

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Автор-составитель
В.Л. Ким

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК 004.3(075.8)

ББК 32.973-02я73

К40

Ким В.Л.

К40

Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ: учебное пособие / автор-сост. В.Л. Ким; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 200 с.

В учебном пособии изложены вопросы конструирования и технологии производства ЭВМ. Рассмотрены стадии создания и реализации средств вычислительной техники, уровни конструктивной иерархии, методы обеспечения помехоустойчивости, надежности, особенности теплового конструирования, взаимодействие с внешней средой и приведены сведения о системах автоматизированного проектирования электронной аппаратуры.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 230100 «Информатика и вычислительная техника».

УДК 004.3(075.8)

ББК 32.973-02я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор ТУСУР

В.М. Дмитриев

Доктор технических наук, профессор ТГУ

В.И. Сырямкин

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014

© Ким В.Л., 2014

© Оформление. Издательство
Томского политехнического
университета, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одними из важнейших видов профессиональной деятельности бакалавров по направлению подготовки «Информатика и вычислительная техника» являются проектно-конструкторская и проектно-технологическая деятельности. При этом бакалавры должны решать такие задачи как проектирование программных и аппаратных средств в соответствии с техническим заданием и с использованием средств автоматизации проектирования, разработка и оформление проектной и рабочей технической документации в соответствии с нормативными документами, участие в работах по автоматизации технологических процессов в ходе подготовки производства новых изделий средств вычислительной техники.

Учитывая, что современные ЭВМ являются не только объектом проектирования, но и ключевым элементом систем автоматизации, то важным вопросом представляется взаимодействие их с внешней средой, в том числе с объектами контроля, управления, измерения. Средства сопряжения последних с ЭВМ отличаются многообразием конструктивных решений. Поэтому конкурентоспособный выпускник должен уметь применять конструкторско-технологические требования в процессе конструирования как собственно ЭВМ, так и средств сопряжения; выбирать соответствующие технологии их изготовления; решать задачи компоновки иерархических модулей ЭВМ и её обрамления с учетом обеспечения помехоустойчивости, тепловых режимов и надежности.

Эти основные вопросы и рассматриваются в дисциплине «Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ».

В основе учебного пособия положены лекции, которые читались автором в Томском политехническом университете студентам дневного и заочного обучения по направлению «Информатика и вычислительная техника» и «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУИРОВАНИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

Конструкция электронной вычислительной аппаратуры (ЭВА) отличается следующими особенностями [1, 2]:

- количеством электронных элементов, несоизмеримо превосходящих количество других элементов конструкции;
- многократной повторяемостью электронных элементов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и др.) в различных конфигурациях микросхем и принципиально-электрических схем;
- необходимостью обеспечения электрических связей между отдельными элементами и узлами, механические связи выполняют второстепенные функции;
- слабой связью между внешним оформлением и внутренней компоновкой функциональных элементов и узлов, что позволяет эти стороны конструирования рассматривать сравнительно независимо друг от друга;
- необходимостью учета возможности искажения полезных сигналов и появления ложных сигналов (помех);
- необходимостью учета тепловых связей, которые, как правило, существенно влияют на параметры конструкции.

Перечисленные особенности настолько существенны, что это обуславливает выделение конструирования электронной аппаратуры в отдельную область знаний.

От конструкции в значительной степени зависит качество и эффективность ЭВА, ее надежность, массо-габаритные и энергетические параметры, стоимость производства и эксплуатации, функциональные возможности.

В процессе конструирования любого изделия необходимо ориентироваться на конкретную технологию его изготовления.

Это правило является результатом накопленного опыта инженерной деятельности по созданию искусственных объектов, к которым относится и ЭВМ.

Конструкция вычислительной машины, разработанная без учета особенностей и специфики технологии, как правило, оказывается нежизнеспособной и практически нереализуемой. Поэтому конструктор-разработчик ЭВМ и систем должен умело ориентироваться среди технологических методов реализации той или иной

конструкторской проблемы и проектировать типовые элементы конструкции с учетом выбранных технологических методов их изготовления [3].

Разработчик ЭВА должен разбираться в следующих вопросах конструкторско-технологического проектирования:

- виды и порядок разработки технической документации;
- влияние внешних факторов на работоспособность ЭВМ;
- методы проектирования и изготовления микроэлектронных изделий,
- методы конструирования элементов, узлов и устройств ЭВМ;
- обеспечение электромагнитной совместимости, механической прочности, нормальных тепловых режимов и надежности;
- проектирование ЭВМ с учетом требований эргономики и технической эстетики;
- общие вопросы организации производства ЭВМ;
- стандартные и специальные технологические процессы в производстве ЭВМ;
- методы сборки и монтажа ЭВМ;
- методы регулировки, настройки и испытаний ЭВМ.

1.1. Основные понятия и определения

В данном пособии предлагаются понятия и определения, сформировавшиеся к настоящему периоду развития средств вычислительной техники (СВТ), наиболее распространенные в технической литературе и учебниках по конструированию и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и ЭВМ.

Среди множества понятий и определений, относящихся к предмету изучения, необходимо выделить основные, часто встречающиеся [2].

Проектирование – процесс разработки технической документации, на основании которой может быть изготовлено изделие (в данном случае ЭВМ), выполняющее возложенные на него функции и соответствующее всем предъявленным требованиям.

К понятиям конструкции и конструирования ЭВМ целесообразно подходить как с общетехнических позиций, так и конкретных предметных.

Конструирование электронной аппаратуры – процесс определения ее формы, размеров и материалов, способов электрического и механического соединения, входящих в нее элементов, а также способов защиты элементов и аппаратуры в целом от внутренних и внешних помех и воздействий.

Конструкция ЭВМ – это комплекс различных по своей природе деталей и элементов конструкций, объединенных определенным образом электрически и механически друг с другом и призванных выполнять заданные функции в заданных условиях и режимах эксплуатации [2, 3].

Такое определение относится к предметной области. Деталью в данном случае называются электронные компоненты (корпуса микросхем, резисторов, конденсаторов и т. п.), печатные платы, разъемы, механические крепежные детали, а под элементами конструкции, помимо указанных деталей, подразумеваются каркасы, шасси, блоки, панели и т. п. При этом первостепенное значение имеют электрические соединения, а механическим связям отводится второстепенная роль (в основном, фиксация элементов друг относительно друга).

Требования к проектируемому изделию часто формулируются в виде допустимых значений определенных параметров (например, «питание устройства должно осуществляться от сети переменного тока 220 В»). Также в требованиях к устройству может быть указано соответствие определенным стандартам.

Термин «**технология**» произошел от двух греческих слов: “*τεχνη*” – искусство, мастерство, умение и “*λογος*” – наука.

В производстве ЭВМ термин технология применяется для обозначения методов, способов и приемов обработки исходных материалов, полуфабрикатов, заготовок и для обозначения операций обработки, сборки и их сочетаний в процессе изготовления изделия – ЭВМ.

Технологией называют описания, состоящие из операционных и технологических карт, инструкций и т. п. Термин «технология» обозначает также научную дисциплину, которая занимается выявлением сущности и закономерностей механических, физических и химических воздействий на материалы с целью получения детали или изделия с наперед заданными свойствами для разработки и внедрения в производство новых технологических процессов.

Остальные понятия и определения будут разъясняться по мере изложения материала [2].

1.2. Этапы создания ЭВМ

Процесс создания нового изделия состоит из трех этапов: научно-исследовательской разработки (НИР), опытно-конструкторской разработки (ОКР) и внедрения нового изделия в производство [2].

На основе анализа опыта по созданию ЭВМ были рассчитаны затраты на каждом из этих этапов по трудоемкости и стоимости.

Для сравнения общие затраты на первом этапе были приняты в виде условной «1», распределение затрат на остальных этапах значительно превышает первый, что отражено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Соотношение затрат на различных этапах создания ЭВМ

№ п/п	Этапы создания ЭВМ	Общие затраты (в условных единицах)
1	НИР	1
2	ОКР	10
3	Внедрение в производство	100

Для пояснения данных, приведенных в таблице, необходимо отметить, что основные, принципиальные решения по выбору схемотехнического варианта новой ЭВМ, выбор элементной базы, математического обеспечения в основном происходят на этапе НИР и незначительно в начале ОКР, а конструкторские и технологические задачи в значительной степени решаются на втором и третьем этапах. Наиболее трудной ситуацией может быть отсутствие технологий для реализации схемных разработок.

В настоящее время за рубежом и в России существует тенденция к разделению схемотехнического проектирования, конструирования и производства ЭВА между отдельными автономными предприятиями [4]. В этом случае требования к эффективному общению между заказчиками и исполнителями возрастают, поскольку исполнители не могут знать всей специфики разрабатываемых и производимых устройств.

1.3. Проблемы заключительного этапа проектирования ЭВМ

Внедрение нового изделия в производство или, иначе говоря, промышленное освоение новой техники – самый трудоемкий и дорогостоящий заключительный этап создания техники (рис. 1.1).

Согласно [2, 5] процесс создания и освоения новой техники (СОНТ) следует рассматривать в совокупности всех стадий, которые требуются для реализации конечной цели – передачи в сферу эксплуатации новых видов продукции электронной техники.

На этот процесс влияет большое число факторов и воздействий схемотехнического, конструкторского, технологического и организационно-экономического характера. Поэтому соединение науки,

техники и производства должно быть наиболее тесным, интегрированным. Чем динамичнее развивается отрасль, тем важнее для нее интеграция.

Промышленное освоение требует создания и поставки нового оборудования, освоения новых технологий, технологической оснастки, материалов, комплектующих элементов, т. е. большого объема организационно-технических работ.

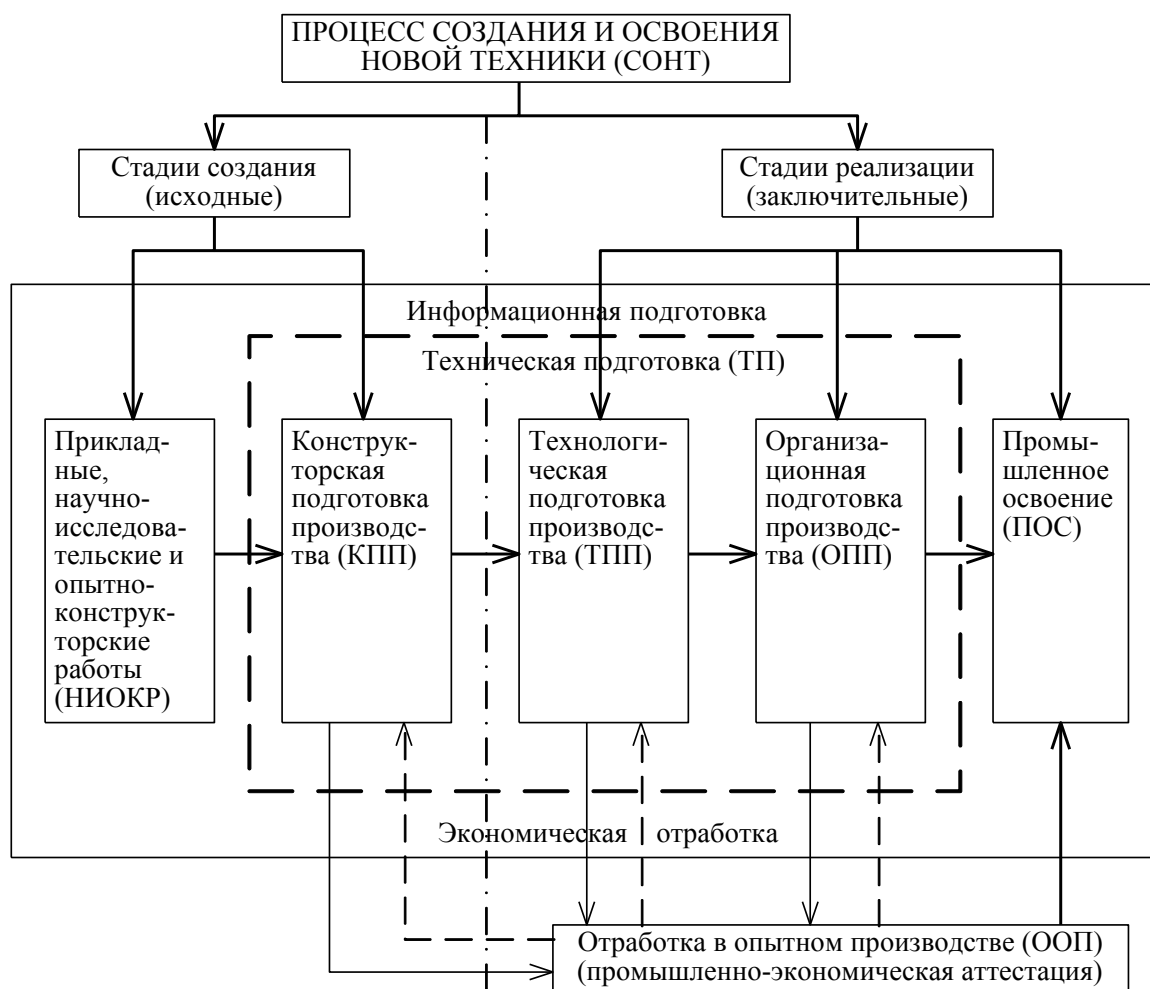


Рис. 1.1. Структура процесса создания и освоения новой техники

Различают следующие стадии работ по созданию нового вида ЭВА и другой микроэлектронной техники [5]: научно-исследовательские работы; опытно-конструкторские работы; конструкторскую подготовку производства (КПП); технологическую подготовку производства (ТПП); организационную подготовку производства (ОПП); отработку в опытном производстве (ООП); промышленное освоение (ПОС).

Как показано на рис. 1.1, процесс создания и освоения новой техники разбивается на две основные стадии: создания и реализации.

Процессы создания новой техники включают научные исследования и опытно-конструкторские работы (НИОКР).

Процессы реализации содержат работы по всем видам подготовки производства (конструкторской, технологической, организационной) и промышленному освоению выпуска новых изделий (развертыванию промышленного производства).

Все процессы создания и внедрения нового изделия в производство специфичны по выполняемым функциям, отличны по размерам затрат на получение конечного продукта и имеют самостоятельное значение.

Современные тенденции диктуют целесообразность и эффективность экономической отработки создаваемых изделий, начиная с самых ранних стадий СОНТ – выполнения НИР и разработки технического задания (ТЗ), а не на заключительных стадиях, связанных с производством, как это было ранее.

На рис. 1.1 этапы НИР и ОКР объединены общим обозначением НИОКР.

На этапе НИР производится предварительная аналитическая и расчетная подготовка изделия [3]. Результат НИР – научно-технический отчет, содержащий выводы о новых принципах построения изделия, научно обоснованный подход к реализации этих принципов, анализ проведенных исследований. НИР может дать отрицательный результат, показывающий, что на современном уровне развития науки и техники реализация поставленной задачи невозможна или преждевременна.

Работа на этапе ОКР основывается на результатах НИР и является процессом инженерного воплощения теоретических результатов, полученных на этапе НИР, в схему или конструкцию изделия. На этапе ОКР на первый план выступают экономические задачи, так как именно здесь формируются основные параметры изделия, влияющие как на его стоимость, так и на длительность и стоимость его разработки. Во время выполнения ОКР производится теоретическое, расчетное и экспериментальное исследование реализованных в изделии идей.

1.4. Подготовка предприятия к освоению нового изделия

Техническая подготовка (ТП) включает три стадии освоения нового изделия в производстве:

- конструкторскую подготовку производства;
- технологическую подготовку производства;
- организационную подготовку производства.

Первой стадией освоения изделия является конструкторская подготовка. Для отражения сущности решаемых задач на этом этапе необходима некоторая исходная информация.

По определению понятия «конструирование ЭВМ» становится очевидным, что электронная схема ЭВМ реализуется в ее конструкции.

Основными документами для составления ТЗ на решение конструкторских задач являются принципиальные электрические схемы с перечнями элементов. Количество таких схем зависит от нового схемного решения и архитектурного построения создаваемой ЭВМ, новой элементной базы.

В свою очередь, конструкторские задачи в основном зависят от количества функционально-законченных схемных частей, на которые разбиваются функционально-логические схемы ЭВМ и затем реализуются в виде печатных плат (ПП). При этом учитывается расширение функциональных возможностей ЭВМ, таких, как модемы, дисководы для компакт-дисков и т. п.

Для изготовления элементов конструкции, а затем их сборки создается конструкторская документация в виде конструкторских чертежей на детали, сборочные единицы, на сборку и монтаж. Эта документация создается с учетом конкретных технологий изготовления изделия.

Разработкой такой документации завершается конструкторское проектирование.

Как разработка схемных документов, так и разработка конструкторских чертежей осуществляется итерационным методом.

Итерационный процесс можно представить следующим образом.

На основе анализа ТЗ и проведенных исследований разрабатывается функционально-логическая схема, которая разделяется на функционально законченные части, затем создаются экспериментальные ПП, на которые монтируются корпуса микросхем и других электронных компонентов, после чего проверяется работоспособность каждой схемы и все необходимые параметры. По результатам проверки схемы исправляются, если это необходимо, совершенствуются или просто изменяются. Снова создаются экспериментальные платы и т. д. После этого разрабатываются промежуточные варианты конструкций ПП. Затем печатные платы объединяются и вновь – проверка, контроль, до тех пор, пока все параметры будут согласованы и вся схемотехническая часть ЭВМ будет работать стабильно и надежно.

Весь этот процесс протекает не стихийно, он нормализован и отражен в Государственных стандартах, которые устанавливают

следующие этапы (стадии) разработки конструкторской документации на ЭВМ:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- разработку рабочей документации.

Техническое задание – устанавливает основное назначение, тактико-технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предъявляемые к разрабатываемому изделию.

