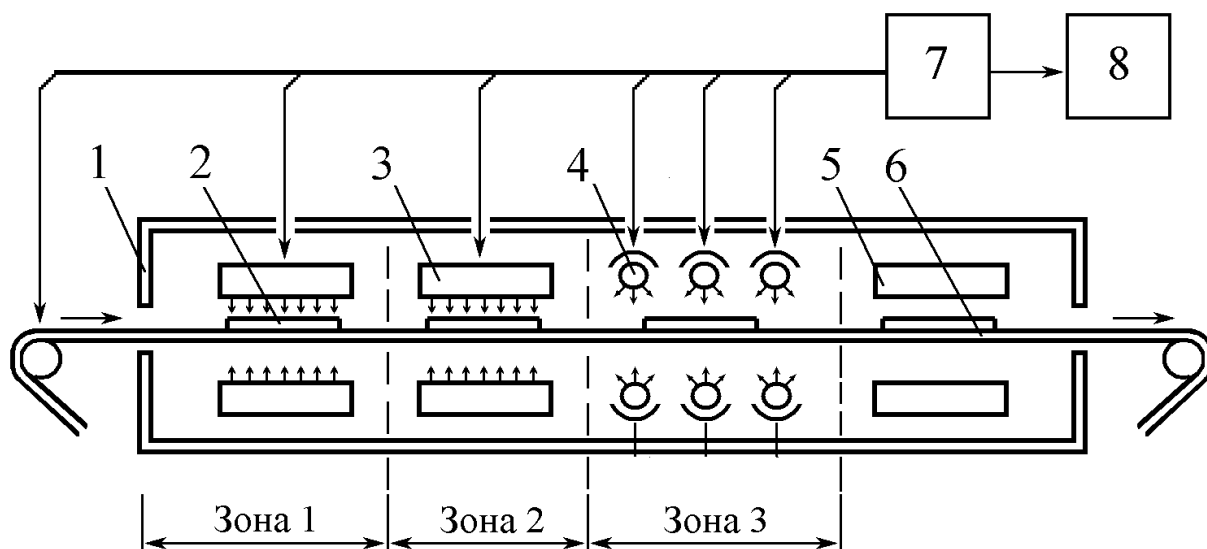


Рис. 4.84. Схема установки ИК-пайки

Примерная диаграмма работы ИК-печи приведена на рис. 4.85.

В первой зоне происходит быстрый главным образом радиационный подогрев с длиной волны, проникающей в материал, что позволяет провести безопасное и эффективное удаление летучих веществ. Обычно скорость нагрева в этой зоне составляет  $0,5...4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ .

Во второй зоне происходит выравнивание температуры сборки, что предупреждает повреждение термочувствительных элементов при оплавлении. В этой области идет снижение температурных градиентов, возникших на первом этапе нагрева. Скорость нагрева в этой зоне весьма низка и для малых элементов может даже иметь отрицательный знак. Температура стабилизируется на уровне  $140...175\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этот этап является одним из наиболее важных для получения качественных паяных соединений.

В третьей зоне происходит непосредственное оплавление пасты

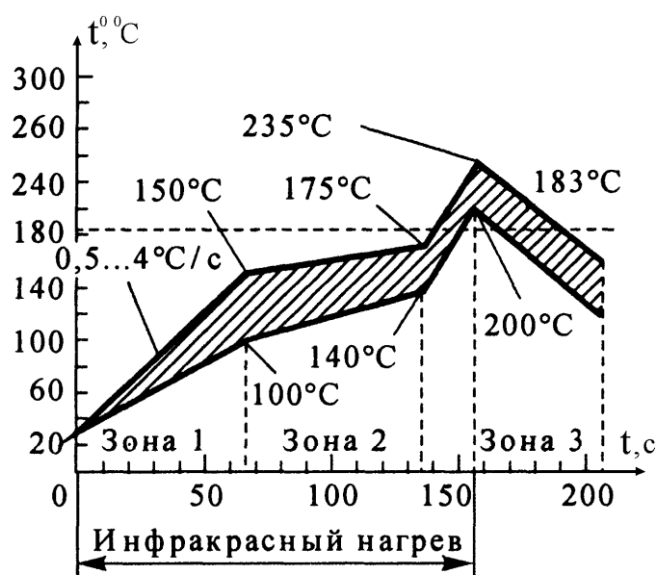


Рис. 4.85. Диаграмма работы ИК-печи при оплавлении

и создание паяного соединения. Для этой зоны характерна высокая скорость нагрева коротковолновым ИК-излучением, что позволяет минимизировать время оплавления, чтобы снизить до минимума пребывание элементов при высокой температуре.

При плотном расположении компонентов более высокие из них могут закрывать более низкие, создавая так называемую «тень», то есть зону, где высока вероятность непропая. Некоторые компоненты (например, PLCC) могут экранировать свои собственные выводы. Существенное влияние на процесс пайки оказывает также отражающая способность корпусов компонентов.

Лазерная пайка (пайка лучом лазера) не относится к групповым методам пайки, поскольку монтаж ведется по каждому отдельному выводу, либо по рядам выводов. Однако бесконтактное приложение тепловой энергии позволяет повысить скорость монтажа до 10 соединений в секунду и приблизиться по производительности к пайке в ПГФ и ИК-излучением.

По сравнению с другими методами, лазерная пайка обладает рядом существенных преимуществ. Во время пайки ПП и корпуса компонентов практически не нагреваются, что позволяет монтировать компоненты, чувствительные к тепловым воздействиям. В связи с ограниченной областью приложения тепла резко снижаются температурные механические напряжения между выводом и корпусом. Кратковременные действия тепла (20...30 мс) положительно сказывается на надежности паяных соединений. Установки лазерной пайки могут быть полностью автоматизированы. В этом случае для составления программы пайки можно использовать данные САПР для ПП. Возможна пайка плат с высокой плотностью компоновки компонентов, с размерами контактных площадок до 25 мкм, без образования перемычек на соседних соединениях или их повреждения.

При использовании лазерной пайки нет необходимости в предварительном подогреве МПП (что обычно следует делать при пайке в ПГФ для предотвращения расслоения платы). Процесс пайки ведется в нормальной атмосфере без применения инертных газов или каких-либо других химических реагентов.

При пайке лазером минимизировано выделение вредных химических элементов и соединений.

Для приклеивания компонентов вместо специальных высокотемпературных клеящих композиций можно применять обычные клеи. Возможна частичная сборка, при которой отдельные компоненты могут устанавливаться позднее.

Лазерная пайка не является альтернативным методом по отношению к групповым методам пайки. Ее преимущества проявляются

при создании особо надежных паяных соединений в ответственных ЭС с повышенной плотностью компоновки.

Примерная схема установки лазерной пайки приведена на рис. 4.86.

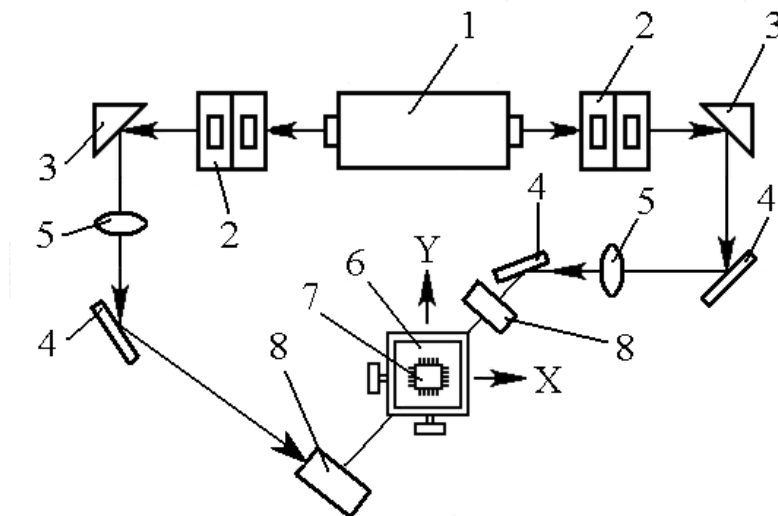


Рис. 4.86. Схема установки лазерной пайки:  
1 – лазер; 2 – затвор; 3 – призма; 4 – зеркало; 5 – объектив;  
6 – двухкоординатный стол; 7 – ПП с компонентами; 8 – дефлектор

В установке использован твердотельный АИГ-лазер (на алюмоиттриевом гранате) с двумя лучами, выходящими с двух противоположных сторон корпуса. Каждый луч (независимо от другого) может отклоняться в двух направлениях с помощью отдельного, независимого сканирующего устройства и оптической системы. Работу установки контролирует ЭВМ. Блок сканирования расположен по диагонали и направлен к центру компонента. При таком расположении луч может осуществлять пайку выводов с двух сторон корпуса. Кроме того, оба сканирующих устройства установлены под углом к поверхности печатной платы, что позволяет производить пайку корпусов с выводами J-типа, а также безвыводных (типа LCCC).