Техническое предложение – совокупность конструкторских документов, содержащих техническое и технико-экономическое обоснование целесообразности разработки изделия (на основании анализа технического задания заказчика и различных вариантов возможной реализации изделия, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов).

Эскизный проект – совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе действия изделия, а также данные, определяющие назначение и основные параметры разрабатываемого изделия.

Технический проект – совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.

Разработка рабочей документации – совокупность конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) изделия.

Первые три этапа относятся к стадии НИР. Этапы – технический проект и разработка рабочей документации – относятся к стадии ОКР (иногда сюда включают эскизный проект).

Все этапы, за исключением ТЗ, заканчиваются разработкой совокупности конструкторских документов, которые совместно с ТЗ являются исходными для последующего этапа.

По причине большой трудоемкости процесса конструкторского проектирования с выпуском большого количества конструкторской и технологической документации, а также возможности формализации

некоторых конструкторских задач, таких, как построение чертежей топологии электронных элементов на поверхности и внутри полупроводниковой подложки, а также их соединения в процессе разработки интегральных схем; компоновка элементов конструкции; трассировка ПП; оформление конструкторских чертежей, – именно эти проектные работы были автоматизированы в первую очередь [2].

Для решения конструкторских задач проектирования электронной аппаратуры были разработаны системы автоматизированного проектирования (САПР), которые могут использоваться совместно с системами автоматизированного оформления конструкторской документации. В результате применения информационных технологий конструирования электронной аппаратуры, оформления конструкторской документации сокращаются сроки заключительного этапа проектирования, повышается качество изделия, уменьшается количество ошибок и т. д.

Завершающей стадией ОКР является разработка рабочей документации, в которой создается совокупность конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) изделия.

Разработка этих документов и является конструкторской подготовкой производства, которая включается в техническую подготовку предприятия к освоению нового изделия.

Завершающие этапы научных исследований и опытно-конструкторских работ осуществляются, как правило, в условиях опытного производства.

1.5. Отработка изделия в опытном производстве

Отработка нового изделия в опытном производстве обусловлена необходимостью всесторонней проверки принципиально новых концепций – как физико-химических, схемотехнических, конструкторских, так и технологических [2, 5].

Основная цель опытного производства – промышленно-экономическая аттестация результатов НИР и ОКР, т. е. проверка и оценка жизнеспособности новой разработки.

Основная задача – материализация результатов НИР и ОКР, а также выпуск первых установочных партий образцов новой техники, т. е. уточнение возможности передачи нового изделия в серийное производство.

Понятие «опытное производство» охватывает различные производственные подразделения: экспериментальные цеха серийных и

массовых заводов; экспериментальные (но не лабораторные) производства при НИИ; предприятия индивидуального типа, временно используемые для отработки и апробации новых идей; экспериментальные участки для отладки новых технологических процессов (ТХП); цеха серийных заводов, используемые для создания опытных серий новой продукции; предприятия, созданные специально для отработки и выпуска новой продукции.

Необходимыми критериями оценки работы опытного производства можно считать качество выпускаемой технической документации и сроки освоения изделий в условиях серийного производства. Решить эффективно поставленные задачи опытное производство может только при условии максимального приближения степени проработки технологических процессов к нормам и принципам, принятым в серийном производстве.

1.6. Технологическая подготовка производства

На основании конструкторской документации выполняется технологическая подготовка производства. ТПП в общем виде – совокупность процессов для обеспечения технологической готовности предприятий к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных затратах, сроках и объеме выпуска.

ТПП изделий электронной техники начинается на стадии НИОКР при выборе технологического варианта реализации схмотехнического решения, а продолжается при подготовке производства к выпуску установочной партии и промышленному освоению выпуска ЭВА.

Основными задачами, решаемыми в процессе ТПП, являются обеспечение технологичности схмотехнического и конструкторского решений; изготовление средств технологического оснащения (в случае необходимости); организация реализации технологических процессов в производстве; организация технологического сопровождения изделий ЭВА в производстве.

Технологическая подготовка производства ЭВМ включает:

- разработку технологических маршрутных и операционных карт на детали (элементы), сборочные единицы (ячейки, блоки);
- планирование выхода продукции и оценка технологических потерь производства;
- разработку и корректировку технологических процессов изготовления электронных изделий, норм расхода материалов комплектующих изделий;
- расчет трудоемкости изготовления изделий;

- определение рационального уровня унификации разрабатываемого изделия;
- разработку мероприятий по технологическому оснащению производства;
- типизацию и совершенствование базовых технологических процессов;
- определение показателей технологичности разрабатываемых изделий;
- изготовление установочной партии изделий и сдачу темы комиссии;
- создание нормативной базы и технико-экономической документации на изделие для промышленного освоения производства новой продукции и последующего серийного выпуска.

Вся совокупность выполняемых при ТПП работ и мероприятий должна соответствовать Единой системе технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Основная цель ЕСТПП – обеспечить в минимальные сроки и при минимальных трудовых и материальных затратах полную готовность производства любого типа (единичного, серийного, массового) к выпуску изделий заданного качества [6].

С этой целью она основывается на использовании современных эффективных систем стандартов, к которым относятся:

- Единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- Единая система технологической документации (ЕСТД);
- Единая система классификации и кодирования технико-экономической информации (ЕСКК);
- Единая система программной документации (ЕСПД);
- Система стандартных средств технологического оснащения, в том числе оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов и инженерно-технических работ;
- Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ);
- Система стандартов безопасности труда и др.

Реализация ЕСТПП предполагает наличие развитой информационной базы.

Самым сложным и трудоемким процессом при технологической подготовке предприятия является освоение новых технологий, связанных с большим количеством мероприятий, привлечением специалистов соответствующей квалификации, приобретением,

монтажом и настройкой оборудования, оформлением соответствующей документации и т. п.

1.7. Организационная подготовка производства

Организационная подготовка производства при промышленном освоении изделия предусматривает ускоренное проведение всех видов работ [2].

Организация процессов создания новых видов продукции охватывает проектирование, осуществление на практике и совершенствование системы подготовки производства. Система подготовки производства - это объективно существующий комплекс материальных объектов, коллективов людей и совокупность процессов научного, технического, производственного и экономического характера для разработки и организации выпуска новой или усовершенствованной продукции.

Организация подготовки производства выражается в следующих видах деятельности:

- определение цели организации и ее ориентация на достижение этой цели;
- установление перечня всех работ, которые должны быть выполнены для достижения поставленной цели по созданию конкретных видов новой продукции;
- создание или усовершенствование организационной структуры системы подготовки производства на предприятии;
- закрепление каждой работы за соответствующим подразделением (отделом, группой, цехом и т. п.) предприятия;
- организация работ по созданию новых видов продукции во времени;
- обеспечение рациональной организации труда работников и необходимых условий для осуществления) всего комплекса работ по подготовке производства к выпуску новой продукции;
- установление экономических отношений между участниками процесса создания новой техники.

Принципы организации подготовки производства [2]:

- принцип комплексности предполагает необходимость проведения работ по подготовке производства по единому плану, охватывающему все процессы – от научных исследований до освоения новой техники, учитывающему возникающие при этом проблемы;
- принцип специализации требует, чтобы за каждым подразделением предприятия закрепились такие виды деятельности по

созданию и освоению новой техники, которые отвечают характеру специализации этих подразделений;

- принцип научно-технической и производственной интеграции – это совокупность условий, обеспечивающих достижение единой и общей цели в результате деятельности определенного множества специализированных подразделений и исполнителей;

- принцип комплектности документации и составных частей изделий требует одновременного выполнения комплекса работ к моменту, когда дальнейшее их продолжение возможно только при наличии полного комплекта документации или составных частей изделий;

- принцип непрерывности работ по созданию новой продукции требует ликвидации значительных перерывов во времени между фазами процесса подготовки, а внутри их между стадиями, работами, операциями;

- принцип пропорциональности рассматривается как требование задействовать производственные возможности всех подразделений объединения или предприятий, занятых подготовкой производства;

- принцип параллельности выражается в совмещении во времени различных фаз, стадий, работ.

Система подготовки производства предполагает обеспечение строгой последовательности работ и прямооточности. Этот принцип требует, чтобы разработка и освоение новой продукции осуществлялись с присущей только этому виду последовательностью работ. Прямоточность – это кратчайший маршрут движения технической документации и наименьший путь, проходимый новым изделием по всем стадиям его разработки и освоения.

Под производственной структурой предприятия понимается состав цехов и служб, а также характер их взаимосвязи. Применительно к предприятию под производственной структурой следует понимать состав его цехов и служб, к цеху – состав участков.

Производственная структура предприятия должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- обеспечение наилучшей специализации цехов и участков;
- недопущение дублирующих и чрезмерно раздробленных мелких подразделений;
- обеспечение прямооточности производства;
- соблюдение правильных пропорций между основными цехами, с одной стороны, и вспомогательными цехами и обслуживающими хозяйствами, с другой, а также возможности

расширения предприятия без существенных нарушений хода производства.

Необходимо стремиться к максимальному упрощению производственной структуры как предприятия в целом, так и его структурных подразделений.

Основной структурной единицей предприятия является цех, представляющий собой организационно и технически обособленное звено предприятия, выполняющее определенную часть производственного процесса, либо изготавливающее какой – либо вид продукции.

Состав и количество цехов, их взаимосвязь определяют структуру предприятия. Первичным структурным звеном участка и первичным структурным элементом цеха является рабочее место.

Рабочим местом называется элементарная единица структуры предприятия, где размещены исполнители работы, обслуживаемое технологическое оборудование, часть конвейера, оснастка и предметы труда на ограниченное время. На рабочем месте может работать один рабочий или группа рабочих.

Группа рабочих мест, организованных по принципу специализации: предметному, технологическому или предметно – технологическому, образует производственный участок. На предприятиях совокупность нескольких производственных участков образует цех. Организационное построение и техническое оснащение цехов и служб на предприятиях зависит от степени их специализации, от объема выпуска продукции. Чем более предприятие специализировано, тем больше возможностей для создания узкоспециализированных цехов и участков, что способствует применению передовой технологии, механизации и автоматизации производства [2].

1.8. Промышленное освоение изделия

Организация промышленного производства новой продукции, например, вычислительной машины, – это, с одной стороны, объективно необходимое условие удовлетворения всевозрастающих требований пользователя СВТ, а с другой – источник появления значительных производственных трудностей, связанных с решением ряда сложных проблем, возникающих в процессе освоения [2].

Основными из таких проблем являются:

- освоение продукции с более высокими техническими параметрами и лучшими технико-экономическими показателями, чем у изделий, снимаемых с производства;
- возмещение повышенных затрат производства в период освоения для обеспечения рентабельности работы предприятия;
- расширение областей применения новой продукции;
- подготовка и обеспечение будущего производства работниками соответствующей квалификации;
- организация системы кооперирования и материально-технического снабжения производства новой продукции;
- совершенствование организации разработки и производства специального (нестандартизированного) оборудования и технологической оснастки.

Находясь на стыке сфер науки, техники и производства, процесс освоения обладает двойственным характером. На этой стадии реализуются, с одной стороны, функции исследования и разработки (в процессе отработки конструкции изделия и технологии его изготовления), с другой – непосредственно производственные функции (при развертывании выпуска новых изделий).

Процесс освоения оказывает значительное влияние на все экономические показатели предприятия в связи с повышенными в период освоения затратами труда, основных фондов и оборотных средств производства.

Задачами освоения следует считать:

- быстроту достижения запланированных технико-экономических показателей, в том числе трудоемкости, материалоемкости и себестоимости изделий;
- уменьшение удельных единовременных затрат на реализацию процесса освоения по сравнению с результатами предыдущих освоений;
- достижение заданной стабильности воспроизведения технологического процесса изготовления нового изделия, обеспечивающей планируемый выход конечной продукции с меньшими затратами;
- сокращение сроков освоения.

Динамика изменения соответствующих характеристик производства в период освоения до заданных величин зависит в первую очередь от качества разработанной конструкторско-технологической документации, организационно-технического уровня предприятия, степени подготовленности производства к развертыванию выпуска новых изделий.

Следует различать два вида освоения выпуска новой продукции. Первый вид – освоение изготовления опытных образцов нового изделия (опытное освоение), которое является завершающей фазой НИР и ОКР и заканчивается выпуском установочной или опытной партии новых изделий. Второй вид – освоение промышленного выпуска новой продукции (промышленное освоение). Промышленное освоение заключается в последовательном развертывании серийного выпуска новой продукции до заданной проектной мощности.

При организации подготовки производства к выпуску новых изделий следует учитывать особенности отрасли, где происходит промышленное освоение выпуска новой продукции, и тип изделия. Например, для предприятий электронной промышленности, выпускающих микросхемы и другие комплектующие ЭВМ, радиоэлектронные компоненты (РЭК), такими особенностями являются:

- непрерывный рост номенклатуры изделий, вызывающий поиск новых технологических решений;
- последовательное повышение уровня интеграции микросхем;
- увеличение числа выполняемых электронным изделием функций и улучшение других технико-экономических показателей;
- многообразие и растущая сложность технологических процессов;
- стохастичность производственного процесса, что обуславливает наличие технологических потерь;
- постоянно растущие требования к чистоте и свойствам исходных полупроводниковых материалов;
- высокие темпы обновления технологического оборудования, контрольно-измерительных и испытательных комплексов;
- многообразие видов технологической оснастки и другие особенности.

Таким образом, при системном рассмотрении процесса создания и освоения нового электронного изделия (микропроцессора, электронного прибора, ЭВМ) можно констатировать, что трудоемкость и экономические затраты на стадии промышленного освоения значительно превосходят стадии НИР и ОКР [2].

2. ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВТ

В данном разделе рассматриваются общие вопросы и принципы создания ЭВМ, уточняется, на каких этапах принимаются решения, связанные с проблемами конструирования и технологической подготовки предприятия к изготовлению и выпуску нового изделия – ЭВМ [2].

Объектом проектирования могут быть как универсальные, так и специализированные цифровые электронные устройства различной степени сложности: универсальные ЭВМ, встраиваемые ЭВМ, электронные цифровые приборы и т. п.

Проектирование выполняется в соответствии с ТЗ, в котором указываются назначение и условия работы цифрового устройства (или системы), а также выполняемые им функции. Здесь же оговариваются основные технические и эксплуатационные параметры и характеристики, элементная база, надежность, точность, масса, потребляемая мощность и т. д. Условия работы определяются характеристиками среды, в которой должно работать электронное цифровое устройство или ЭВМ, при этом указываются диапазоны температур окружающей среды, данные о вибрациях, перегрузках, влажности и прочих воздействиях. Исходя из соображений экономической эффективности, в техническом задании могут быть наложены ограничения на стоимость проектируемого изделия и величину эксплуатационных расходов [7].

Принципы построения проектируемой ЭВМ и других электронных цифровых устройств в настоящее время определяются в первую очередь технологической базой, например, уровнем развития технологии производства интегральных схем или печатных плат и технологии их сборки, определяющим большинство структурных решений, а также надежность изделия. Часто выполнение требований ТЗ приводит к необходимости разработки новых элементов или модулей, технологических приемов и процессов производства. Однако производственная база часто накладывает ограничения на использование дефицитных изделий, материалов, комплектующих микросхем и других элементов.

Согласно [7] процесс проектирования сложных цифровых устройств и систем можно рассматривать как задачу синтеза, в которой на определенной технологической базе требуется построить объект, реализующий заданный класс функций.

2.1. Этапы проектирования ЭВМ

ЭВМ как объект проектирования представляет сложное техническое изделие, объединяющее электронные, электромеханические и механические элементы, детали и узлы. Жизненный цикл изделий электронной техники показан на рис. 2.1 [2].

Как отмечалось ранее, конструкционное построение ЭВМ обладает особенностями, отличающими это изделие от других машиностроительных конструкций, что находит отражение в процессе проектирования электронной вычислительной машины.

Например, проектирование ЭВМ начинается с разработки структурных, функционально-логических и принципиально-электрических схем, в которые закладывается функциональная сущность работы ЭВМ разработчиками-схемотехниками.

Основная же цель конструктора – создать надлежащие условия надежного функционирования этих схем в разрабатываемой им конструкции.

Сложный итерационный процесс проектирования ЭВМ осуществляется в определенной последовательности, в которой находят отражение вышеупомянутые особенности.

В зависимости от степени абстрагирования, в данном случае от степени отражения той или иной сущности процессов проектирования, можно по-разному представить эту последовательность через этапы проектирования. В табл. 1.1 рассматриваются всего 3 укрупненных этапа создания ЭВМ. В ЕСКД весь процесс проектирования рассматривается через этапы разработки конструкторской документации для производства и эксплуатации ЭВМ.

Если рассматривать проектирование с позиций решения множества конкретных задач в их логической последовательности, то весь этот трудоемкий процесс можно условно разбить на следующие этапы [2, 7]:

- внешнее проектирование;
- операционное проектирование;
- логическое проектирование;
- техническое проектирование;
- технологическую подготовку производств.

Рассматривая указанную последовательность, можно установить, на каких этапах решаются конструкторские и технологические задачи, как взаимосвязаны эти задачи со схемотехническими.

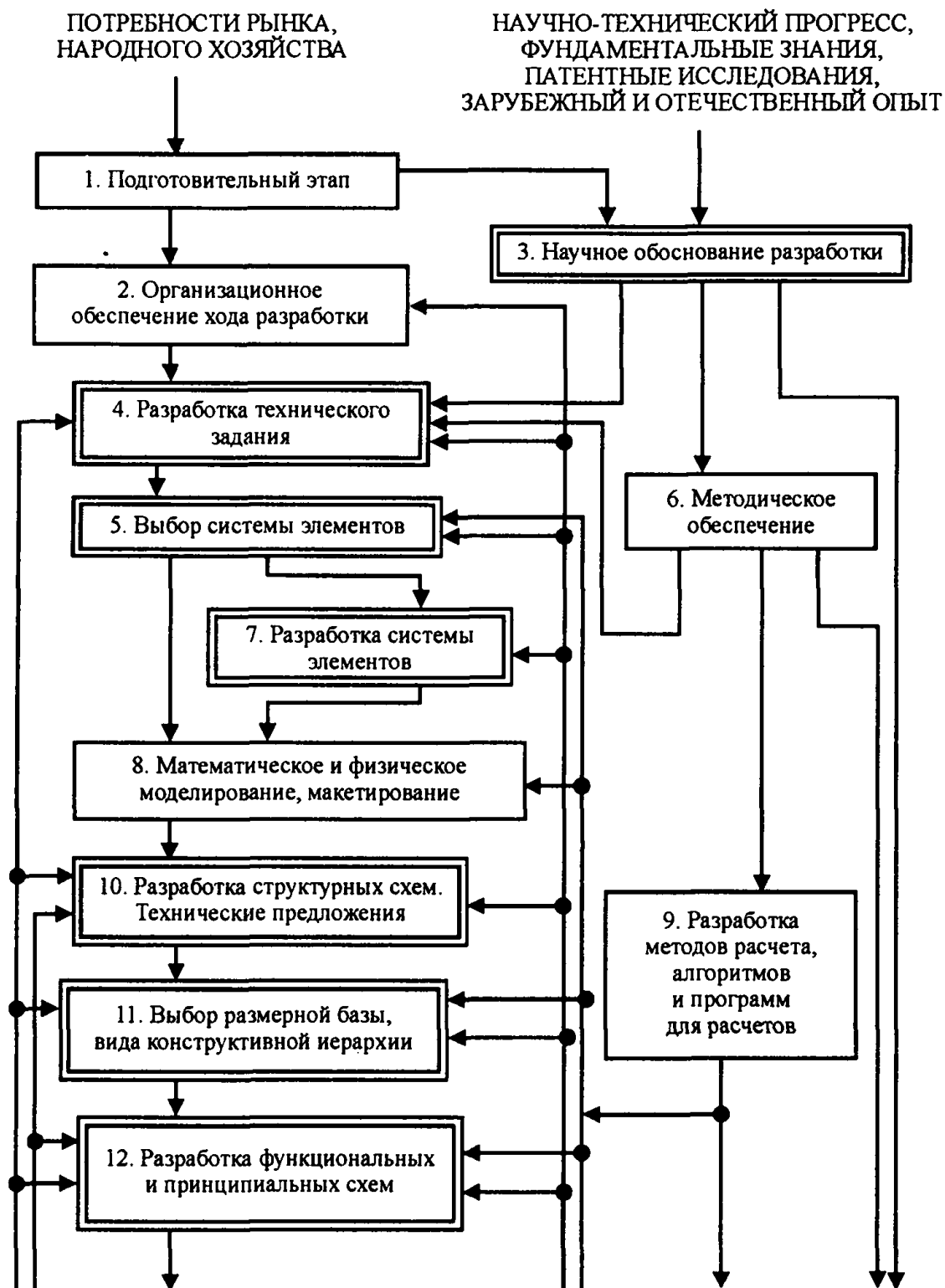


Рис. 2.1. Этапы жизненного цикла ЭВА (начало)

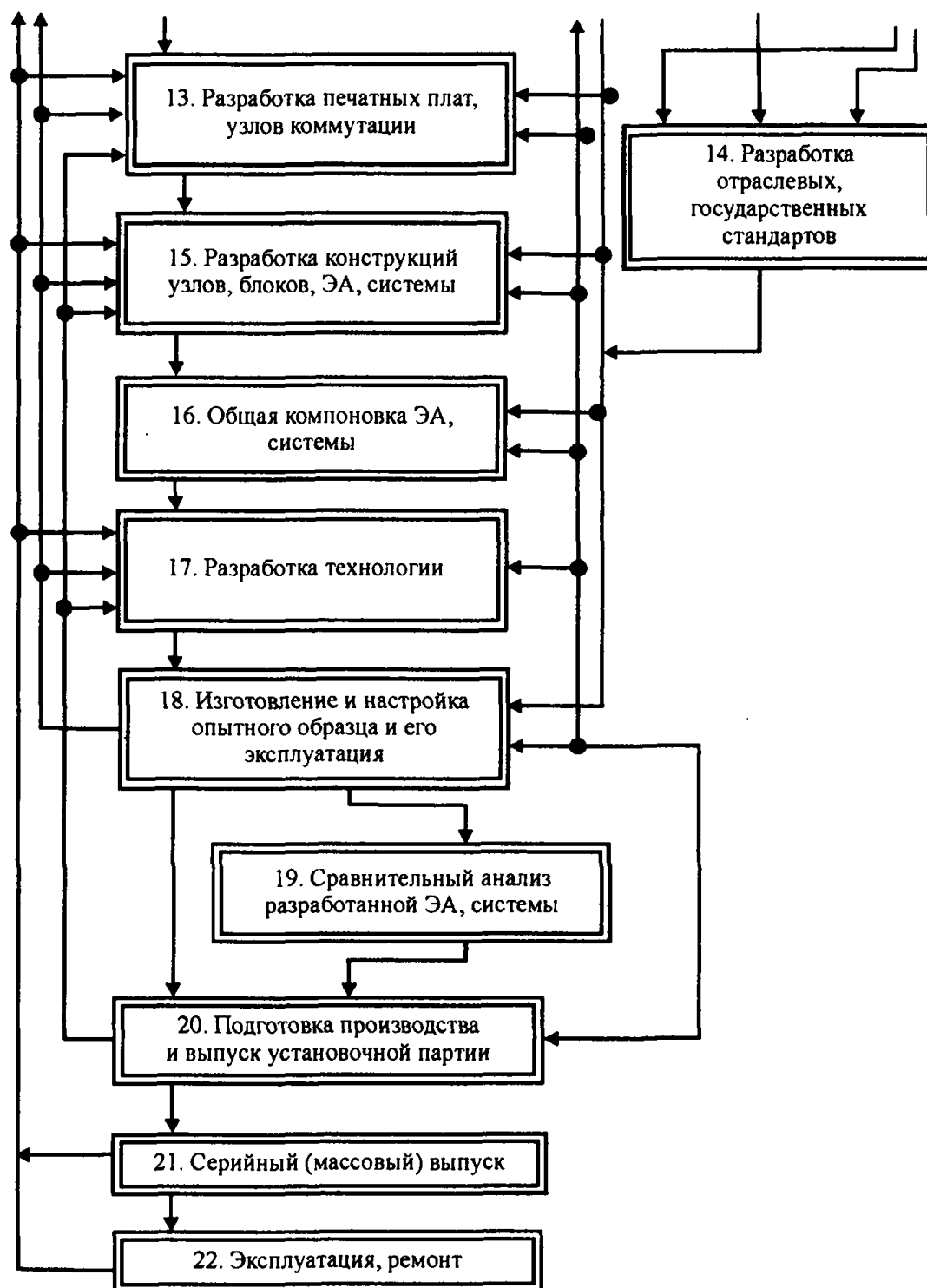


Рис. 2.1. Этапы жизненного цикла ЭВА (окончание)

С момента появления заказа или новой идеи на разработку ЭВМ, выполняющую определенные функции в определенных условиях,

необходимо ответить на многие вопросы, чтобы составить документ «Техническое задание», а затем наметить пути его реализации.

Один из главных вопросов – возможно ли реализовать ЭВМ с учетом новых требований на базе имеющихся технологий, уровня производства, подготовленности кадров. Есть еще много вопросов, связанных с архитектурой машины, надежностью, экономической целесообразностью и т. п.

Поиск ответов на эти вопросы осуществляется на этапе внешнего проектирования.

Внешнее проектирование – это проектирование, при котором важно выявить свойства цифровой системы (ЭВМ), исходя из внешних по отношению к ней требований.

На основе изучения заказа на разработку всесторонне рассматривается основная идея, на базе которой должна быть создана новая вычислительная машина, определяются наиболее существенные решения в области схем, конструкции и математического обеспечения, которые должны быть отражены в разрабатываемом проекте в зависимости от требований.

Необходимо определить, к какому типу будет относиться новая ЭВМ: универсальная общего назначения, специализированная, встраиваемая микроЭВМ, персональный компьютер и т. д.

Кроме этого, на этапе внешнего проектирования решаются следующие основные задачи:

- определяется принцип организации ЭВМ – модульный или моносхемный, иерархия – функциональная и конструкторская;
- уточняются функции, возлагаемые на систему, а также распределение этих функций по техническим, программным и микропрограммным средствам;
- выбираются критерии для оценки эффективности проекта;
- определяется элементная база, на которую могут ориентироваться разработчики;
- выясняется наличие технологий изготовления ЭВМ и если их нет, то насколько реально разработать новые технологии.

На стадии внешнего проектирования намечаются основные направления схемного и конструкторского проектирования, а также разработка математического обеспечения.

На основе анализа результатов составляется окончательный вариант технического задания, который оформляется в соответствии с требованиями, установленными ГОСТ 25123-82 («ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ. Порядок построения, изложения и оформления»).

Операционное проектирование – это проектирование, целью которого является определение:

- системы команд, форматов и способов кодирования данных;
- алгоритмов выполнения операций в цифровой системе;
- структуры системы на базе операционных алгоритмов.

На этапе операционного проектирования определяются операционные возможности ЭВМ. Выбор основывается на анализе класса алгоритмов, которые должны реализовываться цифровой системой. Иными словами, определяются алгоритмы работы схем, предназначенных для выполнения арифметических, логических и др. функций.

Логическое проектирование – это проектирование, целью которого является определение структуры и порядка функционирования цифровой вычислительной машины на уровне логических схем.

Техническое проектирование – это проектирование, которое заключается в разбиении цифровой системы на функционально-законченные модули, блоки, агрегаты, т. е. приведение в соответствие функциональной и конструкторской иерархии (соподчинения). На этапе технического проектирования разрабатывается техническая документация, решаются вопросы компоновки, размещения, трассировки и крепления элементов конструкции ЭВМ. На этом этапе определяется технология изготовления иерархических модулей конструкции ЭВМ. Например, определяется технология изготовления печатных плат, технология их сборки, технология объединения печатных плат между собой и т. д.

Технологическая подготовка – это этап проектирования, который осуществляется на основе технической документации. Эта документация оформляется в соответствии с ЕСКД и ЕСТД. На этом этапе проектируются технологические процессы (не путать с разработкой), т. е. определяется, на каком рабочем месте и с помощью каких инструментов и оборудования специалисты конкретной квалификации будут выполнять технологические операции по изготовлению деталей, сборке и настройке модулей, блоков и опытного образца ЭВМ. На этом же этапе проектируются, изготавливаются и испытываются нестандартные инструменты, приспособления, оборудование, т. е. осуществляется подготовка предприятия к освоению нового изделия – ЭВМ.

Таким образом, вопросы конструкторского проектирования решаются в основном на этапе технического проектирования, хотя основное направление, по которому осуществляется конструирование

ЭВМ, выбирается значительно раньше, еще на этапе внешнего проектирования.

2.2. Документация

Конструкторские документы (КД) – это графические и текстовые документы, в отдельности или в совокупности определяющие состав и устройство изделия и содержащие необходимые данные для его разработки и изготовления, контроля, приемки, эксплуатации, ремонта, утилизации [2, 8].

К графическим конструкторским документам относятся:

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

сборочный чертеж – изображение сборочных единиц и другие детали, необходимые для сборки и контроля;

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

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;

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

Чертежом называют контурное изображение детали или изделия в натуральную величину или в масштабе. На чертежах соблюдаются все пропорции в размерах отдельных элементов и расстояниях между ними, а также указываются размеры. Не следует путать чертежи со схемами.

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 разрешений применения покупных изделий – перечень покупных изделий, разрешенных к применению по ГОСТу;

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, например, расчет размерных цепей, расчет на прочность, расчет теплового режима и др.;

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.

2.2.1. Схемная документация

В общем объеме КД, выпускаемой в процессе разработки изделий, в том числе ЭВА, существенное место занимает схемная документация [8–10].

Схема – графический конструкторский документ, на которой в виде условных изображений или обозначений показаны составные части изделия и связи между ними.

Схемы применяют при изучении принципа действия механизма, прибора, аппарата при их изготовлении, наладке и ремонте, 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.

По виду элементов, входящих в состав изделия, связей между ними и назначения схемы подразделяют на виды и типы (табл. 2.1). В соответствии с обозначениями, приведенными в таблице, устанавливается код схемы. Так, схема ЭЗ – схема электрическая принципиальная, схема К2 – схема кинематическая функциональная и т. д.

Таблица 2.1

Виды и типы схем

Виды схем		Типы схем	
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Электрические	Э	Структурные	1
Гидравлические	Г	Функциональные	2
Пневматические	П	Принципиальные	3
Газовые	Х	Соединений (мон- тажные)	4
Кинематические	К	Подключения	5
Вакуумные	В	Общие	6
Оптические	Р	Расположения	7
Энергетические	Л	Объединенные	0
Комбинированные	С		

Составляющими частями схем являются:

элемент схемы – составная часть схемы, которая 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 др.

При проектировании ЭВА используются следующие виды схем:

структурные схемы (Э1), определяющие основной состав ЭВА и ее функциональные части, их назначение и взаимосвязи. Их разрабатывают на начальных стадиях проектирования ЭВА, используют как для разработки схем других типов, так и для общего ознакомления с ЭВА;

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

принципиальные схемы (Э3), определяющие полный состав элементов и связей между ними и дающие полное представление о принципе работы отдельных узлов и устройств ЭВА. Эти схемы являются основой для разработки полного комплекта конструкторской документации на ЭВА;

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

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

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

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

При проектировании схем любых видов необходимо придерживаться правил, изложенных в соответствующих стандартах. Так, для схем цифровой техники схемы электрические выполняются по правилам, установленным Государственными стандартами с использованием условных графических обозначений (УГО) [9].

2.2.2. Правила выполнения электрических схем

Схема электрическая структурная. На схеме электрической структурной (Э1) показывают все функциональные части ЭВМ и основные взаимосвязи между ними [10].

Функциональные части можно изображать условно *графически*, как указано в ГОСТе, или в виде *прямоугольников*. В последнем случае внутри прямоугольника приводят *наименование* данной функциональной части. Линии взаимосвязей рекомендуется обозначать *стрелками*, показывающими направления хода процесса, движения информации и т.

п. При большом числе функциональных частей рекомендуется взамен обозначений, наименований и типов вводить **порядковые номера**, проставляя их слева направо и сверху вниз. В этом случае расшифровку номеров производят в **таблице**, помещаемой над основной надписью.

Построение структурной схемы поясняется примером схемы электрической структурной ЭВМ (рис. 2.2, где Пр – процессор; ОП – оперативная память; МП – местная память; ПП – постоянная память; У – управление; К – каналы, УВВ – устройство ввода-вывода) [9].

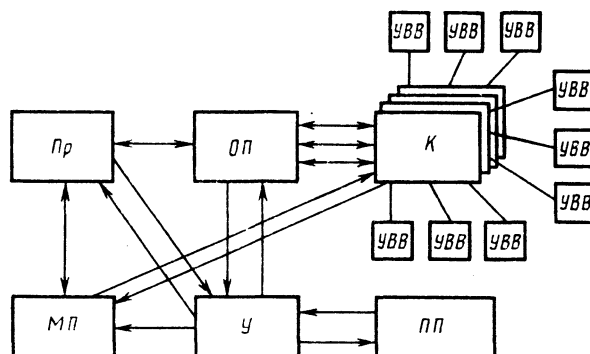


Рис. 2.2. Пример построения структурной схемы ЭВМ

Схема электрическая функциональная. На схеме электрической функциональной (Э2) показывают функциональные части машины, участвующие в процессе, иллюстрируемом схемой, и связи между этими частями [10].

Функциональные части изображают, как правило, в виде **условных графических обозначений**, однако допускается применение **прямоугольников**.

На схеме Э2 должны быть указаны:

для каждой **функциональной группы** – наименование;

для каждого **устройства**, изображенного **прямоугольником**, – наименование, обозначение или тип;

для каждого устройства, изображенного в виде **условного графического обозначения**, – обозначение или тип;

для каждого **элемента** – позиционное обозначение, присвоенное ему на принципиальной схеме, или тип. Наименования, обозначения или типы рекомендуется вписывать в прямоугольники. Допускается на схеме помещать поясняющие надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность прохождения процессов во времени, а также указывать параметры в характерных точках (форма и величина импульсов, реализуемая логическая функция и т. д.).

Построение функциональной схемы поясняется примером на рис. 2.3 [10].