После пайки на поверхности ЭМПП в многочисленных полостях (под компонентами, в зазорах между ними, между выводами и т.д.) могут оставаться продукты разложения флюса и другие загрязнения, которые в дальнейшем могут стать причиной коррозии, токов утечки и других дефектов, приводящих к отказу. Для очистки и промывки ЭМПП применяют различные растворители и составы, включая воду. При выборе очистной жидкости учитывают состав загрязнений, растворяющую способность, рабочую температуру, продолжительность и условия отмытки, влияние на элементы конструкции, токсичность и пожароопасность.

Удаление остатков канифольных флюсов осуществляют спир-

том, спиртобензиновой смесью, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом. Однако эти жидкости пожароопасны и токсичны.

Хорошие результаты получают при использовании фреона или его смесей (хладон 113, фреон 114В). Фреон характеризуется низким поверхностным натяжением, в результате чего он проникает в мельчайшие капилляры.

Для интенсификации процесса применяют ручную или механизированную очистку щетками, наложение ультразвуковых или низкочастотных (25...50 Гц) колебаний, струйную подачу очистных жидкостей (рис. 4.87).

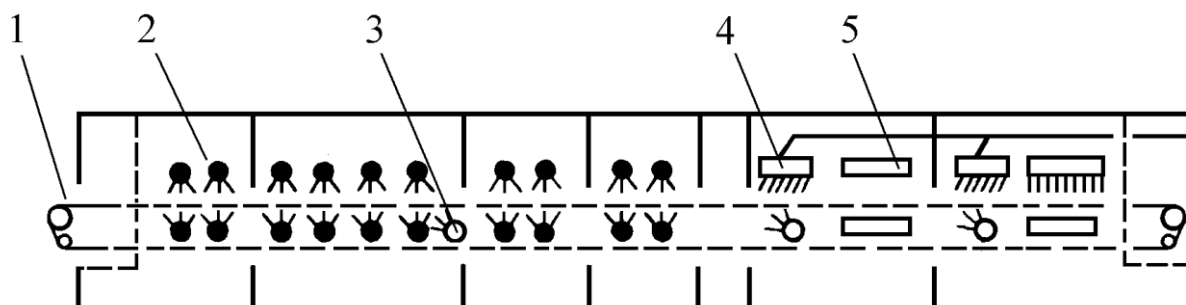


Рис. 4.87. Схема установки водной отмывки и сушки:

1 – сетчатый конвейер; 2 – форсунки; 3 – воздушные ножи; 4 – подача воздуха; 5 – кварцевые лампы

Качество очистки проверяют визуальным осмотром, люминесцентным методом (основан на явлении флуоресцентного свечения веществ, таких как канифоль, салициловая кислота), качественной реакцией (остатки флюсов имеют кислую реакцию), кондуктометрическим (измеряя сопротивление дистиллированной воды до и после контрольной отмывки) и другими методами.

При повышенных требованиях к влагозащите ЭМПП покрывают специальными лаками (например, УР-231). Основные способы нанесения влагозащитных лаков – окунание, пневматическое распыление, полив, окунание с последующим центрифугированием.

## Контроль ЭМПП

Контроль ЭМПП относится к сложным и трудоемким (до 15...20% общей трудоемкости изготовления ЭМПП) процессам. Поэтому здесь широко используется автоматическое оборудование. К основным видам контроля ЭМПП относят: автоматический оптический контроль (системы технического зрения), контроль качества паяных соединений (тепловой, рентгеновский и др.), контроль функционирования (с подачей цифровых или аналоговых сигналов). Иногда в состав ЭМПП (при проектировании) вводят испытательные

схемы. При контроле (подаче питания) встроенная испытательная схема, работая по соответствующей программе, проверяет функциональные параметры ЭМПП. Как правило, контроль функционирования проводится как до нанесения защитного лакового покрытия, так после него перед сдачей в ОТК.

Незначительные дефекты ЭМПП устраняются ремонтом.

#### 4.7. Блоки и стойки

Далее ЭМПП объединяют в более высокие иерархические структуры (блоки, стойки), используя разъемные и неразъемные соединения. Иногда ЭМПП предварительно монтируют в пластмассовые или металлические каркасы. Такие унифицированные конструкции обычно называют ячейками (рис. 4. 88).

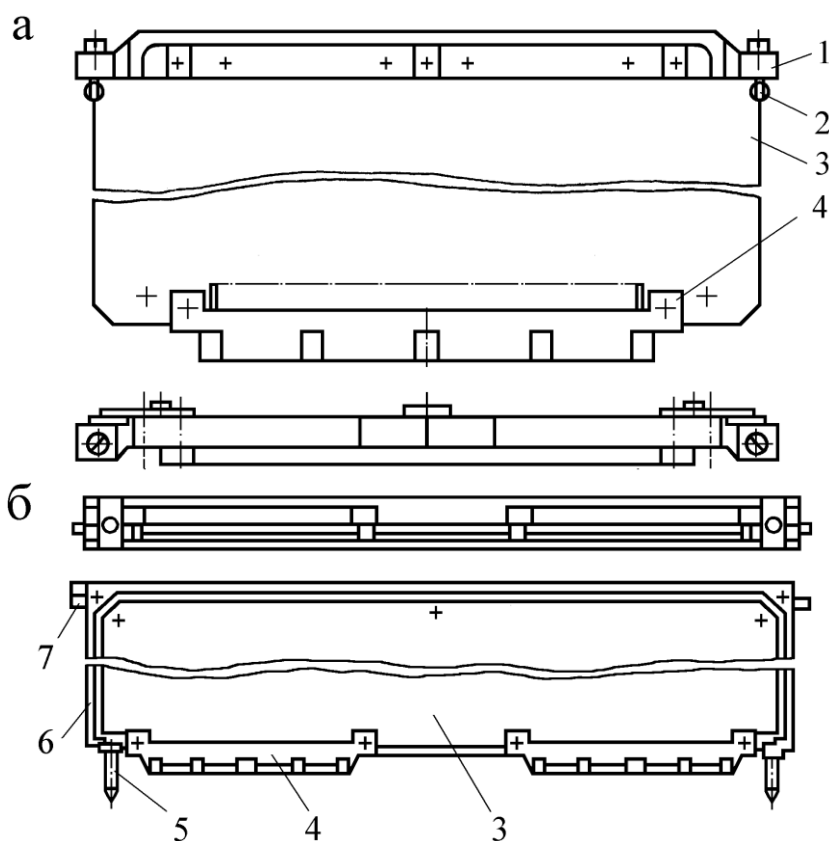


Рис. 4.88. Примеры унифицированных ячеек:  
 а – бескаркасной конструкции (одноплатные); б – с литым каркасом (двухплатные): 1 – панель; 2 – винт невыпадающий; 3 – ПП; 4 – соединитель; 5 – штырь-ловитель; 6 – каркас; 7 – рычаг

При выборе типа ячейки (каркасная или бескаркасная) и способа крепления ЭМПП производят расчет её резонансной частоты. ЭМПП и ячейки (одно- или многоплатные) также иногда называют субблоками.

Субблоки объединяют в блоки – функционально и конструктивно законченные сборочные единицы (рис. 4.89).

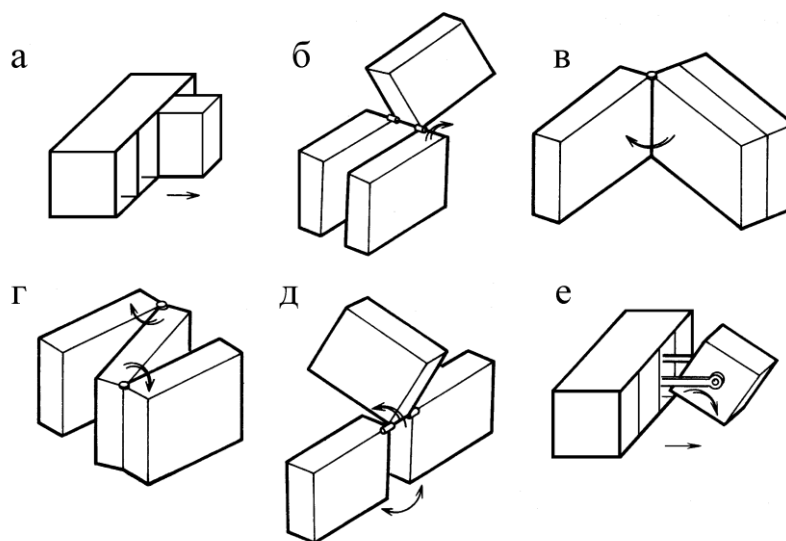


Рис. 4.89. Основные компоновочные схемы блоков:  
а – разъемная; б – откидная; в и г – книжная; д и е – комбинированная

Блоки, как правило, не имеют самостоятельного эксплуатационного назначения и являются составной частью электронной системы. Конструктивным признаком блока обычно является наличие лицевой панели.