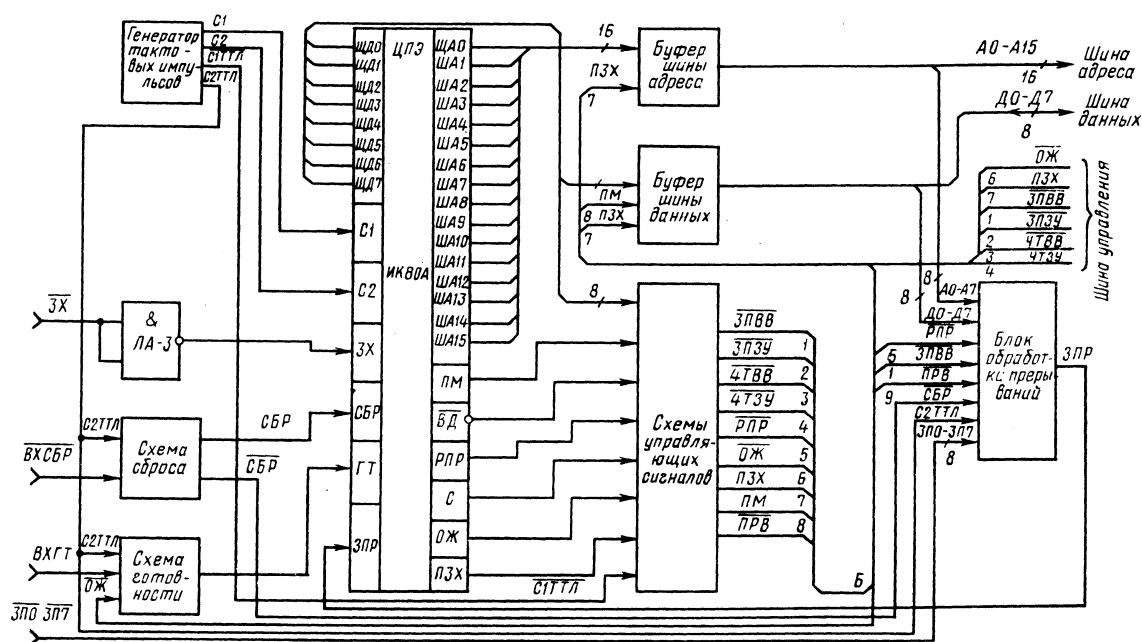


Рис. 2.3. Функциональная схема процессорного блока микро-ЭВМ (МПК БИС серии К580)

Схема электрическая принципиальная. На схеме электрической принципиальной (ЭЗ) указывают все элементы, необходимые для построения ЭВМ (или ее отдельного узла), связи между элементами и элементы, которыми заканчиваются входные и выходные цепи [10].

Элементы в схеме изображают в виде условных графических обозначений. Расстояние между двумя соседними линиями условных графических обозначений должно быть не менее 0,8 мм.

Условные графические обозначения на схеме ЭЗ располагают так, чтобы изображения связей между ними были кратчайшими линиями с минимальным числом пересечений. Линии связей должны быть показаны полностью, однако при необходимости их допускается обрывать, заканчивая места обрыва стрелками с обозначением места включения. Для упрощения чертежа схемы можно несколько электрически не связанных линий связи сливать в общую утолщенную линию, но при подходе к контактам каждая линия должна быть изображена отдельно, линии связи при этом необходимо пронумеровать одинаковыми числами на обоих концах (рис. 2.4) [10].

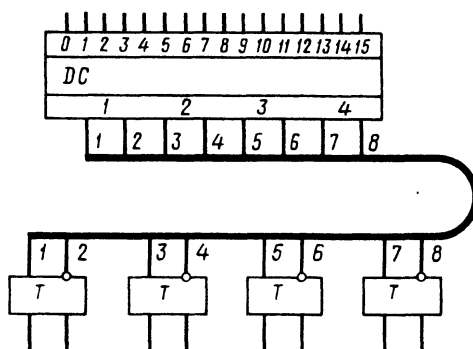


Рис. 2.4. Объединение электрически не связанных линий связи в схеме

Каждый элемент, входящий в схему, должен иметь буквенно-цифровое позиционное обозначение, составленное из буквенного индекса и порядкового номера. Порядковые номера элементам присваивают, начиная с единицы сверху вниз в направлении слева направо, в пределах группы элементов, которым на схеме дан одинаковый буквенный индекс.

Если элемент состоит из нескольких частей, то допускается к его позиционному обозначению добавлять цифры, присваиваемые каждой части элемента (например, Э7-1, Э7-2, Э7-3 означают первую, вторую и третью части элемента 7).

Данные о всех элементах, включенных в схему, должны быть записаны в перечень (связь перечня с условными графическими обозначениями элементов осуществляется через позиционные обозначения). В отдельных случаях допускается сведения об элементах располагать на схеме около условных графических обозначений [10].

2.3. Модульный принцип конструирования СВТ

В процессе развития электронной вычислительной техники сформировались принципы конструирования. Из них можно выделить два основных: **моносхемный** и **модульный**. Иначе их еще называют **одноуровневый** и **многоуровневый** [2].

Моносхемный принцип конструирования. Принципиальная схема ЭВМ реализуется на одной плате или на одной подложке. Работоспособность ЭВМ можно обеспечить введением аппаратурной и информационной избыточности.

Этот принцип используется при конструировании ЭВМ средней и невысокой сложности (микроЭВМ, встраиваемые ЭВМ). Достоинства – обеспечение высокой надежности (интегральные схемы, незначительное количество внешних связей) и быстродействия из-за малой задержки сигналов в линиях связи.

По мере повышения степени интеграции микросхем, совершенствования технологии и методов проектирования наблюдается тенденция к моносхемному принципу конструирования.

Модульный принцип конструирования. В основном применяется при решении конструкторских задач проектирования ЭВМ высшего класса.

К ним относятся суперЭВМ, большие ЭВМ (мэйнфреймы), многопользовательские малые ЭВМ (миниЭВМ). Также можно отнести и универсальные многопользовательские микроЭВМ, рабочие станции – однопользовательские специализированные микроЭВМ с развитой периферией и др.

Конструктивно такие ЭВМ состоят из набора **типовых сборочных единиц** (типовых элементов конструкции) разного уровня сложности, иначе их еще называют **модулями**.

Под модулем, или типовым элементом конструкции, понимается любая сборочная единица ЭВМ, которая по конструкторскому оформлению и технологии производства является самостоятельной и имеет стандартные средства электрического и механического сопряжения.

Таким образом, модуль – это законченная часть конструкции ЭВМ, которую можно отдельно изготовить и собрать.

Модульный принцип конструирования позволяет организовать производство типовых элементов конструкции по независимым циклам, т. е. обеспечить распараллеливание и специализацию их производства (хорошо отлаженные технологические процессы, достичь высокого уровня квалификации на конкретных рабочих местах и т. д.).

Разбиение ЭВМ на модули идет по двум направлениям: *конструкторско-технологическому* и *схемному*.

При первом (конструкторско-технологическом) направлении построение конструкции ЭВМ осуществляется из типовых сборочных единиц. Это обеспечивает высокую унификацию и стандартизацию.

В схемном направлении используется **функционально-узловой метод** конструирования ЭВМ. При этом вся электрическая схема разбивается на функционально-законченные части разной степени сложности. Здесь также необходимо учитывать требования высокой схемной унификации с использованием типовых сборочных единиц.

Совместное использование вышеуказанных направлений обеспечивает конструкторскую и функциональную независимость модулей – типовых сборочных единиц, что позволяет не только отдельно разработать конструкцию, изготовить и собрать модуль, но также настроить и проконтролировать его работу.

Кроме вышеуказанных достоинств, модульный принцип в сочетании с функционально-узловым методом позволяет сократить сроки проектирования, время на изготовление модулей и сборки ЭВМ в целом, снизить стоимость проектирования, производства и эксплуатации, автоматизировать и механизировать процессы изготовления и сборки.

2.4. Иерархическое построение конструкции ЭВМ

Американский ученый Г. Саймон, анализируя сложные системы в различных областях окружающего мира, приходит к выводу, что характерным свойством сложных систем является их иерархическая организация [11].

Иерархия – это соподчинение. Иерархическая структура любой сложной системы – это такая структура, в которой осуществляется соподчинение между различными уровнями иерархии, т. е. когда элементы более низкого уровня иерархии входят в состав более высокого уровня и их работа организуется на этом высоком уровне. Таким образом, осуществляется взаимодействие элементов низкого уровня между собой под управлением элементов высокого уровня.

Далее рассмотрим структурную иерархию ЭВМ, в которой можно выделить **функциональную** и **конструкторскую** иерархии.

2.4.1. Связь конструкторской и функциональной иерархии

Под функциональной иерархией построения ЭВМ подразумевается выделение иерархических уровней ее функционально-логических и принципиально-электрических схем [2].

С точки зрения функциональной иерархии ЭВМ может быть представлена как система с 4 уровнями (рис. 2.5).

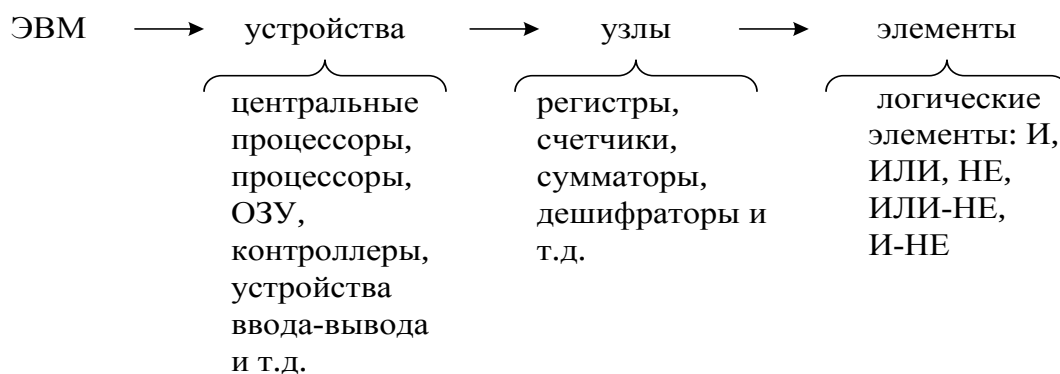


Рис. 2.5. Уровни функциональной иерархии

При рассмотрении функциональной иерархии ЭВМ за низший уровень абстракции выбраны элементы, выполняющие простейшие логические функции и элементы, поддерживающие выполнение этих функций.

Под конструкторской иерархией построения ЭВМ подразумевается выделение иерархических модулей ее конструкции, например, в пяти уровнях (рис. 2.6).

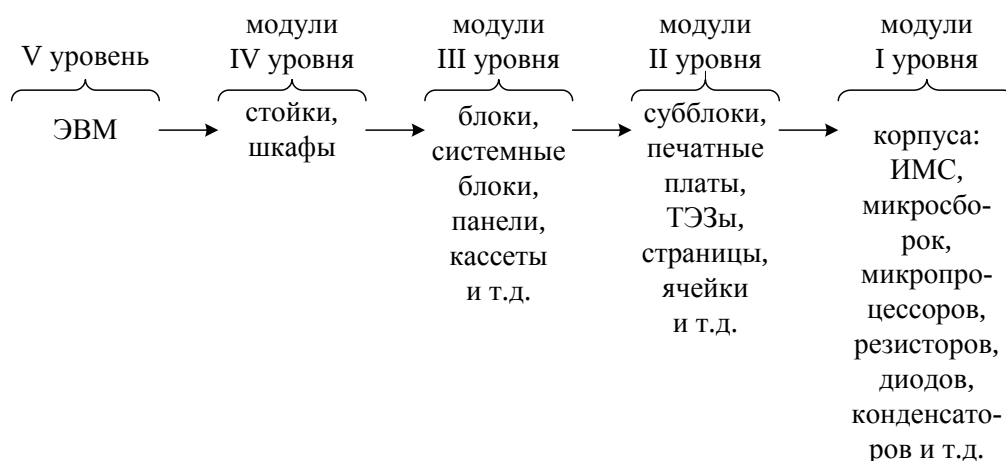


Рис. 2.6. Уровни конструкторской иерархии

Объединение модулей можно представить следующим образом: корпус микросхемы размещается на печатной плате, ПП размещается в блоке, блок размещается в стойке, несколько стоек объединяются в ЭВМ.

Для грамотного, оптимального решения конструкторской задачи необходимо учитывать функциональную иерархию ЭВМ.

Сущность решения проектной задачи заключается в том, что функционально законченные части схем должны размещаться в конструктивно законченных иерархических модулях конструкции ЭВМ.

После завершения разработки функционально-логической схемы ЭВМ и определения элементной базы решается следующая задача: разделить полученную схему на части таким образом, чтобы они представляли схемы типовых сборочных единиц, т. е. иерархических модулей конструкции ЭВМ.

В процессе решения этой задачи окончательно становится очевидным, сколько и каких модулей будет входить в конструкцию вычислительной машины. Определяется, сколько ПП и какого типоразмера будут входить в блок, сколько блоков и какой конфигурации будут входить в стойку и т. д.

Если учесть возможность функционально-законченной схемы быть отдельно собранной, настроенной и проконтролированной, то смысл задачи – не допустить, чтобы одни элементы схемного узла размещались на одной ПП, а другие элементы этого же узла были размещены на другой ПП.

В противном случае появляются дополнительные длинные линии связи, в которых генерируются помехи, увеличивается количество контактов в разъеме, что снижает надежность работы, усложняются настройка и контроль.

Необходимо учесть, что разъемное соединение является одним из слабых мест любой конструкции ЭВМ. Имеются в виду физические свойства электрического контактирования в разъеме, а также загрязнение и окисление контактов.

Таким образом, можно сделать вывод: желательно, чтобы конструкторская и функциональная иерархии совпадали [2].

2.4.2. Краткая характеристика уровней конструкций ЭВМ

Модуль первого уровня иерархии конструкции ЭВМ. К нему принято относить монолитные интегральные схемы; гибридные интегральные схемы; специальные элементы ЭВМ в модульном и микромодульном исполнении; дискретные радиоэлектронные компоненты – транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы, стабилитроны и т. п.

Основным монтажным элементом первого уровня является «**корпус**» интегральной схемы и РЭК. Он предназначен для защиты микросхем и других элементов от механических и других воздействий, а также электрического и механического объединения между собой на следующем уровне иерархии. Корпус – это несущая конструкция [2].

Более подробная информация об этом и других уровнях будет рассмотрена в других разделах [2].

Модуль второго уровня иерархии. Он имеет несколько названий: **ячейка, плата, субблок, страница** – в книжном варианте конструкции, **типовой элемент замены (ТЭЗ)** – в ЕС ЭВМ и др.

Модулем этого уровня является печатная плата, которая предназначена для установки, электрического и механического объединения модулей первого уровня. Печатная плата, как и другие иерархические уровни, является несущей конструкцией, может изготавливаться по различным технологиям, имеет стандартные типоразмеры.

Модуль третьего уровня. Это сборочная единица, на которой размещают, электрически и механически объединяют между собой модули второго уровня.

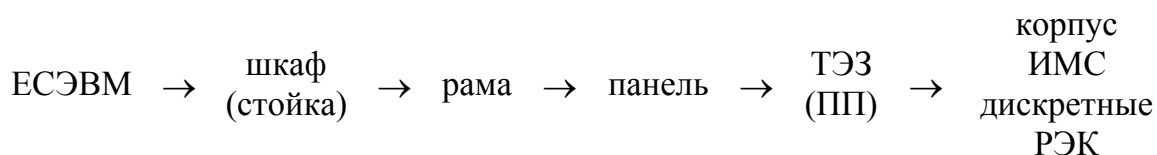
Он также имеет несколько названий: **панель; блок; системный блок** – в IBM PC; **кассета; комплектный блок** – в СМ ЭВМ, **крейт** – в Евромеханике и др. Это несущая конструкция, которая имеет каркасное устройство, включающая в себя основание, на котором размещаются ПП, причем последние объединяются на основании посредством соединителей (разъемов, слотов). Основания панелей и блоков могут быть выполнены в виде ПП как двусторонних, так и многослойных.

Модуль четвертого уровня. Этим модулем может быть **рама**, если иерархия продолжается, а может быть **стойка**, если это последний модуль конструкции, как в СМ ЭВМ (несколько стоек объединяются в ЭВМ). Модуль данного уровня предназначен для электрического и механического объединения модулей третьего уровня и вспомогательных узлов ЭВМ, например, блоков вентиляторов автономной системы воздушного охлаждения или блоков питания. Для изготовления каркаса рам обычно используются металлические нормализованные профили, обладающие достаточной механической прочностью и небольшим весом (чаще всего дюралюминий).

Модуль пятого уровня. Этот модуль имеет название **шкаф**, иногда его также называют **стойкой**, но это не совсем корректно, т. к. конструкция шкафа отличается от конструкции стойки. Шкаф имеет боковые стенки и дверцы с двух противоположных сторон для свободного доступа к рамам, которые размещаются внутри шкафа (от двух до четырех рам). Каркас шкафа изготавливается из стального нормализованного профиля. Несколько шкафов объединяются в ЭВМ.

При создании ЭВМ было разработано много вариантов конструкций ЭВМ. Модули с одинаковым конструкторским назначением имели различные названия.

ЕС ЭВМ имеет 5 уровней конструкции:



Особенностью иерархического построения ЕС ЭВМ является четвертый уровень иерархии – «рама», в которой неподвижно закрепляются 6 панелей (рис. 2.7).

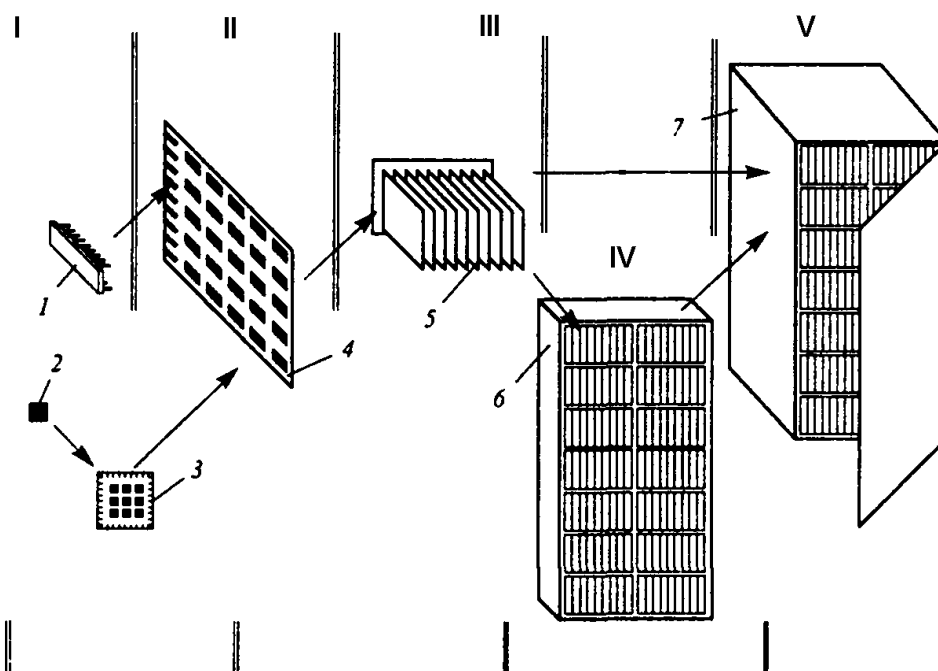
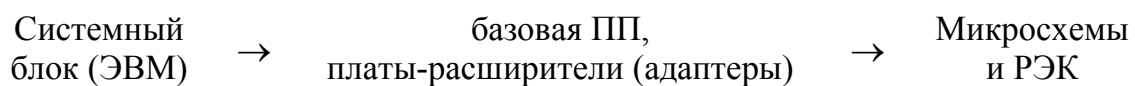


Рис. 2.7. Конструкторская иерархия и входимость модулей:
 1 – микросхема; 2 – бескорпусная микросхема; 3 – микросборка; 4 – типовой элемент замены; 5 – блок; 6 – рама; 7 – шкаф (стойка)

В промышленности применяются такие варианты иерархических построений конструкций ЭВА, которые лучше всего подходят для конкретных требований [11].

Иерархия персонального компьютера или микро-ЭВМ, как правило, содержит 3 уровня (модуля):



Заметим, что число уровней конструктивной иерархии может быть изменено как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения (рис. 2.8) [10].

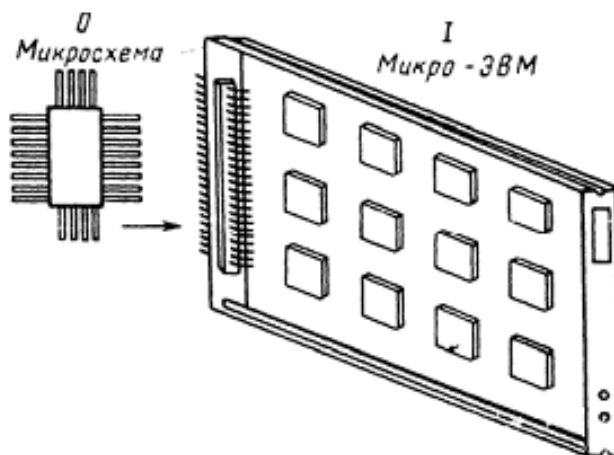


Рис. 2.8 Конструктивная иерархия встраиваемых микро-ЭВМ

Разделение конструкции ЭВМ на уровни позволяет [10]:

1. организовать производство по независимым циклам для каждого структурного уровня;
2. автоматизировать процессы сборки и монтажа;
3. сократить период настройки, так как может быть произведена предварительная настройка отдельных конструктивных единиц порознь;
4. автоматизировать решение задач размещения элементов и трассировки межсоединений;
5. унифицировать стендовую аппаратуру для испытания конструктивных единиц;
6. повысить надежность конструктивных единиц.

2.5. Факторы, влияющие на выбор конструкторского решения

Понятие «**конструкция**» распространяется на материальные объекты, имеющие законченные формы и выполняющие заданные служебные функции в **установленных эксплуатационных условиях** [2, 13].

Условия эксплуатации ЭВА имеют различную физико-химическую природу и изменяются в весьма широких пределах.

Факторы, воздействующие на работоспособность ЭВМ, разделяют на климатические, механические и радиационные [10].

К **климатическим факторам** относят изменение температуры и влажности окружающей среды; тепловой удар; увеличение или уменьшение атмосферного давления; наличие движущихся потоков пыли, песка; присутствие активных веществ в атмосфере; наличие солнечного облучения, грибковых образований (плесень), микроорганизмов, насекомых и грызунов; взрывоопасной и

воспламеняющейся атмосферы, дождя или брызг; присутствие в окружающей среде озона.

К **механическим факторам** относят воздействие вибрации, ударов, линейного ускорения, акустического удара; наличие невесомости.

К **радиационным факторам** относят космическую радиацию; ядерную радиацию от реакторов, атомных двигателей; облучение потоком гамма-фотонов, быстрыми нейтронами, бета-частицами, альфа-частицами, протонами, дейтронами.

Некоторые факторы могут проявлять себя отдельно, независимо от остальных, а некоторые – в совместном действии с другими факторами той или иной группы (например, наличие движущихся потоков песка неизбежно приводит к возникновению вибраций в конструктивных элементах ЭВМ).

Условия эксплуатации и их влияние на работоспособность ЭВМ. Характер и интенсивность воздействия климатических (в меньшей степени), механических и радиационных (в большей степени) факторов зависят от тактики использования и объекта установки ЭВМ. Классифицируя ЭВМ по этому признаку, можно разделить их на три группы: *наземные, морские и бортовые*. Каждая из групп, в свою очередь, включает в себя ЭВМ различных классов и назначения [2, 10].

Наземные ЭВМ. Наземные ЭВМ – ЭВМ стационарные, транспортируемые и устанавливаемые на оружейных площадках, расположенных не в прибрежной зоне.

Стационарные ЭВМ – машины, эксплуатируемые в отапливаемых и неотапливаемых помещениях, бункерах, подвалах, помещениях с повышенной влажностью, на открытом воздухе. По тактико-техническим данным это могут быть большие универсальные или управляющие ЭВМ, машины классов «мини» и «микро», настольные и переносные ЭВМ. Условия эксплуатации (и транспортировки в нерабочем состоянии до места эксплуатации) таких машин характеризуются весьма широким диапазоном рабочих и предельных температур.

Транспортируемые ЭВМ – ЭВМ, устанавливаемые и эксплуатируемые на автомобилях, автоприцепах, железнодорожном и гусеничном транспорте. Эти машины работают при повышенном воздействии вибрации и ударов.

Морские ЭВМ. Морские ЭВМ – ЭВМ, устанавливаемые на больших, сравнительно тихоходных, и малых быстроходных судах и подводных лодках, а также на оружейных площадках береговой

артиллерии. Характерные условия работы на таких объектах – наличие вибрации, ударных нагрузок и морской среды.

Бортовые ЭВМ. Бортовые ЭВМ – ЭВМ, устанавливаемые на борту самолетов, ракет, различных классов искусственных спутников Земли (ИСЗ), космических аппаратов. По общим характеристикам бортовые ЭВМ в основном не отличаются от других типов машин, однако имеют особенности, определяемые спецификой требований к бортовой аппаратуре. По назначению бортовые ЭВМ – машины управляющие, работающие в замкнутом контуре управления объектом. По виду использования их разделяют на машины, устанавливаемые в беспилотные (ракеты, ИСЗ) и пилотируемые объекты (самолеты, космические корабли, орбитальные станции).

2.6. Требования, предъявляемые к конструкции ЭВМ

Вновь разрабатываемая ЭВМ должна отвечать тактико-техническим, конструкторско-технологическим, эксплуатационным, надежностным и экономическим требованиям. Все эти требования взаимосвязаны, и оптимальное их удовлетворение представляет собой сложную инженерную задачу [2, 3, 10].

Тактико-технические требования. Эти требования обычно содержатся в ТЗ на проектирование ЭВМ и включают в себя такие характеристики, как быстродействие, объем оперативной, постоянной и внешней памяти, разрядность машинного числа, точность выполнения операций и т. д. В основном эти требования удовлетворяются на ранних этапах развития ЭВМ, когда определяются состав машины, ее структура, математическое обеспечение, основные требования к отдельным устройствам.

Конструкторско-технологические требования. К этим требованиям относят обеспечение модульного (многоуровневого) или моносхемного (одноуровневого) принципов построения конструкции ЭВМ, технологичность, минимальную номенклатуру комплектующих изделий, минимальные габариты и массу, предусмотрение мер защиты от помех, климатических и механических факторов, ремонтоспособность.

Выбор принципа конструирования зависит от типа создаваемой ЭВМ (имеется в виду суперЭВМ, большие ЭВМ – мэйнфреймы, или микроЭВМ, встраиваемые и т. д.).

Чем сложнее и мощнее по вычислительным возможностям ЭВМ, тем с большей вероятностью будет выбран модульный принцип построения ее конструкции.

Понятие технологичности включает в себя большое число положений и правил, определяемых возможностями предприятия-

изготовителя ЭВМ и влияющих на эффективность ее производства и эксплуатации.

Технологичность конструкции ЭВМ и систем в существенной степени определяется рациональным выбором ее структуры, иерархия которой должна быть разработана с учетом возможностей изготовления и наладки всех ее элементов, узлов, блоков.

Важная характеристика конструкции ЭВМ и системы – **ремонтоспособность** – характеризует трудоемкость восстановления работоспособности и поддержания долговечности. Для повышения ремонтоспособности в конструкции ЭВМ предусматривают: а) доступность по всем конструктивным элементам для осмотра и замены без предварительного удаления других элементов; б) наличие контрольных точек для подсоединения измерительной аппаратуры при настройке и контроле работы машины; в) применение быстросъемных фиксаторов и т. д. Конструкция ЭВМ тем ремонтоспособнее, чем меньшую конструктивную единицу она позволяет оперативно заменить [10].

Эксплуатационные требования. К эксплуатационным требованиям относят простоту управления и обслуживания, предусмотрение различных мер сигнализации опасных режимов работы (выход из строя, обрыв заземления и т. п.), наличие в комплекте машины аппаратуры, обеспечивающей профилактический контроль и наладку конструктивных элементов (стенды, имитаторы сигналов и т. д.). С эксплуатационными требованиями тесно связаны требования обеспечения нормальной работы оператора: организация его рабочего места, возможность прохода ко всем устройствам машины, безопасная работа при отладке и ремонте. Для удобства управления ЭВМ ее конструкция должна отвечать современным эргономическим требованиям и требованиям инженерной психологии [10].

Требования по надежности. Данные требования включают в себя обеспечение вероятности безотказной работы, наработки на отказ, среднего времени восстановления работоспособности, долговечности, сохраняемости. Например, *вероятность безотказной работы* ЭВМ есть вероятность того, что в заданном интервале времени при заданных режимах и условиях работы в машине не произойдет ни одного отказа, а *наработка на отказ* – это средняя продолжительность работы машины между отказами [10].

Экономические требования. К экономическим требованиям относят минимальные возможные затраты времени, труда и материальных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию ЭВМ; минимальную стоимость машины после освоения ее в

производстве. Стоимость вычислительной машины, серийно выпускаемой предприятием-изготовителем, определяется затратами труда и материальных средств, вкладываемых в машину при ее изготовлении.

В табл. 2.2 приведены весовые коэффициенты требований, устанавливаемых для универсальных, управляющих и портативных, бортовых и морских вычислительных машин. Меньшему числовому значению коэффициента соответствует большая значимость соответствующего требования.

Таблица 2.2

Сравнительная оценка ЭВМ

Требования	Весовые коэффициенты требований для ЭВМ			
	универ-сальной	управляющей	портативной	бортовой
Максимальное быст-родействие	1	2	4	3
Высокая надежность	2	1	3	1
Низкая стоимость	3	2	1	4
Малое энергопотреб-ление	3	4	2	1
Небольшие габариты и масса	3	2	2	1

Для больших универсальных ЭВМ (суперЭВМ) наиболее важное требование – обеспечение максимального быстродействия, поскольку оно в существенной степени определяет ее производительность; наименее важное требование – обеспечение небольших габаритов и массы.

Для управляющих (встраиваемых) ЭВМ наиболее важные требования – высокая надежность и малая стоимость, наименее важное требование – мощность потребления.

Портативные ЭВМ, рассчитываемые на массового потребителя, должны, прежде всего, иметь малую стоимость. Высокое быстродействие для этого класса машин – необязательное требование.

Бортовые ЭВМ, устанавливаемые на военные и гражданские объекты, должны обладать высокой степенью надежности. При этом стоимость машин в некоторых случаях не имеет существенного

значения. Применение ЭВМ в военной технике накладывает на их конструкцию дополнительные жесткие требования. Это связано с тем, что в условиях военных действий жизнь экипажа самолета, танка и корабля, а также успех целой операции могут зависеть от правильной, безотказной работы вычислительной техники. О ремонте аппаратуры в самолете, танке, управляемом снаряде, ракете не может быть и речи, здесь должна быть обеспечена возможность быстрой замены вышедших из строя блоков запасными. Кроме надежности, не менее важные требования для этого класса машин – способность работать практически во всех известных условиях эксплуатации, ремонтпригодность, малые габариты, масса, мощность потребления. В этом случае стоимость ЭВМ выше [10].

2.7. Показатели качества конструкции ЭВМ

Степень соответствия ЭВМ предъявляемым требованиям оценивается на основе показателей качества конструкции ЭВМ [10]. К ним относятся:

1. Сложность конструкции ЭВМ

$$C_{\text{ЭВМ}} = k_1(k_2 N_{\text{э}} + k_3 M_{\text{с}}), \quad (2.1)$$

где $N_{\text{э}}$ – число элементов ЭВМ; $M_{\text{с}}$ – число соединений; k_1 , k_2 и k_3 – масштабные и весовой коэффициенты.

Выражение (2.1) связывает число составляющих ЭВМ элементов с числом разъёмных и неразъёмных соединений между ними, что определяет массу, габаритные размеры, надежность и другие общие параметры ЭВМ.

2. Число элементов, составляющих ЭВМ

$$N_{\text{э}} = \sum_{i=1}^{k_n} \sum_{j=1}^{N_y} n_{ij},$$

где N_y , k_n , k_{ij} – число устройств, типов элементов, элементов i -го типа, входящих в j -ое устройство.

3. Объем ЭВМ

$$V_{\text{ЭВМ}} = V_{\text{оис}} + V_{\text{с}} + V_{\text{н}} + V_{\text{ут}},$$

где $V_{\text{оис}}$ – общий объем всех интегральных схем, дм^3 ; $V_{\text{с}}$ – объем соединений, дм^3 ; $V_{\text{н}}$ – объем несущей конструкции, обеспечивающей прочность и защиту ЭВМ, дм^3 ; $V_{\text{ут}}$ – объем устройства теплоотвода, дм^3 .

4. Степень использования физического объема ЭВМ

$$q_n = V_{\text{н}} / V.$$

Это отношение характеризует степень использования физического объема ЭВМ элементами, несущими полезную функциональную

нагрузку, т. е. непосредственно определяющими электрическую схему ЭВМ, и называется *коэффициентом интеграции* или *коэффициентом использования физического объема*.

5. Общая масса ЭВМ

Определяется суммой масс всех входящих в ЭВМ устройств:

$$M_{\text{ЭВМ}} = m_{\text{оис}} + m_{\text{с}} + m_{\text{н}} + m_{\text{ут}},$$

где обозначения в индексах аналогичны обозначениям в п. 3

6. Общая мощность потребления ЭВМ

$$P = \sum_{i=1}^{N_y} p_i,$$

где p_i – мощность потребления i -го устройства.

7. Общая площадь, занимаемая ЭВМ

$$Q = \sum_{i=1}^{N_y} Q_i,$$

где Q_i – площадь, требуемая для эксплуатации i -го устройства ЭВМ, м^2 ; N_y – число устройств в ЭВМ.

8. Собственная частота колебаний конструкции

$$f_0 = \frac{\sqrt{k_{\text{ж}}/m}}{2\pi},$$

где $k_{\text{ж}}$ – коэффициент жесткости конструкции; m – масса конструкции, кг.

9. Степень герметичности конструкции

Определяется истечением газа из определенного объема блока за известный отрезок времени

$$D = \frac{V\Delta P}{\tau},$$

где V – объем блока, дм^3 ; ΔP – избыточное давление газа в блоке, Па; τ – срок службы блока, с.

10. Вероятность безотказной работы ЭВМ

3. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К КОНСТРУКТОРСКИМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ЗАДАЧАМ

В процессе проектирования ЭВМ сущность системного подхода заключается в рассмотрении ЭВМ в виде технической функциональной системы (ТФС), состоящей из нескольких более простых подсистем [2]:

- элементной;
- периферийной;
- конструкционной;
- математической.

При этом рассмотрение ТФС необходимо осуществлять в соответствии с общими системными признаками и применением системного анализа [14].

Из перечисленных подсистем нас интересует конструкционная система (КС), как часть общей системы. Причем эта часть имеет свою структуру, свои методы проектирования, свои критерии качества и т. п., учитывающие общие цели, задачи и требования, предъявляемые ко всей технической функциональной системе.

3.1. Конструкционные системы ЭВМ

Создание конструкционных систем ЭВМ – это результат современных тенденций в конструировании ЭВА, учитывающих проблемы стандартизации и унификации, совместимости функциональных систем и их конструкторских параметров. Это, в свою очередь, повышает надежность, эффективность использования как самих ЭВМ, так и их совместной работы с объектами применения.

Появление конструкционных систем является также результатом системного подхода ко всему процессу проектирования ЭВМ, так как учитывает современные тенденции схемотехнического проектирования, появление новой элементной базы (БИС и СБИС), а также современные технологии производства ЭВМ.

Введем понятие «конструкционная система» [2, 14].

Конструкционная система – это иерархическая совокупность базовых конструкций, организованная в определенной соподчиненности на основе размерной совместимости с учетом функциональных, механических и тепловых факторов, а также требований технологии изготовления, технической эстетики и эргономики, предназначенная для

построения вариантных компоновок функциональных изделий и ЭВМ в целом [2, 14].