В блоках разъемной конструкции субблоки устанавливают в ответные части электрических соединителей, расположенные на монтажной панели блока (рис. 4.90).

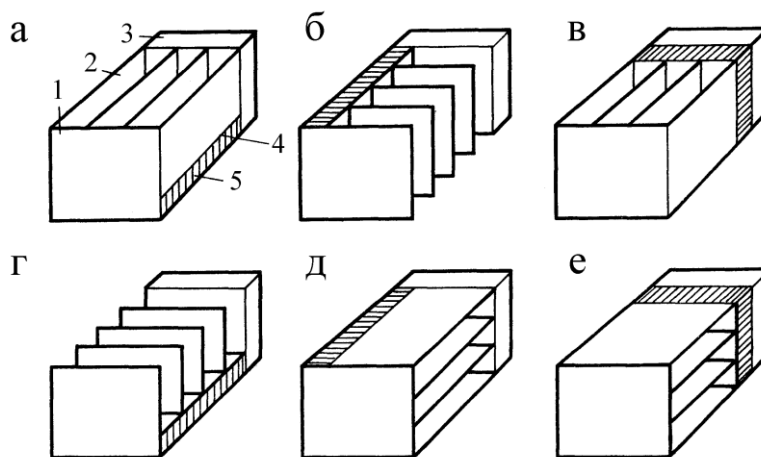


Рис. 4.90. Пространственная ориентация субблоков и монтажной панели в блоках разъемной конструкции:  
1 – панель передняя; 2 – субблок; 3 – зона межблочной коммутации; 4 – монтажная панель; 5 – зона внутриблочной коммутации

В блоках разъемной конструкции с естественным охлаждением

основную роль играет отвод тепла за счет конвекции, поэтому здесь целесообразно вертикальное расположение плат (см. рис. 4.90 а...г). Заднее расположение монтажной панели (см. рис. 4.90, в) позволяет совмещать зоны внутри- и межблочной коммутации. При малых мощностях или принудительном охлаждении применяют горизонтальное расположение субблоков (см. рис. 4.90, д,е), что дает возможность строить блоки с небольшим шагом по высоте. Построение блоков (см. рис. 4.90, б и 4.91) удобно для ЭС, устанавливаемых на подвижных объектах с ограниченными размерами аппаратных отсеков.

Обычно используется установка в пластмассовые или металлические направляющие, обеспечивающая быстрое сочленение соединителей. Фиксация винтами, расположенными на лицевой панели, повышает устойчивость к динамическим нагрузкам.

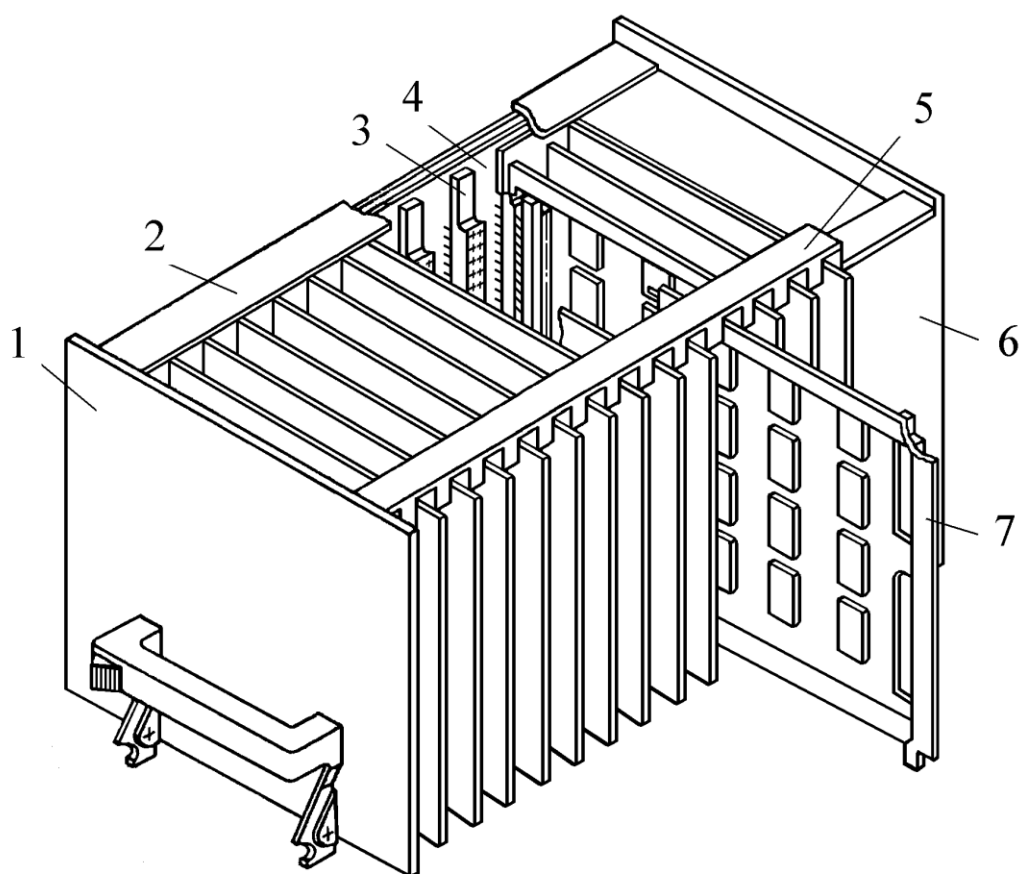


Рис. 4. 91. Блок разъемной конструкции:  
 1 – передняя панель; 2 – угольник; 3 – разъем; 4 – объединительная ПП;  
 5 – направляющая; 6 – задняя панель; 7 – субблок

В блоках книжной конструкции (рис. 4.92 и 4.93) субблоки между собой соединяют шарнирно, а электрические соединения выполняют гибким печатным кабелем, что обеспечивает доступ к элементам при включенном питании.

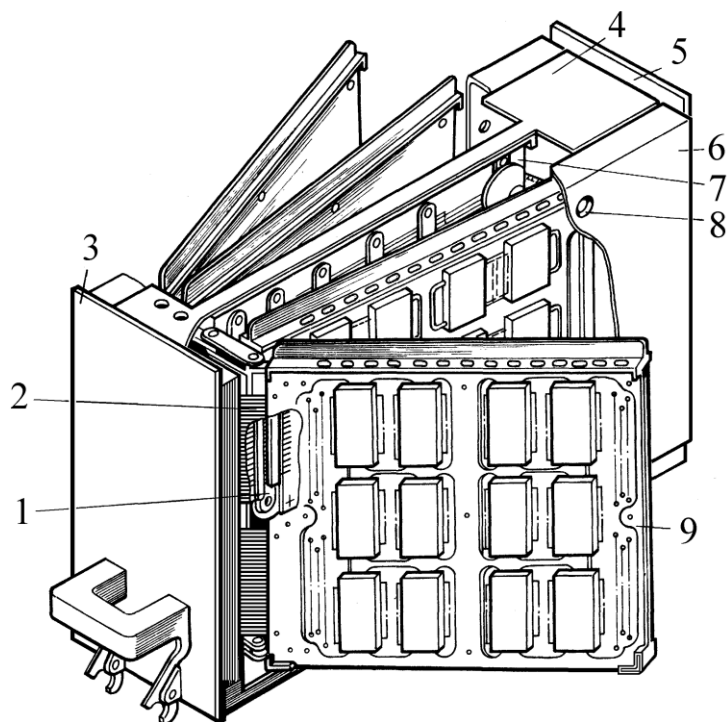


Рис. 4.92. Блок книжной конструкции:  
 1 – соединительная колодка; 2 – гибкий печатный кабель; 3 – передняя панель;  
 4 – рама; 5 – задняя панель; 6 – боковая стенка; 7 – соединительная ПП;  
 8 – стяжной винт; 9 – субблок

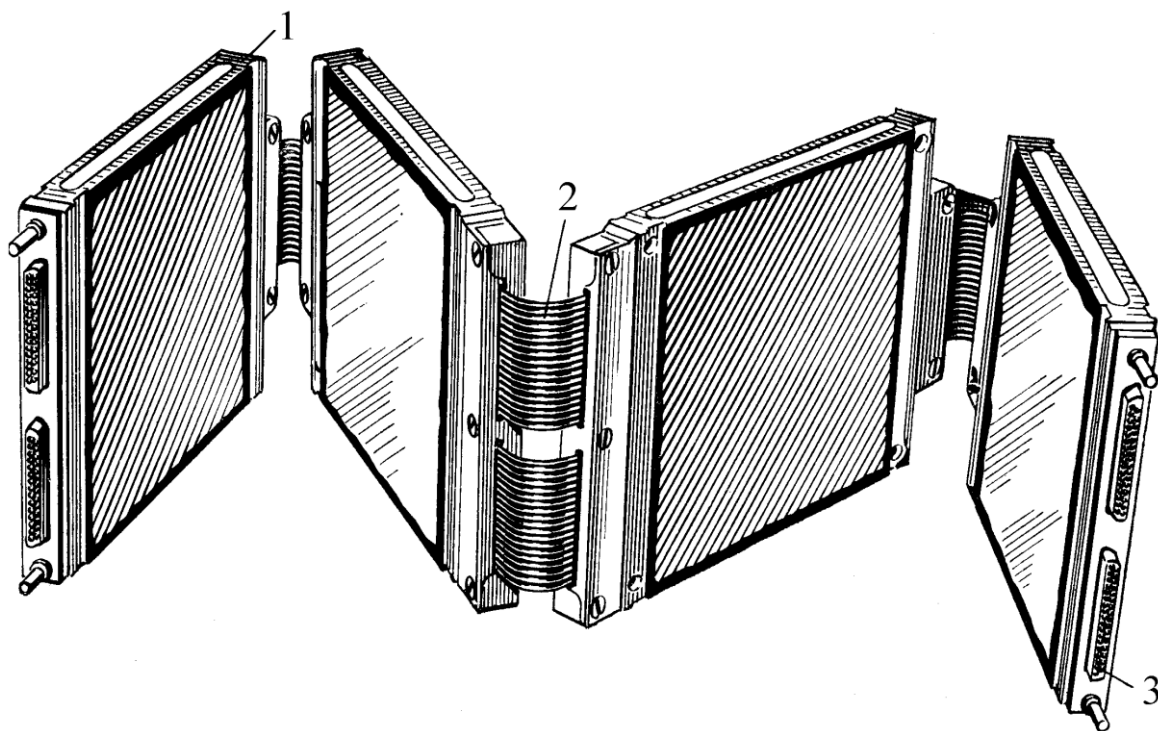


Рис. 4.93 Блок книжной конструкции:  
 1 – герметичный субблок; 2 – гибкий печатный кабель; 3 – разъем



Блоки книжной конструкции считаются особенно эффективными при использовании ячеек с бескорпусными МСБ (рис. 4.94).

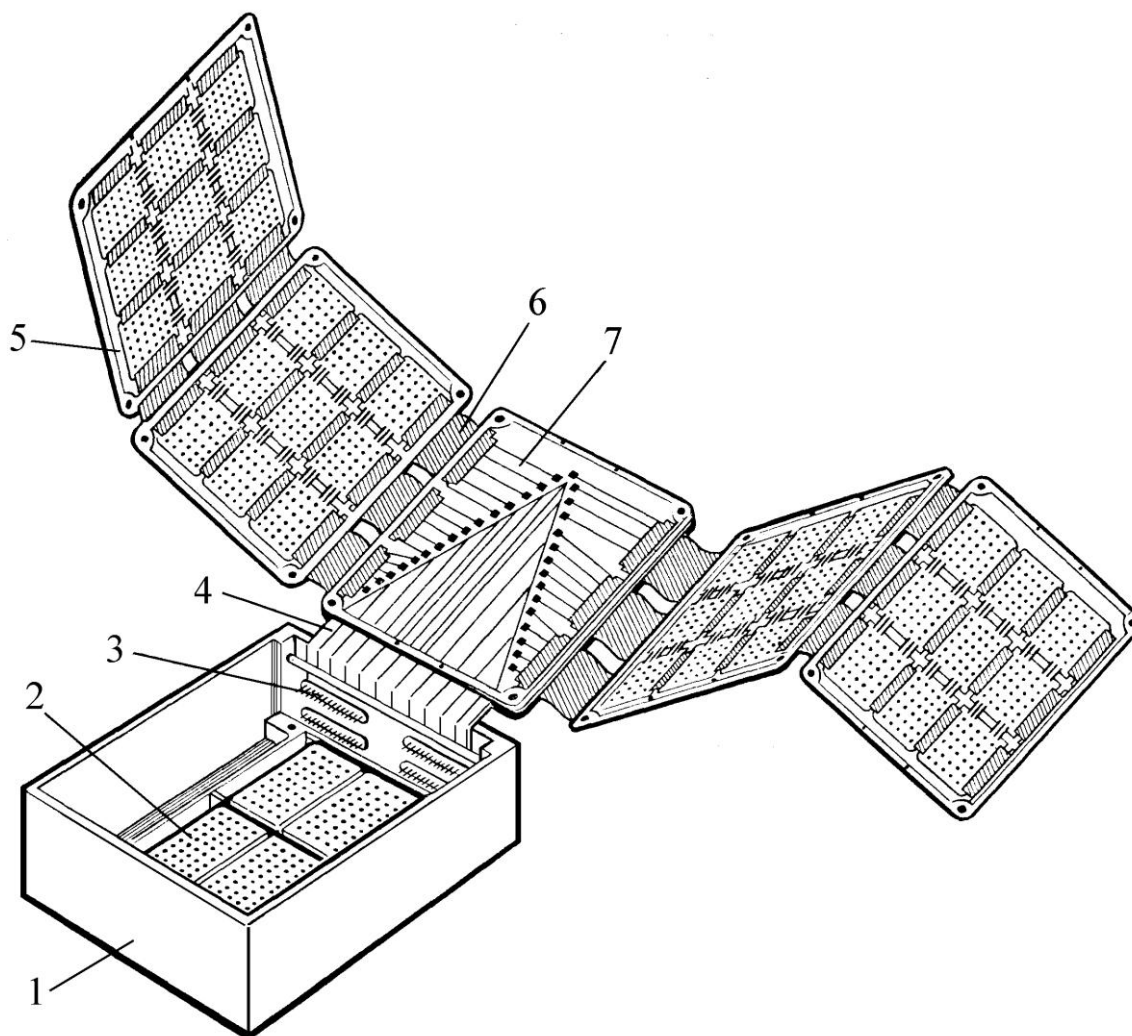


Рис. 4. 94. Блок бортовой ЭВМ:

1 – гермокорпус; 2 – источник питания; 3 – разъем; 4 – плоский проводной кабель; 5 – ячейка; 6 – гибкий печатный кабель; 7 – коммутационная плата

При автономном использовании блок должен быть закрыт кожухом, выполняемым обычно из листового материала. Кожух обеспечивает экранирование и защиту от внешних воздействий (в т.ч. от несанкционированного доступа во внутренний объем). Блоки, устанавливаемые в рамы или стойки (рис. 4.95), могут кожуха не иметь.

Стойки могут компоноваться рамами, блоками полными или частичными, а также субблоками. В зависимости от длины субблоков может устанавливаться непосредственно в стойку или в промежуточную раму. Рамы в стойке могут перемещаться по направляющим или закреп-

ляться шарнирно (книжная компоновка с вертикальной осью раскрытия).