В соответствии с системным подходом необходимо отметить, что сложность технической функциональной системы определяется как саморазвивающееся целое, которое в процессе своего индивидуального развития проходит последовательные этапы усложнения и дифференциации.

Важнейшие принципы системного анализа сводятся к следующему: процесс принятия решений должен начинаться с выявления и четкого формулирования конечных целей; необходимо рассматривать всю проблему как целое, как единую систему и выявлять все последствия и взаимосвязи каждого частного решения; необходимы выявление и анализ возможных альтернативных путей достижения цели; цели отдельных подсистем не должны вступать в конфликт с целями всей системы.

Центральной процедурой в системном анализе является построение обобщенной модели (или моделей), отображающей все факторы и взаимосвязи реальной ситуации, которые могут проявиться в процессе осуществления решения. Полученная модель исследуется с целью выяснения близости результата, применения того или иного из альтернативных вариантов действий к желаемому, сравнительных затрат ресурсов по каждому из вариантов, степени чувствительности модели к различным нежелательным внешним воздействиям. Техническая основа системного анализа – современные ЭВМ и их математическое обеспечение.

К конструкционной системе, являющейся подсистемой ТФС, так же применима методология системного анализа и системного подхода, так как она характеризуется теми же общими признаками, что и любая система.

Приведенные выше признаки позволяют выявить и представить структуру КС – ее состав, совокупность устойчивых связей, обеспечивающих ее целостность, размерные отношения.

Далее будут рассмотрены особенности конструкционной системы и ее отличие от обычной конструкции ЭВМ, а также метод базовых несущих конструкций, применяемый в процессе проектирования конструкционной системы.

Конструкционная система обеспечивает необходимую конструкторскую совместимость функциональной системы, обуславливающую достаточно широкое применение как функциональных, так и самих конструкционных систем.

Конструкционная система включает конструкции, являющиеся базовыми, так как они предназначены для образования необходимого *ряда конструкций* (типоразмеров) различных уровней.

Уровень КС представляет собой совокупность некоторых базовых конструкций, имеющую только ей присущие пространственную и функционально-техническую структуры и непосредственные связи с другими уровнями данной КС.

Членение КС, т. е. представление ее в виде некоторого множества уровней, устанавливается не произвольно, а в зависимости от внутренних свойств системы и качества ее внутренних связей. Иерархия уровней КС определяется по принципу сложности базовых конструкций, т. е. путем включения более простых конструкций первых уровней в более сложные конструкции последующих уровней.

Понятие КС опирается на понятия *несущая конструкция, типоразмер, базовая конструкция*.

Понятие «типоразмер» связано с понятиями типизация, унификация, стандартизация.

Понятие «базовая конструкция» является основным при использовании метода базовых несущих конструкций в процессе проектирования конструкционных систем.

Понятие «несущая конструкция» часто используется при описании иерархических уровней конструкции ЭВМ, при описании и расчете их прочности и устойчивости, при описании составных частей аппаратуры и их размещении и т. п.

Дадим два определения несущей конструкции.

Несущая конструкция – это конструктивный элемент, воспринимающий основные нагрузки сооружений и обеспечивающий их прочность, жесткость и устойчивость. Несущие конструкции разделяют на вертикальные, воспринимающие главным образом сжимающие усилия, и горизонтальные, работающие преимущественно на изгиб и растяжение.

Несущая конструкция – элемент конструкции или совокупность элементов конструкции, предназначенных для размещения составных частей аппаратуры и обеспечения их устойчивости к воздействиям в заданных условиях эксплуатации.

3.1.1. Типизация, унификация, стандарты

При построении системы несущих конструкций КС важное значение приобретают **типизация** и **унификация**. Типизация и унификация являются основными методами стандартизации.

Типизация заключается в рациональном сокращении видов объектов путем установления некоторых типовых, выполняющих большинство функций объектов данной совокупности.

Типизацию начинают с классификации деталей.

Классом называют совокупность деталей, характеризуемых общностью технологических задач, решаемых в условиях определенной конфигурации.

В пределах класса детали разбивают на *группы, подгруппы* и т. д. до *типа*.

Практически к одному типу относятся детали, для которых можно составить один технологический процесс – так называемый *типовой технологический процесс*.

Приведем пример.

Класс деталей – печатная плата.

Типы печатных плат: односторонние, двусторонние, многослойные.

Для двусторонних печатных плат *типовой технологический процесс* – негативный (или позитивный) комбинированный метод производства ПП.

Определение типов деталей в КС фактически является элементом воплощения системного подхода.

Метод **унификации** – основной метод стандартизации, направленный на рациональное сокращение существующей номенклатуры объектов путем отбора и широкого использования некоторых изделий или создания новых изделий, т. е. метод унификации обладает определенной универсальностью [2, 15]. Универсальность его проявляется в том, что метод не исключает из обращения другие возможные варианты объектов.

Практическая работа с применением метода унификации может осуществляться на разных уровнях и различных аспектах деятельности: внутрипроектной, межпроектной и т. д.

Работы по унификации конструкций в ряде случаев могут рассматриваться как работы, предшествующие **стандартизации**.

Унификация как метод стандартизации имеет следующие признаки:

- единообразие в конструктивном исполнении устройств;
- функциональную законченность устройств;
- подчинение основных параметров устройств общим требованиям или подчинение основных параметров ряда определенному закону;

- возможность использования унифицированных изделий в составе устройств или систем различного функционального назначения, т. е. определенную универсальность;
- обеспечение взаимозаменяемости на различных конструктивных уровнях с учетом наличия единых габаритных, установочных и присоединительных размеров.

Стандартизация. Развитие возможностей супер-ЭВМ и микро-ЭВМ и областей их применения осуществляется на основе стандартизации всех их параметров, в том числе параметров конструкций, компоновок и методов применения.

Заметим, что в нашей стране некоторые стандарты не гармонизированы с зарубежными и поэтому затрудняют осуществление их совместимости.

Чтобы стандартизация была эффективной, целесообразно проводить её комплексно по форме, способу установки и выполняемым функциям. Такой принцип не накладывает ограничений на схемные решения, позволяет непрерывно совершенствовать изделия и стандартизировать их для достижения независимого и опережающего проектирования.

Комплексный характер стандартизации требует ответа на вопрос: в какой мере единая конструкционная система может применяться для функциональных систем и различных моделей ЭВМ? Стандарты на базовые конструкции должны устанавливать достаточное количество необходимых вариантов исполнений (различающихся, например, прочностью, степенью защиты и т. п.) и модификаций базовых конструкций, обеспечивающих образование, наряду с индивидуальными моделями, универсальных моделей ЭВМ [2, 14].

3.1.2. Метод базовых несущих конструкций

Под базовой несущей конструкцией понимают несущую конструкцию, являющуюся основой для модификации ЭВМ [15].

При рациональном сокращении видов объектов в процессе типизации определяются некоторые типовые, которые принимаются за основу (базу) для создания других объектов, аналогичных или близких по функциональному назначению [14].

Такой метод определения иерархических уровней конструкции ЭВМ называют **методом базовых конструкций**.

Следует иметь в виду отличие базовой несущей конструкции от унифицированной несущей конструкции, под которой понимается

несущая конструкция, предназначенная для применения в аппаратуре различного назначения.

С помощью метода базовых несущих конструкций определяются конструкции, наиболее характерные и оптимальные для рассматриваемого класса ЭВМ при разработке конкретного устройства или комплекса устройств.

Метод базовых конструкций обеспечивает сохраняемость только отдельных объектов из возможной совокупности. Другими словами, этот метод распространяется на малое число объектов большего числа функций.

Базовые несущие конструкции проектируются для всего ряда ЭВМ конкретного класса, т. е. при одних и тех же конструкторских параметрах базовых несущих конструкций изменяется функциональная сложность ЭВМ.

В данном случае под модификацией ЭВМ подразумевается модификация схем при неизменных конструкторских параметрах иерархических уровней конструкции ЭВМ.

Например, при одинаковом типоразмере ПП на ней размещаются различные электронные схемы. В процессе модификации электронные схемы меняются, а типоразмер ПП остается неизменным.

Или другой пример. Конструкция системного блока персонального компьютера IBM PC 286, 386, 486 и т. д. оставалась неизменной, а функциональная сложность этих ЭВМ изменялась в сторону увеличения функциональных возможностей.

Значительный технико-экономический эффект метода базовых конструкций заключается в следующем [15]:

- при разработке новых устройств используется проверенная базовая конструкция, исключающая поиски возможных решений и возможные ошибки;
- обеспечивается большая преемственность в производстве устройств, созданных на одной базе; значительно ускоряется подготовка производства и снижаются расходы на её выполнение;
- значительно облегчаются условия эксплуатации и ремонта устройств, имеющих много общих конструктивных элементов.

3.2. Влияние стандартизации на принятие конструкторско-технологических решений

Определение типа детали проектируемой конструкции электронной аппаратуры позволяет определить тот технологический процесс, который будет использован для изготовления данной детали и

дальнейшей технологии сборки этих деталей в единую конструкцию, т. е. выбор крепежных деталей направляющих, прочность несущих конструкций, форму, размеры их механического и электрического объединения и т. д. [2]. В этом состоит влияние классификации и типизации на принятие конструкторско-технологических решений.

Унификация приводит к сокращению номенклатуры изделий в пределах устройства, класса устройств или целых групп. Она неразрывно связана с наличием ряда одинаковых или кратных базовых установочных и присоединительных размеров. Например, сокращение количества типоразмеров ПП (до трех) в пределах устройства, ЭВМ, даже целого класса устройств. Это приведет к сокращению геометрических параметров оборудования, приспособлений, что, в свою очередь, снизит стоимость изделия, конечно, при условии сохранения его функциональных возможностей и надежности.

В настоящее время наблюдается тенденция системного подхода к решению задач унификации базовых несущих конструкций электронной аппаратуры. Одним из основных вопросов разработки унифицированной системы базовых несущих конструкций является вопрос формирования ее структуры, которая определяет внутреннюю организацию системы, а также установление уровней соотнесения элементов структуры.

Одна из причин применения системного подхода к унификации базовых несущих конструкций – наличие разнобоя в терминологии, различное число уровней компоновки и отсутствие их четкой формулировки, различный состав элементов систем базовых несущих конструкций и соотнесение их по уровням. Некоторые системы базовых несущих конструкций вообще не имеют таких соотношений. В состав систем базовых несущих конструкций включены изделия различного функционального назначения. Только в одном случае в элементы первого уровня включен корпус микросхемы. Смысловое содержание элементов отдельных уровней различное.

Например, в один и тот же уровень включаются каркас и блок, кожух и стойка, т. е. не дифференцируются функциональные и чисто конструкторские элементы, хотя только последние должны входить в систему базовых несущих конструкций.

Как видно в рассматриваемом примере, метод системного подхода в данном случае – это обобщение предыдущего опыта и выработка нового решения, более унифицированного.

Необходимость стандартизации понимали еще в древности, когда необходимо было строить дома из кирпичей одинаковых размеров. На развитие стандартизации большое влияние оказало серийное

изготовление изделий, потребовавшее обеспечить взаимозаменяемости отдельных частей.

В настоящее время стоит проблема совместимости ЭВМ между собой и оборудованием, в которое они будут встраиваться.

Международные организации по стандартизации проводят серьезные работы по принятию стандартов.

Так стандартизованы основные размеры накопителей, дисплеев, клавиатур. Однако конструкторские параметры базовых печатных плат и плат расширения ПК, а также контроллеры (адаптеры) – изделия, определяющие сущность и качество конкретной ЭВМ, выполняются несовместимыми. Конкурирующие фирмы делают это сознательно для того, чтобы утвердить свои решения путем массового выпуска изделий и закрепления в виде стандарта.

Фирмы-конкуренты знают, что подготовка предприятия к выпуску нового изделия по новым стандартам, чтобы конструкцию электронного изделия сделать совместимой с конструкцией предлагаемой ЭВМ, очень дорогостоящее мероприятие, т. к. требует настройки, или приобретения, или разработки нового оборудования технологической оснастки, возможно, подготовки специалистов, освоения и внедрения новых технологий. В этом заключается влияние стандартизации на конструкторско-технологические решения.

4. КОНСТРУКТИВНЫЕ МОДУЛИ ПЕРВОГО УРОВНЯ

В этом разделе рассматриваются модули первого уровня иерархии, некоторые данные об их проектировании, технологии изготовления, сборке, контроле и т. п. [2].

К модулям первого уровня относятся интегральные микросхемы (ИМС) всех типов, дискретные радиоэлектронные компоненты, другие электромагнитные и электрические компоненты (реле, дроссели, различные трансформаторы, преобразователи и т. п.), которые могут быть включены в электронные схемы. При этом необходимо выделить конструкторские параметры, отделив их от функционально-логических.

Известно, что вопросы конструирования и технологии изготовления микросхем рассматриваются в отдельной области электроники – микроэлектронике. Поскольку отдельной дисциплины «Микроэлектроника» на данной специальности нет, то в рассматриваемом разделе будут даны некоторые сведения из этой области.

4.1. Интегральные микросхемы

Интегральная микросхема (микросхема) – это конструктивно законченное микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования информации, содержащее совокупность электрически связанных между собой РЭК (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле. Термин «интегральная микросхема» отражает суммирование, объединение значительного числа РЭК и соединяющих их проводников в единую конструкцию (конструктивная интеграция), выполнение функций преобразования более сложных по сравнению с функциями отдельных компонентов (схемотехническая интеграция), создание одновременно всех РЭК и межэлементных соединений в едином технологическом цикле (технологическая интеграция). Микросхемы изготавливают групповым методом по материалосберегающей технологии, тиражируя одновременно в одной партии от нескольких десятков до нескольких десятков тысяч микросхем.

Элемент интегральной микросхемы – это ее неотделимая составная часть, выполняющая функцию какого-либо РЭК. Поэтому транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы микросхемы называют интегральными, в отличие от отдельно изготавливаемых транзисторов,

диодов, конденсаторов, резисторов, которые в этом случае называют дискретными [16].

Официальная классификация разделяет интегральные микросхемы на три категории: полупроводниковые, пленочные и гибридные (ГОСТ 17021-88 «Микросхемы интегральные. Термины и определения»).

Часто сложность ИМС характеризуют коэффициентом, называемым степенью интеграции

$$K = \lg N,$$

где N – число элементов и компонентов в схеме.

По степени интеграции различают:

- малые интегральные схемы (до 100 элементов);
- средние интегральные схемы (от 100 до 1000 элементов);
- большие интегральные схемы (от 10^3 до 10^4 элементов);
- сверхбольшие интегральные схемы (от 10^5 элементов).

С позиций технологии изготовления ИМС можно классифицировать следующим образом:

- полупроводниковые ИМС – это микросхемы, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и (или) на поверхности полупроводника (т. е. по полупроводниковой технологии);
- пленочные ИМС – это микросхемы, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены только в виде пленок (пленочная технология);
- гибридные ИМС – это микросхемы, в составе которых имеются как полупроводниковые, так и пленочные элементы и компоненты (совмещенная технология).

По типу используемых основных активных элементов полупроводниковые (п/п) микросхемы подразделяют на биполярные и полевые (на транзисторах типа металл – диэлектрик – полупроводник (МДП)). Выпускаются также комбинированные биполярно-полевые полупроводниковые микросхемы, в которых наряду с биполярными используются и полевые транзисторы, характеризующиеся высоким входным сопротивлением, низким уровнем шумов и повышенной радиационной стойкостью.

В пленочной интегральной микросхеме все элементы и соединения между ними выполнены в виде пленок. В настоящее время методами пленочной технологии реализуются только пассивные элементы микросхем – резисторы, конденсаторы и индуктивности. Попытки создания пленочных транзисторов успеха не имели.

В зависимости от толщины пленок и способа создания элементов микросхемы подразделяют на тонко- и толстопленочные. К первым относят микросхемы, толщина пленок в которых не превышает один

мкм (проводящая металлическая пленка называется тонкой, если ее толщина меньше длины свободного пробега в ней электронов). Тонкопленочные элементы формируют различными методами: термического испарения материалов в вакууме, электрохимического осаждения из растворов, химического осаждения из газовой фазы [17].

Элементы микросхем, создаваемые по пленочной технологии, могут быть выполнены более точными по номинальным значениям по сравнению с диффузионным методом (полупроводниковая технология).

По технологии изготовления гибридные ИМС необходимо различать гибридные полупроводниковые ИМС и гибридные пленочные.

В гибридных полупроводниковых ИМС активные элементы получают по полупроводниковой технологии, а пассивные элементы – по пленочной [17].

В гибридных пленочных ИМС пассивные элементы выполняются по пленочной технологии на поверхности керамической или ситалловой подложки, а активные элементы выполняются в бескорпусном дискретном варианте и с помощью проволочных проводников объединяются с другими элементами.