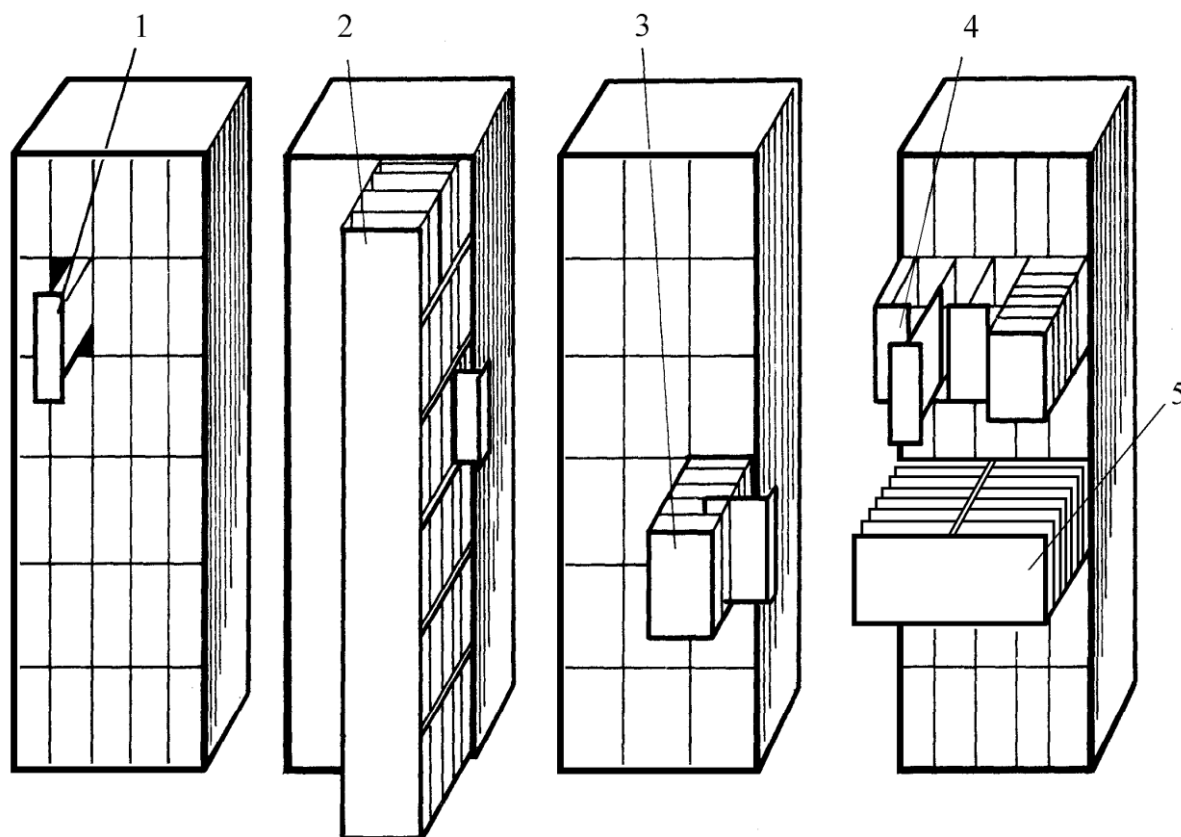


Рис. 4.95. Основные компоновочные схемы стоек:  
1 – ячейка; 2 – рама; 3 – блок; 4 – блок частичный; 5 – базовый блок

Электрические принципиальные схемы, реализуемые в виде блоков, могут быть разной степени сложности. Это приводит к необходимости иметь определенный ряд типоразмеров блоков. В конструкцию стойки обычно вводят основной базовый блок, имеющий наибольшие размеры и устанавливаемый по всей ширине каркаса стойки, и частичные – вставные блоки, составляющие по ширине часть основного, но размещаемые в той же стойке, что и основной. В стойке отсутствует монтажная панель, а коммутация блоков и рам обеспечивается объемными жгутами, плоскими проводами, печатными кабелями. Электрическое контактирование осуществляется разъёмными и неразъёмными соединениями (пайкой, термокомпрессионной сваркой, накруткой).

Метод накрутки (рис. 4.96) заключается в накручивании (с усилием) участка одножильного медного провода диаметром 0,4...1,6 мм на металлический штырь обычно квадратного сечения. Острые кромки штыря разрушают окисную пленку на поверхности провода и врезают-

ся в провод, создавая условия для взаимной диффузии металлов. В результате образуется газонепроницаемое соединение. Так как обычное количество витков составляет 4...8, то получаемое соединение благодаря многочисленным точкам контакта обладает достаточно высокой надежностью.

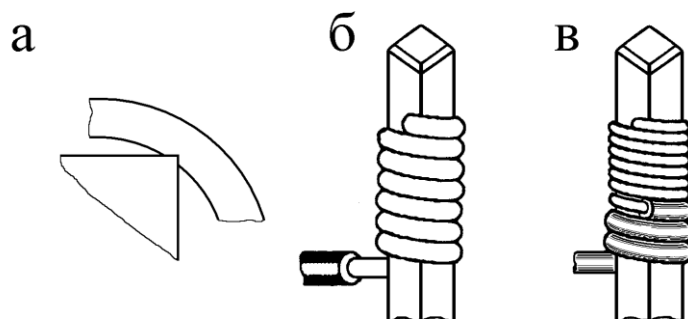


Рис. 4.96. Монтаж накруткой:  
а – образование контакта; б – обычное соединение;  
в – модифицированное соединение

Модифицированное соединение имеет дополнительно 1...2 витка провода в изоляции, что уменьшает вероятность обрыва провода при вибрациях.

Монтаж накруткой относится к автоматизированным методам. Минимальное расстояние между штырями определяется размерами. Конструкция стоек обычно включает также блоки питания, систему охлаждения, местный пульт управления, элементы электрического соединения стоек между собой. Стойку, имеющую передние дверцы, называют шкафом.

По требованиям техники безопасности, а также из соображений экранирования стойки металлические детали каркаса электрически объединяют оплеткой экранированного проводника с контактными лепестками «под винтовое соединение».

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Стандартные термины и определения

#### 1. Общие вопросы стандартизации (ГОСТ Р 1.0)

*Нормативный документ (НД)* – документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

*Стандарт* – НД по стандартизации, разработанный, как правило, на основе согласия, характеризующегося отсутствием возражений по существенным вопросам у большинства заинтересованных сторон, принятый (утвержденный) признанным органом (предприятием).

*Правила (ПР)* – документ, устанавливающий обязательные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ.

*Рекомендации (Р)* – документ, содержащий добровольные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ.

*Норма* – положение, устанавливающее количественные или качественные критерии, которые должны быть удовлетворены.

*Регламент* – документ, содержащий обязательные правовые нормы и принятый органом власти.

*Технический регламент* – регламент, который устанавливает характеристики продукции (услуги) или связанные с ней процессы и методы производства. К техническим регламентам относятся: законодательные акты, постановления Правительства Российской Федерации, содержащие требования, нормы, технические характеристики; государственные стандарты РФ и межгосударственные стандарты в части устанавливаемых в них **обязательных** требований; нормы и правила федеральных органов исполнительной власти, в компетенцию которых (в соответствии с законодательством РФ) входит установление обязательных требований.

#### 2. Разработка и постановка на производство (ГОСТ 2.101; ГОСТ 2.103; ГОСТ 3.1109; ГОСТ14.004; ГОСТ 14.205; ГОСТ 15.101; Р 50.1.031)

*Научно-исследовательская работа (НИР)* – комплекс теоретических и (или) экспериментальных исследований, проводимых с целью получения обоснованных исходных данных, изыскания принципов и путей создания (модернизации) продукции.

*Техническое задание на НИР* – исходный технический документ для проведения НИР, устанавливающий требования к содержанию, объемам и срокам выполнения этих работ.

*Контракт* – коммерческий документ, которым оформляются сделки (в том числе внешнеторговые) по купле-продаже продукции или услуг, включая оказание экономического и технического содействия зарубежным странам.

*Заказчик* – предприятие (организация, объединение или другой субъект хозяйственной деятельности), по заявке или контракту с которым производится создание и (или) поставка продукции (в том числе научно-технической).

*Исполнитель НИР* – предприятие (организация, объединение или другой субъект хозяйственной деятельности), выполняющее НИР.

*Патентные исследования* – исследование технического уровня и тенденций развития продукции, ее патентоспособности, патентной чистоты и конкурентоспособности.

*Отчетная научно-техническая документация (ОНТД)* – комплект документов, отражающих объективную информацию о содержании и результатах НИР (этапов НИР), а также содержащих рекомендации по ее использованию.

*Этап НИР* – часть НИР, являющаяся объектом планирования и финансирования.

*Макет* – упрощенное воспроизведение в определенном масштабе изделия или его части, на котором исследуются отдельные характеристики изделия, а также оценивается правильность принятых технических и художественных решений.

*Модель* – изделие, воспроизводящее или имитирующее конкретные свойства заданного изделия и изготовленное для проверки принципа его действия и определения характеристик.

*Экспериментальный образец* – образец продукции, обладающий основными признаками намечаемой к разработке продукции, изготовляемый с целью проверки предполагаемых решений и уточнения отдельных характеристик для использования при разработке этой продукции.

Примечание. Экспериментальный образец всегда выполняется в натуральную величину и представляет собой законченное в функциональном отношении изделие, пригодное для исследовательских испытаний.

*Испытания* – определение одной или нескольких характеристик продукции в соответствии с установленной процедурой.

*Программа испытаний* – документ, предназначенный для организации и выполнения работ, обеспечивающих проведение испытаний конкретного объекта.