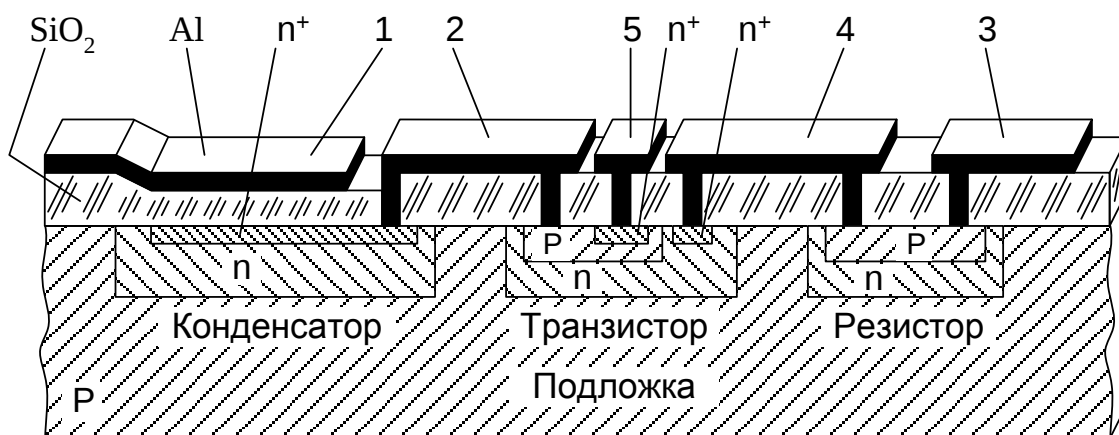
Среди большого множества типов ИМС различают 4 основных типа интегральных микросхем [2]:

- планарно-диффузионные (однокристалльные) на биполярных структурах ($n-p-n$, $p-n-p$) (рис. 4.1, а);
- совмещенные (с тонкопленочными пассивными элементами), т. е. гибридные полупроводниковые (рис. 4.1, б);
- на МДП-структурах (рис. 4.2);
- многокристалльные (рис. 4.3).

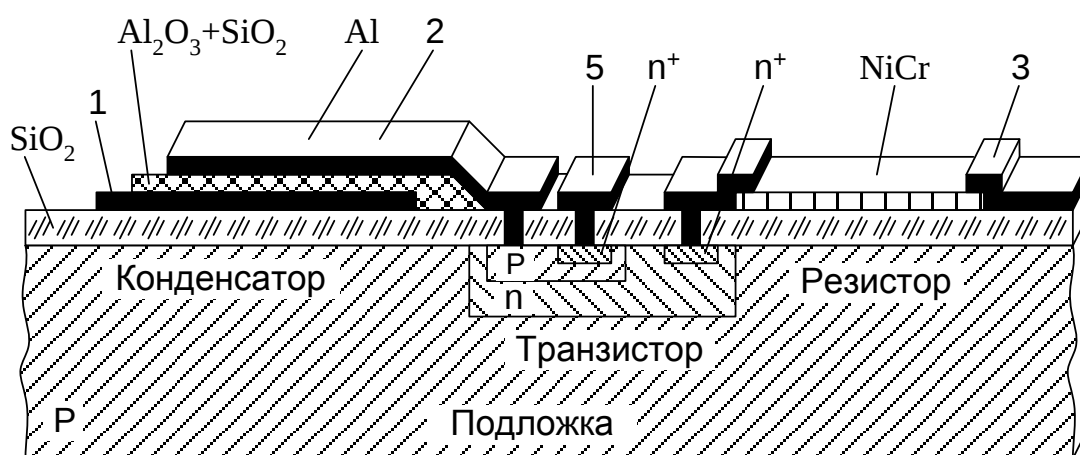
В планарно-диффузионных микросхемах элементы представляют собой области с различным типом электропроводимости внутри монокристаллической полупроводниковой подложки. Эти элементы изолированы между собой либо обратносмещенным $p-n$ -переходом, либо слоем диэлектрического материала, например оксида кремния.

Микросхемы на МДП-структурах выполняют на основе полевого транзистора с изолированным затвором (рис. 4.2). В ИМС эти транзисторы используют в качестве как активных (диоды, транзисторы), так и пассивных элементов (нагрузочных резисторов), что обеспечивает максимальную повторяемость и технологичность при изготовлении микросхем. Микросхемы на МДП-структурах имеют более высокую степень интеграции по сравнению с другими типами п/п микросхем.

Многокристалльные микросхемы состоят из отдельных компонентов, расположенных на общей подложке и соединенных между собой тонкопленочными проводниками (рис. 4.3). С внешними выводами связь образуется проводами с высокой проводимостью (чаще из золота). С целью герметизации общую подложку (основание) размещают в корпусе.



а



б

Рис. 4.1. Структура полупроводниковых микросхем:
а – планарно-диффузионная; б – совмещенная

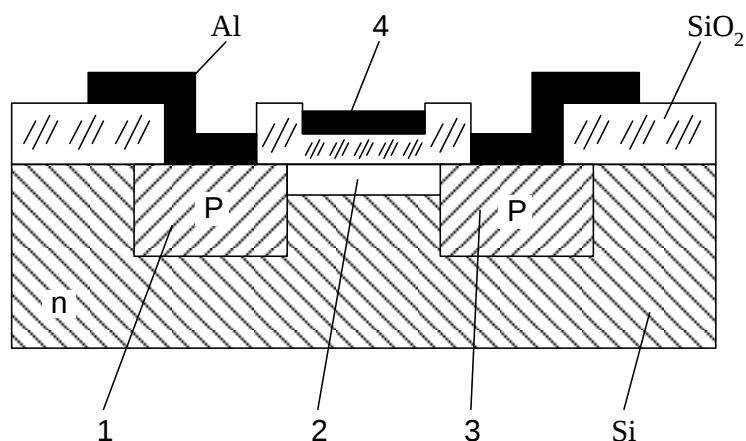


Рис. 4.2. Полевой транзистор с изолированным затвором (МДП-структура):
1 – исток; 2 – канал; 3 – сток; 4 – затвор

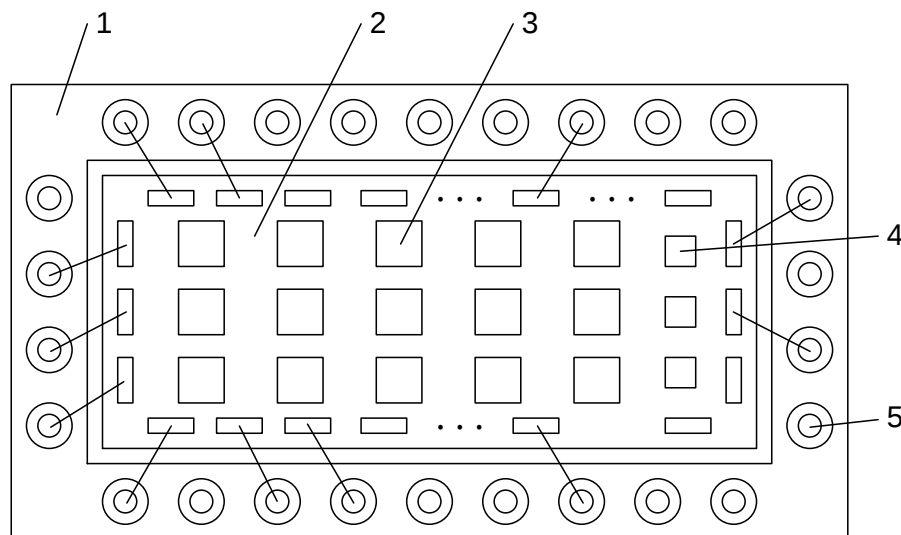


Рис. 4.3. Микросборка (многокристалльная ИМС) в металлостеклянном корпусе:
1 – корпус; 2 – основание (ситалл или керамика); 3 – кристаллы; 4 – навесные компоненты; 5 – стеклянные бусины с впаянными в их центре металлическими стержнями (внешними выводами)

Изготовление многокристалльных микросхем (микросборок) требует меньшего числа технологических операций, поскольку все компоненты выполняются отдельно. Однако эти микросхемы в условиях массового производства несколько дороже, поскольку в них трудно автоматизировать сборочные операции.

Многокристалльные микросхемы обладают лучшими рабочими характеристиками, так как влияние паразитных связей в них меньше, чем в однокристалльных ИМС.

Применение интегральных микросхем позволило значительно повысить надежность ЭВА, что иллюстрируется следующим примером. По американской статистике интенсивность отказа средней ИМС (20–30 тысяч транзисторов) может быть приравнена к интенсивности отказа всего одного паяного соединения. Если число выводов такой ИМС принять равным двадцати четырем, то только 4 % вероятности выхода из строя всего устройства приходится на саму ИМС, а 96 % – на паяные соединения.

4.2. Материалы для микросхем

Интегральные микросхемы состоят из следующих элементов конструкции:

- корпуса с выводами;
- активной или пассивной подложки;
- активных или пассивных электронных элементов, изготовленных в едином технологическом процессе на поверхности или в объеме подложки.

Корпусы ИМС различаются по форме, применяемым материалам, и выводам. Они являются элементами конструкции и предназначены для защиты от внешних воздействий на схемные элементы. В зависимости от применяемых материалов они бывают металlostеклянными, керамическими или пластмассовыми. Также в корпусах могут применяться печатные платы высокой плотности для разводки выводов кристалла.

Внутри корпуса размещаются подложки, которые делятся на *пассивные* или *активные*.

Пассивные подложки используются для пленочных и гибридных пленочных микросхем. Пассивные подложки не участвуют в преобразовании и передаче сигналов. Они используются как диэлектрики и выполняют, кроме того, функцию несущих конструкций и теплоотводящего канала.

Пассивные диэлектрические подложки изготавливаются из ситалла (аморфного стекла), бесщелочных стекол, керамики и пластмассы.

Активные подложки принимают непосредственное участие в преобразовании и передаче сигналов, т. е. это среды, которые после соответствующей технологической обработки обладают свойствами усиления или преобразования напряжения. Одновременно они могут выполнять и часть функций пассивных подложек, т. е. выполняют функцию несущей конструкции. Активные подложки, как правило, изготавливаются из полупроводников и ферромагнитных материалов

(матрицы элементов памяти). На полупроводниковой основе формируются монолитные полупроводниковые и гибридные полупроводниковые интегральные микросхемы.

Активные подложки – это монокристаллические пластины из разных полупроводниковых материалов.

Наиболее распространенные полупроводниковые материалы, применяемые в производстве полупроводниковых микросхем: кремний (Si); германий (Ge); арсенид галлия (GaAs); фосфид галлия (GaP); фосфид индия (InP); арсенид индия (InAs); антимонид галлия (GaSb); антимонид индия (InSb) и др.

Напомним, что:

As – арсенид (мышьяк);

Sb – стибий (сурьма);

фосфиды – соединения фосфора (P) с металлами индия и галлия;

антимониды – соединения сурьмы (Sb) с металлами индия и галлия.

Для работы полупроводниковых структур микросхем очень важны электрические свойства п/п материала: тип электропроводности, концентрация носителей заряда, их подвижность, удельное сопротивление, время жизни неосновных носителей заряда и их диффузионная длина. Эти параметры существенно зависят от технологии получения полупроводника.

В настоящее время из всех полупроводниковых материалов наибольшее применение при изготовлении ИМС получил кремний.

Наряду с этим интенсивно разрабатываются логические элементы на арсенид-галлиевых транзисторах. Антимонид индия (InSb) используется для изготовления фотоэлементов высокой чувствительности на инфракрасное излучение.

4.3. Технология изготовления полупроводниковых микросхем

Структуры, электрические параметры микросхем и их элементов определяются технологией изготовления. Совокупность технологических процессов и операций, проводимых в определенной последовательности, составляют технологический цикл изготовления микросхем.

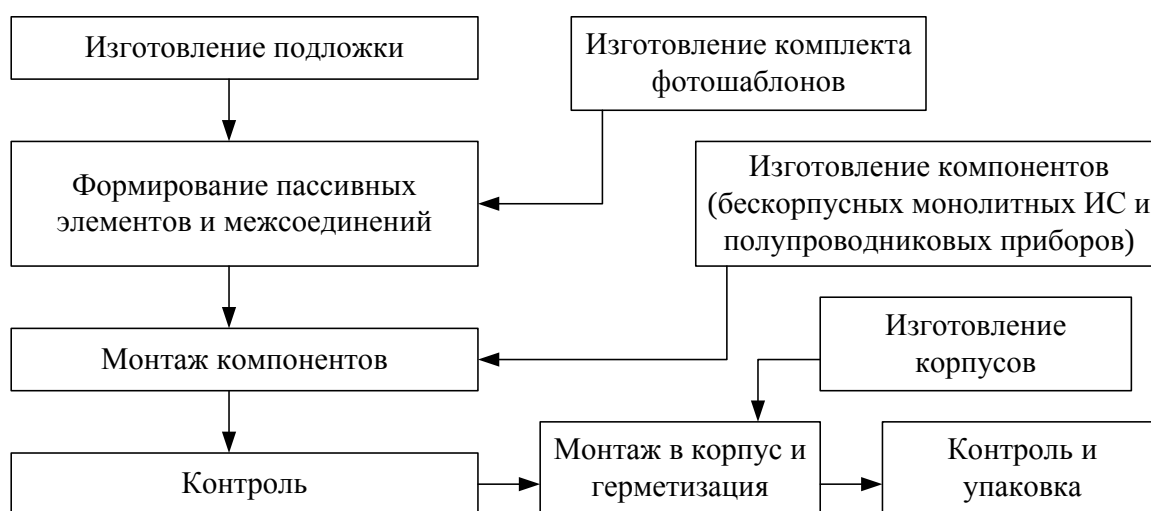
В данном разделе даются краткие сведения о типовых технологических процессах, применяемых для создания полупроводниковых и гибридных микросхем.

Технологический цикл может быть разделен на два больших этапа – обработки пластин и сборочно-контрольный [18]. На рис. 4.4

представлены схемы технологических процессов изготовления полупроводниковых и гибридных пленочных ИМС.



а)



б)

Рис. 4.4. Укрупненные схемы технологических процессов изготовления ИМС:
а – полупроводниковых; б – гибридных пленочных

Первый этап включает процессы, формирующие на поверхности или внутри пластин структуры микросхем, т. е. их элементы и соединения [9].

Для реализации элементов в определенных местах создают области с требуемым типом электропроводимости и удельным сопротивлением, вводя соответствующие примеси (полупроводниковая технология), или наращивая слои на поверхности (совмещенная технология). Проводники соединений, а в совмещенных микросхемах резисторы и конденсаторы получают нанесением на поверхность пластин тонких пленок.

Геометрия легированных областей и тонкопленочных слоев задается масками, формируемыми с помощью *литографии*. В результате на пластинах образуется матрица одинаковых структур (чипов). Каждый чип соответствует одной микросхеме. На данном этапе микросхемы создаются групповыми методами.

Второй этап начинается с *контроля* функционирования микрочипов на пластине.

Для микросхем с небольшим коэффициентом интеграции, осуществляется *зондовый* контроль, при котором электрические контакты с отдельными микросхемами осуществляются с помощью механических зондов – тонких игл, устанавливаемых на контактные площадки микросхем. Зондовый контроль производится на автоматизированных установках, дефектные микросхемы маркируются намагниченной краской. Для СБИС разработаны более сложные и эффективные методы контроля: электронно-лучевое зондирование, исследование поверхности пластин с помощью электронного микроскопа.

Основные технологические операции изготовления ИМС приведены в [2].

4.4. Корпуса микросхем

Корпус ИМС является важной частью её конструкции. Качество корпуса в значительной степени определяет надёжность работы и механическую прочность микросхем при работе в электронной аппаратуре.

Конструкторско-технологические варианты корпусов зависят от области применения ИМС и размеров кристалла. В настоящее время введена жёсткая стандартизация вариантов корпусов, позволяющая автоматизировать монтаж и сборку ИМС на печатных платах.

Корпус должен выполнять ряд ответственных функций:

- обеспечивать хороший электрический и механический контакты выводов кристалла с внешними выводами корпуса;

- обеспечивать хороший электрический и механический контакты выводов корпуса с монтажными отверстиями или площадками на печатной плате;
- предохранять кристалл от воздействия неблагоприятных внешних (климатических и эксплуатационных) условий;
- эффективно отводить тепло, выделяющееся при работе ИМС.

По применяемым материалам корпуса подразделяются на металлокерамические, керамические, металlostеклянные, стеклянные, металлополимерные, пластмассовые и полимерные (приведены в порядке снижения надежности и стоимости).

Стандартные корпуса принято разделять на две категории [19]:

1. Выводные компоненты (*Pin Through Hole – PTH* или *Through Hole Assembly – THA*). Эта группа компонентов включает традиционные пассивные и активные компоненты со штыревыми выводами, а также интегральные схемы в корпусах типа *DIP (Dual in-line Package)*.

2. Поверхностно-монтируемые компоненты (*surface mount component – SMC* или *surface mount device – SMD*). Для них также применяется название «*SMT-компонент*» (*SMT – surface mount technology – технология поверхностного монтажа*). К этой группе относятся пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, индуктивности) в корпусах, не имеющих выводов (0805, 0603, и др.), ИМС и другие полупроводниковые приборы в базовых технологических корпусах с планарными, шариковыми выводами, или J-контактами.

Существует также множество элементов, для которых форма, размеры и расположение выводов не стандартизованы. Эти компоненты объединяют под общим названием *OFC (Odd Form Component)* [19].

Выводы могут быть плоскими (форма поперечного сечения – прямоугольник), и осевыми (форма поперечного сечения – круг). *Штыревым* называют плоский или осевой вывод компонента, предназначенный для монтажа в отверстия на печатной плате. *Планарным* называют плоский вывод, который припаивается к областям металлизации на поверхности печатной платы. Разновидностью планарных выводов являются также *J-контакты*. Они представляют собой плоские выводы, загнутые под корпус. В настоящее время широко применяются компоненты с *шариковыми* выводами.

Выводы корпуса могут располагаться с двух или четырех сторон корпуса, а также с нижней стороны корпуса по всей его площади. Выводы могут располагаться параллельно плоскости корпуса (планарные) либо перпендикулярно плоскости корпуса (штыревые).

Справочные данные о размерах и форме корпусов, размере и форме их выводов представлены в [2, 3, 14].