*Методика испытаний* – документ или его часть, устанавливающие правила реализации методов испытаний.

*Изделие* – любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

*Деталь* – изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций. Например: печатная плата с металлизированными отверстиями, кабель с обработанными концами.

*Сборочная единица* – изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями. Например: микросборка, многослойная печатная плата, блок.

*Комплекс* – два или более специфицированных изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенные для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. Например: радиолокационный комплекс, вычислительный комплекс.

*Комплект* – два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера. Например: комплект запчастей, комплект инструмента, комплект измерительной аппаратуры.

*Основное производство* – производство товарной продукции.

*Вспомогательное производство* – производство средств, необходимых для обеспечения функционирования основного производства.

*Опытное производство* – производство образцов, партий и серий изделий при проведении научно-исследовательских работ.

*Разовое изготовление* – единовременное изготовление одного или более экземпляров изделия, дальнейшее производство которого не предусматривается.

*Единичное производство* – производство, характеризуемое малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматриваются.

*Серийное производство* – производство, характеризуемое изготовлением или ремонтом изделий, периодически повторяющимися партиями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство.

*Массовое производство* – производство, характеризуемое большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых (или ремонтируемых) продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

*Производственный процесс* – совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции.

*Технологичность конструкции* – совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

*Обеспечение технологичности конструкции изделия* – функция подготовки производства, включающая комплекс взаимосвязанных мероприятий по управлению технологичностью и совершенствованию условий выполнения работ при производстве, эксплуатации и ремонте изделий.

*Отработка конструкции изделия на технологичность* – часть работ по обеспечению технологичности, направленная на достижение заданного уровня технологичности и выполняемая на всех этапах разработки изделия.

*Технологический контроль конструкторской документации (КД)* – контроль КД, при котором проверяется соответствие конструкции изделия требованиям технологичности.

*Производственная технологичность конструкции изделия* – технологичность конструкции изделия при технологической подготовке производства, изготовлении, а также монтаже вне предприятия-изготовителя.

*Эксплуатационная технологичность конструкции изделия* – технологичность конструкции изделия при подготовке его к использованию по назначению, при техническом обслуживании, текущем ремонте и утилизации.

*Технологический процесс* – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда.

Примечания: 1. Технологический процесс может быть отнесен к изделию, его составной части или к методам обработки, формообразования и сборки.

2. К предметам труда относятся заготовки и изделия.

*Технологическая операция* – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте.

*Технологический переход* – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

*Комплект документов технологического процесса (операции)* – совокупность технологических документов, необходимых и достаточных для выполнения технологического процесса (операции).

*Маршрутное описание* – сокращенное описание всех технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов.

*Операционное описание* – полное описание всех технологических операций в последовательности их выполнения с указаниями переходов и технологических режимов.

*Единичный технологический процесс* – технологический процесс изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства.

*Групповой технологический процесс* – технологический процесс изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками. Например, групповой технологический процесс изготовления односторонних, двусторонних и многослойных плат.

*Типовой технологический процесс* – технологический процесс изготовления группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками. Например, типовой технологический процесс изготовления двусторонних печатных плат с металлизированными отверстиями.

*Средства технологического оснащения* – совокупность орудий производства, необходимых для осуществления технологического процесса.

*Технологическая подготовка производства* – совокупность мероприятий, обеспечивающих готовность производства.

*Технологическая готовность производства* – наличие на предприятии полных комплектов КД и ТД и средств технологического оснащения, необходимых для осуществления заданного объема выпуска продукции с установленными технико-экономическими показателями.

*Логистика* – наука о методах и способах управления материальными и информационными потоками в производстве и бизнесе; в частности, изучает процессы планирования, контроля и управления транспортированием, складированием, переработкой и др. операциями в процессе доставки готовой продукции потребителю.

*Бизнес-процесс (БП)* – совокупность последовательно или (и) параллельно выполняемых операций, преобразующая материальный или (и) информационный потоки в соответствующие потоки с другими свойствами. БП протекает в соответствии с управляющими директивами, вырабатываемыми на основе целей деятельности. В ходе БП потребляются финансовые, энергетические, трудовые и материаль-



ные ресурсы и выполняются ограничения со стороны других БП и внешней среды. Частными случаями БП являются организационно-деловые, технологические и др. процессы.

### 3. Надежность (ГОСТ 27.002)

*Надежность* – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Примечание. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

*Безотказность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

*Долговечность* – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

*Ремонтпригодность* – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

*Сохраняемость* – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

*Работоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Неработоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической в (или) конструкторской (проектной) документации.

Примечание. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

*Исправное состояние* – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Неисправное состояние* – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Повреждение* – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

*Отказ* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

*Постепенный отказ* – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

*Внезапный отказ* – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта.

*Явный отказ* – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению.

*Скрытый отказ* – отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

*Ресурсный отказ* – отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

*Независимый отказ* – отказ, не обусловленный другими отказами.

*Зависимый отказ* – отказ, обусловленный другими отказами.

*Конструктивный отказ* – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

*Производственный отказ* – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

*Эксплуатационный отказ* – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации.

*Деградационный отказ* – отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

*Сбой* – самоустранившийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

*Перебегающий отказ* – многократно возникающий самоустранившийся отказ одного и того же характера.

*Обслуживаемый объект* – объект, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией.

*Необслуживаемый объект* – объект, для которого проведение технического обслуживания не предусмотрено нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.

*Восстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Невосстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

*Ремонтируемый объект* – объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

*Неремонтируемый объект* – объект, ремонт которого не возможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

*Наработка* – продолжительность или объем работы объекта.

Примечание. Наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

*Наработка до отказа* – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

*Интенсивность отказов* – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

*Показатель надежности* – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

*Единичный показатель надежности* – показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.

*Комплексный показатель надежности* – показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта.

*Расчетный показатель надежности* – показатель надежности, значения которого определяются расчетным методом.

*Экспериментальный показатель надежности* – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний.

*Эксплуатационный показатель надежности* – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

*Вероятность безотказной работы* – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает.

*Средняя наработка до отказа* – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

*Средняя наработка на отказ* – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

*Резервирование* – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

*Определение надежности* – определение численных значений показателей надежности объекта.

*Расчетный метод определения надежности* – метод, основанный на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту оценки надежности.

*Предельное состояние* – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

*Ресурс* – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

*Срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

*Восстановление* – процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния.

#### 4. Электромагнитная совместимость (ГОСТ 30372/ГОСТ Р 50397; ГОСТ Р 51317.2.5/ МЭК 61000–2– 5)

*Электромагнитная обстановка (ЭМО)* – совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, частотном и временном диапазонах.

*Электромагнитная помеха (ЭМП)* – электромагнитное явление, процесс, которые снижают или могут снизить качество функционирования ЭС.

*Электромагнитная совместимость (ЭМС)* – способность ЭС функционировать с заданным качеством в заданной ЭМО и не создавать недопустимых ЭМП другим техническим средствам.

*Источник помехи* – источник искусственного или естественного происхождения, которые создают или могут создать ЭМП.

*Электромагнитная эмиссия от источника помехи* – генерирование источником помехи электромагнитной энергии.

*Экран (электромагнитный)* – устройство или элемент конструкции устройства, обеспечивающий поглощение, преобразование или отражение электрических и (или) магнитных полей и электромагнитных волн.

*Экранирование (электромагнитное)* – способ ослабления ЭМП с помощью экрана с высокой электрической и (или) магнитной проводимостями.

*Рецептор* – ЭС, реагирующее на электромагнитный сигнал и (или) ЭМП.

*Естественная помеха* – ЭМП, источником которой являются природные физические явления.

*Искусственная помеха* – ЭМП, источником которой является устройство, созданное человеком.

*Атмосферная помеха* – естественная помеха, источником которой являются электрические разряды в атмосфере.

*Электростатическая помеха* – естественная помеха, обусловленная электризацией и проявляющаяся вследствие импульсных токов стекания накопленных электрических зарядов и (или) электростатических разрядов.

*Кондуктивная помеха* – ЭМП, распространяющаяся по проводникам.

*Индустриальная помеха* – ЭМП, создаваемая техническими средствами.

Примечание. К индустриальным помехам не относятся помехи, создаваемые излучениями выходных трактов радиопередатчиков.

*Коммутационная помеха* – индустриальная помеха, возникающая при процессах коммутации тока и напряжения.

*Межсистемная помеха* – ЭМП, источник которой находится в системе, не относящейся к рассматриваемой.

*Внутрисистемная помеха* – ЭМП, источник которой находится внутри рассматриваемой системы.

*Порт* – граница между ЭС и внешней электромагнитной средой (зажим, разъем, клемма, стык связи и т.п.).

*Порт корпуса* – физическая граница ЭС, через которую могут излучаться создаваемые ЭС или проникать внешние электромагнитные поля.

## 5. ПС, ПП, ИС и МСБ (ГОСТ 17021, ГОСТ 20406, ГОСТ 26975)

*Печатная плата (ПП)* – материал основания, вырезанный по размеру, содержащий необходимые отверстия и, по меньшей мере, один проводящий рисунок.

*Рисунок ПП* – конфигурация проводникового и (или) диэлектрического материалов на ПП.

Примечание. Рисунок означает также соответствующую конфигурацию на заготовке, инструментах и т.д.

*Проводящий рисунок* – рисунок ПП, образованный проводящим материалом.

*Материал основания ПП* – материал, на котором выполняется рисунок ПП.

*Заготовка ПП* – материал основания ПП определенного размера, который подвергается обработке на всех производственных операциях.

*Печатный узел* – ПП с подсоединенными к ней электрическими и механическими элементами и (или) другими ПП и с выполненными всеми процессами обработки.

Примечание. К процессам обработки относится пайка, покрытие и т.д.

*Объединительная ПП* – ПП, предназначенная для электрического соединения двух или более печатных узлов.

*Печатный проводник* – одна проводящая полоска или площадка в проводящем рисунке.

*Печатный монтаж* – способ монтажа, при котором электрическое соединение элементов электронного узла, включая экраны, выполнено с помощью печатных проводников.

*Печатный элемент* – элемент, изготовленный с применением печати.

Примечание. Под элементом понимают индуктивность, резистор, конденсатор и т.д.

*Печатная схема* – схема, полученная путем печати и включающая печатные элементы, проводящий рисунок или их комбинацию, образованные в предварительной конструкции или подсоединенные к поверхности общего основания.

*Проводящий слой ПП* – проводящий рисунок, лежащий в одной плоскости.

*Концевые печатные контакты* – ряд печатных контактов на краю ПП, предназначенных для сопряжения с гребенчатым соединителем.

*Крепежное отверстие ПП* – отверстие, используемое для механического крепления ПП на шасси или для механического крепления элементов к печатной плате.

*Металлизированное отверстие ПП* – отверстие в ПП с осажденным на стенках проводниковым материалом.

*Монтажное отверстие ПП* – отверстие, используемое для соединения выводов навесных элементов с ПП, а также для любого электрического подсоединения к проводящему рисунку.

*Фиксирующее отверстие ПП* – отверстие в ПП, предназначенное для точного ее расположения в процессе обработки.

*Фотошаблон рисунка ПП* – инструмент, используемый для копирования имеющегося на нем изображения с помощью света.

*Координатная сетка чертежа ПП* – сетка, определяющая положение элементов рисунка ПП в прямоугольной или полярной системе координат.

*Фольгированный материал* – материал основания ПП, имеющий с одной или двух его сторон проводящую фольгу.

*Прокладочная стеклоткань* – листовой материал, пропитанный смолой в стадии «В».

*Смола в стадии «В»* – терморезистивная смола в промежуточной стадии реакции полимеризации, при которой она разбухает, когда контактирует с определенными жидкостями и размягчается при нагреве, но не может полностью раствориться или расплавиться.

*Проводящая фольга* – листовой проводниковый материал, предназначенный для образования проводящего рисунка ПП.

*Субтрактивный процесс* – процесс получения проводящих рисунков, заключающийся в избирательном удалении участков проводящей фольги.

*Аддитивный процесс* – процесс получения проводящих рисунков, заключающийся в избирательном осаждении проводникового материала на нефольгированный материал основания.

*Показатель травления* – отношение глубины травления к боковому подтравливанию.

*Осаждение* – процесс, заключающийся в химическом или электрохимическом нанесении металла на всю или на часть поверхности основания и (или) проводящего рисунка.

*Резист* – покрытие диэлектрическое или металлическое, используемое в качестве защиты при выполнении последующих операций.

*Интегральная микросхема (ИС)* – микросхема, ряд элементов которой нераздельно выполнен и электрически соединен между собой таким образом, что с точки зрения технических требований, испытаний, торговли и эксплуатации устройство рассматривается как целое.

Примечание. Под микросхемой понимают микроэлектронное устройство, рассматриваемое как единое изделие, имеющее высокую плотность расположения элементов и (или) компонентов, эквивалентных элементам обычной схемы.

*Микросборка (МСБ)* – микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала, состоящее из элементов и (или) компонентов, размещенных на общей подложке, разрабатываемое для конкретной радиоэлектронной аппаратуры с целью улучшения показателей ее миниатюризации и рассматриваемое как единое целое с точки зрения требований к приемке, поставке и эксплуатации.

*Элемент ИС* – часть ИС, реализующая функцию какого-либо ЭРЭ, которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Примечание. Под ЭРЭ понимают транзистор, диод, резистор, конденсатор и др.

*Элемент МСБ* – часть МСБ, которая реализует функцию электрорадиоизделия, выполнена нераздельно от платы и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке и поставке.

Примечание. Под электрорадиоизделием понимают изделие, выполняющее функцию генерирования, преобразования, переключения, задержки, распределения, запоминания и фильтрации радиочастотных сигналов.

*Компонент ИС* – часть ИС, реализующая функцию какого-либо ЭРЭ, которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

*Компонент МСБ* – часть МСБ, которая реализует функцию электрорадиоизделия и может быть выделена как самостоятельное



изделие с точки зрения, требований к испытаниям, приемке и поставке.

*Полупроводниковая ИС* – ИС, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме или на поверхности полупроводникового материала.

*Пленочная ИС* – ИС, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в виде пленок.

Примечание. Пленочные интегральные микросхемы могут быть толстопленочными и тонкопленочными.

*Гибридная ИС* – ИС, содержащая, кроме элементов, компоненты и (или) кристаллы.

*Аналоговая ИС* – ИС, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции.

*Цифровая ИС* – ИС, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции.

*Корпус ИС* – часть конструкции интегральной микросхемы, предназначенная для ее защиты от внешних воздействий и для соединения с внешними электрическими цепями посредством выводов.

*Подложка ИС* – заготовка из диэлектрического материала, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных ИС, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

*Полупроводниковая пластина* – заготовка из полупроводникового материала, предназначенная для изготовления полупроводниковых ИС.

*Бескорпусная ИС* – кристалл ИС, предназначенный для монтажа в гибридную ИС или МСБ.

*Плотность упаковки ИС (МСБ)* – отношение суммы элементов ИС (МСБ) и (или) элементов, содержащихся в составе компонентов, к объему ИС (МСБ).

Примечание. Объем выводов не учитывают.

*Степень интеграции ИС (МСБ)* – показатель степени сложности ИС (МСБ), характеризуемый числом содержащихся в ней элементов и (или) компонентов.

Примечание. Степень интеграции ИС (МСБ) определяют по формуле:

$$K = \lg N,$$

где  $K$  – коэффициент, определяющий степень интеграции, значение которого округляют до ближайшего большего целого числа;  $N$  – число элементов ИС (МСБ), в том числе содержащихся в составе компонентов, входящих в ИС (МСБ).

*Малая ИС* – ИС, содержащая до 100 элементов и (или) компонентов включительно.

*Средняя интегральная микросхема* – ИС, содержащая от 100 до 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и от 100 до 500 – для аналоговых ИС.

*Большая интегральная микросхема (БИС)* – ИС, содержащая свыше 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 500 для аналоговых ИС.

*Сверхбольшая интегральная микросхема (СБИС)* – ИС, содержащая свыше 100 000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС с регулярной структурой построения, свыше 50 000 – для цифровых ИС с нерегулярной структурой построения и свыше 10 000 – для аналоговых ИС.

Примечание. 1. К цифровым ИС с регулярной структурой построения относят схемы запоминающих устройств и схемы на основе базовых матричных кристаллов.

2. К цифровым ИС с нерегулярной структурой построения относят схемы вычислительных средств.

*Сверхскоростная ИС* – цифровая ИС, функциональное быстродействие которой не менее  $10^{13}$  Гц/см<sup>2</sup> на 1 логический элемент.

Примечание. Под функциональным быстродействием понимают произведение рабочей частоты логического элемента, равной обратному учетверенному максимальному значению среднего времени задержки распространения сигнала на число логических элементов, приходящихся на один квадратный сантиметр площади кристалла.

*Кристалл ИС* – часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы элементы полупроводниковой ИС, межэлементные соединения и контактные площадки.

*Базовый кристалл ИС* – часть полупроводниковой пластины с определенным набором сформированных элементов, в том числе электрически соединенных и (или) не соединенных между собой, используемая для создания ИС путем изготовления межэлементных соединений.

*Базовый матричный кристалл ИС (БМК)* – базовый кристалл ИС с регулярным в виде матрицы расположением базовых ячеек.

*Базовая ячейка кристалла ИС* – совокупность несоединенных и (или) соединенных между собой элементов, являющаяся основой для построения БМК.

Примечание. Базовую ячейку, выполняющую простейшие логические функции И-НЕ (ИЛИ-НЕ), называют базовым вентилем ИС.

*Контактная площадка ИС* – металлизированный участок на подложке, кристалле или корпусе ИС, служащий для присоединения выводов компонентов и кристаллов, перемычек, а также для контроля ее электрических параметров и режимов.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БП – бизнес-процесс  
ВП – виртуальное предприятие  
ГИС – гибридная интегральная схема  
ГПК – гибкий печатный кабель  
ГПП – гибкая печатная плата  
ДСЕ – детали и сборочные единицы  
ЖЦ – жизненный цикл  
ЗИП – запасные части, инструменты и приспособления  
ИЛП – интегрированная логистическая поддержка  
ИС – интегральная микросхема  
ИЭТР – интерактивное электронное техническое руководство  
КД – конструкторская документация  
КМ – контактная маска  
КМОП – комплементарные МОП-транзисторы  
КСПИ – компьютерное сопровождение процессов жизненного цикла изделий  
КЭ – конструктивный элемент  
ЛС – линия связи  
МПП – многослойная печатная плата  
МСБ – микросборка  
НИР – научно-исследовательская работа  
НД – нормативная документация  
ОКР – опытно-конструкторская работа  
ПП – печатная плата  
ППИС – полупроводниковая интегральная микросхема  
ПС – печатная схема  
РЛ – рентгенолитография  
СКЭ – система конструктивных элементов  
СЛС – система линий связи  
СОТР – система обеспечения теплового режима  
СФЭ – система функциональных элементов  
ТД – технологическая документация  
ТЗ – техническое задание  
ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения  
ТКС – термокомпрессионная сварка  
ТП – технологический процесс  
ТПП – технологическая подготовка производства  
ТТ – технические требования  
ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика  
ТУ – технические условия  
УЗС – ультразвуковая сварка

ФР – фоторезист  
ФШ – фотошаблон  
ФЭ – функциональный элемент  
ЭБ – элементная база  
ЭЛЛ – электронно-лучевая литография  
ЭМ – электронный модуль  
ЭМВ – электромагнитная волна  
ЭМО – электромагнитная обстановка  
ЭМП – электромагнитная помеха  
ЭМПП – электронный модуль на печатных платах  
ЭМС – электромагнитная совместимость  
ЭРЭ – электрорадиоэлемент  
ЭС – электронное средство  
ЭЦП – электронно-цифровая подпись

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.Е. Егунов, Б.Л. Жоржолиани, В.Г. Журавский, В.В. Жуков. Под ред. В.Г. Журавского. М.: Радио связь, 1988. 280 с.
2. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 238 с.
3. Блинов Г.А. Гибридные интегральные функциональные устройства. М.: Высш. шк., 1987. 111 с.
4. Бондаренко О.Е., Федотов Л.М. Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок. М.: Радио и связь, 1988. 136 с.
5. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 496 с.
6. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технологическое проектирование микросхем СВЧ: Учеб. пособ. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 356 с.
7. Гель П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация электронной аппаратуры: Учебник для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. 536 с.
8. Гуткин Л. С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: Учеб. пособ. для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
9. Дорфман В.Ф., Иванов Л.В. ЭВМ и её элементы. Развитие и оптимизация. М.: Радио и связь, 1988. 240 с.
10. Коледов Л.Я. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1989. 400 с.
11. Конструирование и технология производства ЭВМ: Учебник / М.И. Пикуль, И.М. Русак, Н.А. Цырельчук. Минск: Вышэйшая школа, 1996. 263 с.
12. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
13. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др. Под общ. ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с. (Сер. Информатика в техническом университете).

- 14 Кузьмин В. Материалы для пайки печатных узлов при производстве современной РЭА // Электронные компоненты. 2001. № 6. С. 86-88.
15. Медведев А.М. Монтаж компонентов. Куда движется технология // Электронные компоненты. 2002. №7. С. 13-19.
16. Медведев А.М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. М: Радио и связь, 1986. 216 с.
17. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах / И.Н. Воженин, Г.А. Блинов, Л.А. Коледов и др. Под ред. И.Н. Воженина. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
18. Многослойный печатный монтаж в приборостроении, автоматике и вычислительной технике / В.И. Ошарин, И.В. Борисов, Л.Н. Московкин, А.Т. Белевцев. Под ред. А.Т. Белевцева. М.: Машиностроение, 1978. 264 с.
19. Монтаж на поверхность: Технология. Контроль качества / В. Н. Григорьев, А. А. Казаков, А. К. Джинчарадзе и др. Под общ. ред. И. О. Шурчкова. М.: Изд-во стандартов, 1991. 184 с.
20. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высш. шк., 1990. 432 с.
21. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем: Учебник для вузов по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1989. 312 с.
22. Савельев М.В. Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ: Учеб. пособ. для вузов. М.: Высш. шк., 2001. 319 с.
23. Технология многослойных печатных плат / А.А. Федулова, Ю.А. Устинов, Е.П. Котов и др. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.
24. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: Учебник / А. П. Достанко, В. Л. Ланин, А. А. Хмыль, Л. П. Ануфриев. Под общ. ред. А. П. Достанко. Минск: Вышэйшая школа, 2002. 415 с.
25. Технология СБИС: В 2-х кн. / Пер. с англ. Под ред. С.Зи. М.: Мир, 1986. Кн.1. 404 с., кн.2. 453 с.
26. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ: Учеб. для вузов по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». М.: Высш. шк., 1991. 416 с.
27. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / Пер. с нем. Под ред. В.Н. Черняева. М.: Энергия, 1980. 464 с.
28. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. М.: Высш. шк., 1987. 376 с.
29. Электронные компоненты, 2001. № 5. 184 с.

30. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА: Учеб. пособ. для вузов. М.: Радио и связь, 1983. 312 с.
31. Галецкий Ф.П. Печатные платы быстродействующих устройств. Режим доступа: <http://www.fpgaletsky.ru>
32. Закон о стандартизации. Режим доступа: <http://standard.ru>
33. Кечиев Л.Н. Основы проектирования РЭС. Режим доступа: <http://kechiev.distudy.ru>
34. CALS. Режим доступа: <http://www.osp.ru>
35. Practical Components. Режим доступа: <http://www.practical-components.com>

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. НОРМАТИВНАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ .....	5
1.1. Общая характеристика стандартизации.....	5
1.2. Государственная система стандартизации России.....	8
1.3. Общая характеристика стандартов разных видов.....	13
1.4. Международная и региональная стандартизация.....	16
1.5. Применение международных и региональных стандартов в отечественной практике.....	18
1.6. Техническая документация.....	19
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ПОСТАНОВКИ ЭС НА ПРОИЗВОДСТВО.....	26
2.1. Общая характеристика ЭС.....	26
2.2. Организация и этапы разработки и постановки на производство .....	35
2.3. Основы проектирования ЭС .....	48
2.4. Понятие о СALS-технологии.....	54
3. ЗАЩИТА ЭС ОТ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ.....	59
3.1. Защита ЭС от механических воздействий.....	59
3.2. Обеспечение заданного теплового режима.....	62
3.3. Обеспечение помехоустойчивости ЭС.....	71
3.4. Герметизация ЭС.....	88
4. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭС И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	93
4.1. Печатные схемы.....	93
4.2. Печатные платы.....	101
4.3. Гибридные интегральные схемы и микросборки.....	129
4.4. Полупроводниковые интегральные схемы.....	148
4.5. Сборка интегральных схем и микросборок.....	165
4.6. Электронные модули на печатных платах.....	172
4.7. Блоки и стойки.....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	196
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	211
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	213



Учебное издание

Владимир Ильич Иевлев

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Редактор – О.В. Протасова

ИД №06263 от 12.11.2001 г.

---

Подписано в печать	17.02.2007	Формат 60x84 1/8
Бумага типографская	Офсетная печать	Усл. печ.л. 17,66
Уч.-изд. л. 13,5	Тираж 200	Заказ Цена «С»

---

Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО УГТУ – УПИ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ризография НИЧ ГОУ ВПО УГТУ – УПИ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19