Все параметры стандартных корпусов оговорены в стандартах. Так, расстояния между выводами, размещёнными в ряд, соотносятся с шагом координатной сетки: 2,5 мм; 1,25 мм; 0,625 мм в метрической системе измерения и 2,54 мм; 1,27 мм; 0,634 мм – в дюймовой системе измерения, переведённой в метрическую.

Приведем основные группы стандартных зарубежных корпусов.

1. Простые корпуса для пассивных компонентов:

- выводные корпуса (рис. 4.5);
- безвыводные плоские корпуса прямоугольной формы, например резисторов и конденсаторов (рис. 4.6, а);
- корпуса типа *MELF* (рис. 4.6, б) – цилиндрические безвыводные корпуса.

2. Корпуса со штыревыми выводами, расположенными перпендикулярно плоскости корпуса – *DIP* и *PGA* (рис. 4.7).

3. Корпуса с планарными выводами – *SO*, *PLCC*, *QFP* (рис. 4.8).

4. Быводные корпуса с металлизацией контактных площадок на боковых стенках корпуса – *LCCC* (рис. 4.9).

5. Корпуса с шариковыми выводами на нижней плоскости корпуса – *BGA*, *flip-chip* [19].

Пассивные компоненты с безвыводными корпусами часто обозначают приставкой «чип», например, «чип-резисторы», «чип-конденсаторы», и т. д.

Особенностью компонентов типа *DIP*, *PGA*, *PLCC* и *LCCC* является то, что их можно припаивать непосредственно на плату, а также устанавливать в специальные колодки, которые, в свою очередь, припаиваются на плату.

Кроме перечисленных групп существует также множество других разновидностей корпусов, что позволяет подбирать подходящие с учетом особенностей эксплуатации, производства, стоимости, и т.д. Как правило, один и тот же электронный компонент выпускается в нескольких видах корпусов.

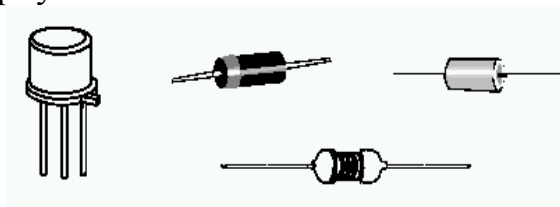
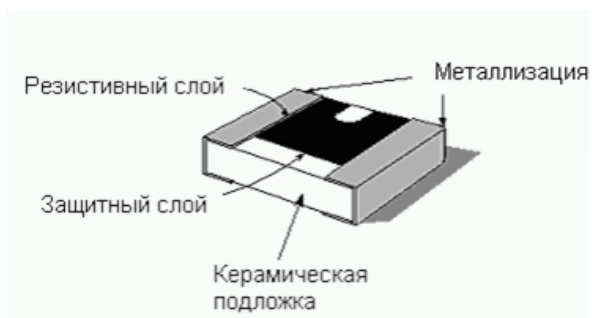


Рис. 4.5. Пассивные и активные компоненты в корпусах со штыревыми выводами

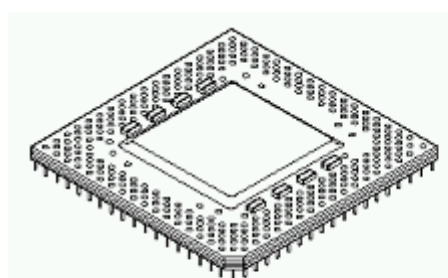


а



б

Рис. 4.6. Пассивные компоненты:
а - в безвыводном плоском корпусе; б - в MELF-корпусе

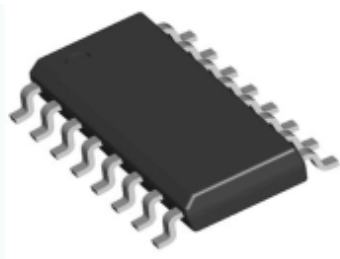


PGA - Pin Grid Array

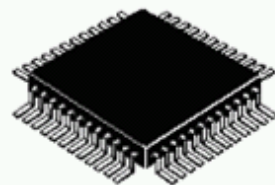


DIP - Dual In-line Package

Рис. 4.7. Корпуса типа PGA и DIP



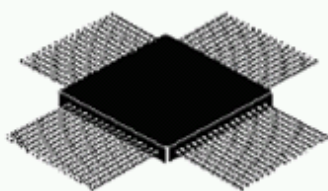
SO



QFP



PLCC



CQFP

Рис. 4.8. Корпуса типа SO, QFP, PLCC

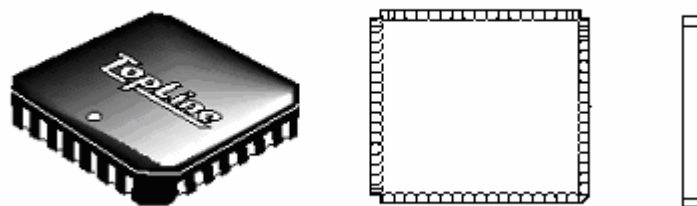


Рис. 4.9. Корпус типа LCCC

На рис. 4.10 представлены два варианта *BGA*-корпусов – с нижним расположением кристалла (вверху), и с верхним расположением кристалла в корпусе *flip-chip* (внизу). По сути, второй вариант является двухуровневой сборкой, разновидности которой в настоящее время широко применяются для компонентов с большим количеством выводов (более 100).

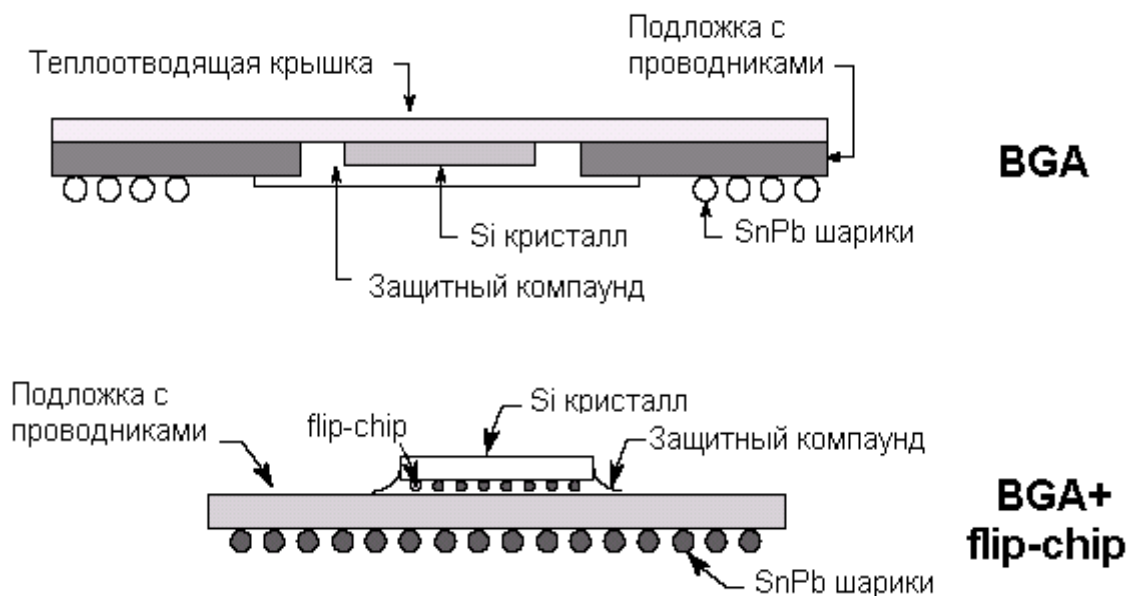


Рис. 4.10. Варианты *BGA*-корпусов

На следующем рисунке приведен пример конструкции многоядерного процессора.



Рис. 4.11. Общий вид двухъядерного микропроцессора

4.5. Проектирование микросхем

Весь процесс проектирования интегральных микросхем включает два основных этапа [2]:

- 1) разработку принципиальной электрической схемы;
- 2) конструирование интегральной схемы.

Конструирование ИМС состоит из следующих этапов:

- выбора структуры и электрофизических параметров подложки;
- формулировки требований к электрофизическим параметрам слоев, образующих элементы, и к компонентам;
- разработки топологии ИМС;
- выбора корпуса микросхемы;
- разработки комплекта документации на ИМС.

Исходными данными при конструировании интегральных микросхем являются:

1) принципиальная электрическая схема с номинальными значениями и допусками на электрические параметры элементов и компонентов с указанием возможных мест появления паразитных элементов в электрической схеме;

2) базовый технологический процесс с указанием технологических допусков.

Технологический процесс является основой для первых двух этапов конструирования ИМС.

Основной этап конструирования ИМС – разработка их топологии. Она включает расчёт геометрических размеров элементов, разработку эскизов топологии, определение необходимого количества изолированных областей (для полупроводниковых ИМС), разработку вариантов топологии и её оптимизацию. Наиболее сложной частью разработки топологии является расчёт геометрических размеров элементов, так как в основном от него зависят работоспособность ИМС и её надёжность. Интеграция схемы на одном кристалле заключается в учёте паразитных элементов: ёмкостей p - n -перехода; сопротивлений, возникающих при ликвидации пересечений; паразитных элементов межсоединений и др.

При разработке топологии БИС с относительно небольшим числом элементов (около 1000) требуется при "ручном" проектировании более одного человеко-года, поэтому необходима автоматизация проектирования. При полной автоматизации проектирования БИС указанной ёмкости требуется приблизительно семь человеко-дней.

При заданном базовом технологическом процессе (известны глубины залегания p - n -переходов, поверхностные концентрации примесей; метод изоляции и т. п.) рассчитываются электрофизические параметры структуры для полупроводниковых ИМС (удельная ёмкость, напряжение пробоя, обратные токи переходов, удельное сопротивление слоёв), геометрические размеры и параметры элементов ИМС.

Примером успешного проектирования ИМС является процессор **Intel Xeon MP** (ядро **Sandy Bridge**), созданный в 2011 году (рис. 4.12).



Рис. 4.12. Общий вид процессора Intel Xeon MP

Всего в линейку входило 11 модификаций процессоров, одна из которых была двухядерной (*Xeon E3-1220L*), а остальные – четырехядерными.

Процессоры основывались на микроархитектуре *Sandy Bridge*, производились по технологии – 32 нм, и содержали три уровня КЭШ-памяти. Объем КЭШ-памяти третьего уровня изменялся, в зависимости от модификации процессоров, от 3 до 8 Мб. Процессоры устанавливались в разъем *LGA 1155*. Тактовая частота изменялась от 2,2 до 3,5 ГГц. В качестве системной шины использовалась шина *DMI 2.0*.

Процессоры *Xeon E3-1225*, *Xeon E3-1235*, *Xeon E3-1245* и *Xeon E3-1275* имели встроенную графическую систему *HD Graphics 3000*, работающую на тактовой частоте 850 – 1350 МГц.

Расчетная потребляемая мощность изменялась от 20 до 95 Вт.

Всеми процессорами поддерживались наборы инструкций и технологии: *MMX*, *SSE*, *SSE2*, *SSE3*, *SSSE3*, *SSE4.1*, *SSE4.2*, *AVX*, *EIST*, *Intel 64*, *XD*, *TXT*, *Intel VT-x*, *Intel VT-d*, *Turbo Boost*, *AES-NI*, *Smart Cache*. Все процессоры, кроме модификаций *Xeon E3-1220* и *Xeon E3-1225*, поддерживали технологию *Hyper-Threading*.

5. КОНСТРУКТИВНЫЕ МОДУЛИ ВТОРОГО УРОВНЯ

Под **печатной платой** понимается конструкция, состоящая из электрических межсоединений, расположенных на изоляционном основании [2]. Печатная плата с установленными и смонтированными на ней электронными компонентами представляет собой **печатный узел**. Проводники, лежащие в одной плоскости, называют печатным рисунком, или **слоем**. По функциональному назначению различают сигнальные (информационные), потенциальные (заземление, питание), экранирующие и технологические слои, а по расположению – внутренние и внешние слои [20]. Кроме проводников платы могут содержать:

- присоединительные элементы монтажа: контактные площадки и монтажные отверстия;
- фиксирующие (базовые) элементы для совмещения выводов корпусов электронных компонентов с контактными площадками или монтажными отверстиями на печатной плате;
- печатные ламели для контактирования с розеткой разъема;
- теплоотводящие и тепловыравнивающие участки;
- маркированные слои;
- технологические контактные площадки;
- паяльные маски – термостойкое электроизоляционное пленочное покрытие;
- элементы схем, выполняемые методами печати: индуктивности, емкости, сопротивления.

Слои в МПП имеют определенное функциональное назначение:

- наружные монтажные слои конструируются и используются для монтажа электронных компонентов;
- сигнальные слои, несут на себе топологическую схему сигнальных межсоединений;
- слои земли и питания выполняют, как правило, большими полигонами с минимальным омическим и индуктивным сопротивлениями, они одновременно служат электрическими экранами, заземленными по высокой частоте развязывающими емкостями;
- теплоотводящие или тепловыравнивающие слои.

На технологических полях кроме базовых и технологических отверстий размещают вспомогательные знаки совмещения (реперы), контрольные элементы для проверки качества адгезии фольги к диэлектри-

ку, сопротивления изоляции, толщины меди в металлизированных отверстиях и т. п. [20].

5.1. Основные понятия и определения

Печатный проводник – участок металлизированного слоя, нанесенного на изоляционное основание, эквивалентный обычному монтажному проводу.

Печатный монтаж – система печатных проводников, обеспечивающая электрическое соединение элементов схемы.

Печатная схема – совокупность печатного монтажа и печатных элементов, расположенная на изоляционном основании и прошедшая все стадии изготовления.

Печатный элемент – сопротивление, конденсатор и т. д., нанесенные на изоляционное основание в виде металлического или другого покрытия.

Печатная плата – изоляционное основание с печатным монтажом или печатной схемой.

Координатная сетка – прямоугольная сетка, состоящая из параллельных равностоящих линий, условно или фактически нанесенная на чертеж печатной платы для определения расположения отверстий.

Шаг координатной сетки – расстояние между двумя ближайшими параллельными линиями координатной сетки.

Узел сетки – точка пересечения двух взаимно перпендикулярных линий координатной сетки.

База сетки – узел сетки, принимаемый за точку начала отсчета, как правило, это левое нижнее монтажное отверстие печатной платы.

Заготовка – основание для печатной платы из металлизированного или неметаллизированного электроизоляционного материала, подготовленного любым способом к нанесению печатного монтажа или схемы.

Монтажная площадка – металлизированный участок, окружающий или примыкающий к монтажному отверстию, имеющий электрический контакт с печатным проводником и обеспечивающий возможность электрического соединения объемных электро- и радиоэлементов схемы с печатным монтажом.

Навесные элементы – объемные электро- и радиоэлементы, закрепленные на печатной плате способом пайки и имеющие электрический контакт с печатным монтажом.

Разрешающая способность способа печати – определяется допустимым числом линий на миллиметр, причем за «линию» условно принимается минимально допустимая ширина печатного проводника или равная ей минимальная ширина зазора между проводниками.

Фотошаблон печатной схемы – изображение в масштабе 1:1, полученное путем фотосъемки с оригинала печатной схемы с заданной степенью точности и предназначенное либо для непосредственного изготовления печатной платы, либо для изготовления технологической оснастки.

Плакированное основание – электроизоляционный материал с металлическим покрытием, нанесенным любым способом, подготовленный для нанесения изображения печатной схемы.

Монтажное отверстие – отверстие, предназначенное для закрепления выводов объемных электро- и радиоэлементов или других объемных проводников.

Переходное соединение – средство, обеспечивающее электрический контакт между различными слоями или сторонами печатной платы.

Металлизированное отверстие – отверстие в печатной плате, на стенки которого нанесен слой металла, служащее в качестве монтажного или переходного соединения.

Перемычка (фальшь-деталь) – отрезок обычного монтажного провода, соединяющий два печатных проводника между собой в тех случаях, когда они пересекаются третьим монтажным проводником.

Базовое отверстие – отверстие или углубление, расположенное на печатной плате, предназначенное для точной установки платы в процессе сборки.

Покрывание печатной платы – процесс химического, электрохимического или любого другого способа осаждения металла, полупроводника или диэлектрика на всю или часть печатной платы.

Групповая пайка – способ одновременного электрического и механического соединения всех навесных элементов на печатной плате путем одновременного воздействия припоя на все монтажные площадки.

Пробельный участок – место, на котором на готовой печатной плате отсутствует металлизация.

5.2. Материалы для печатных плат

Заготовки для жестких печатных плат представляют собой несколько спрессованных слоев стекловолокна, покрытых медной фоль-

гой (рис. 5.1). Пространство между слоями заполнено наполнителем [2]. Самый простой способ расположения стеклянных волокон – когда они перпендикулярны друг другу. При различной ориентации волокон в слоях прочностные характеристики материала становятся одинаковыми по всем направлениям. Толщина материала оценивается без учета медной фольги. Толщина фольги одинакова с обеих сторон.

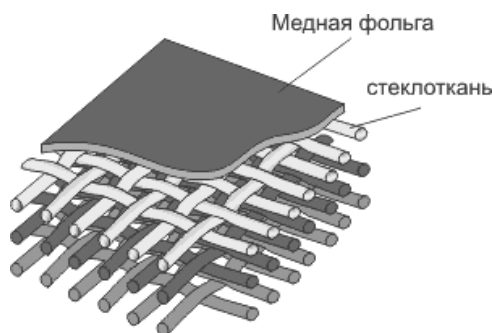


Рис. 5.1. Структура заготовки для ПП

Изоляционное основание состоит из двух компонентов:

1. Основа: бумага, стекловолокно (стеклоткань), керамика, арамид.
2. Наполнитель: фенольная смола, эпоксидная смола, полиэстер, полиамидная смола, фторопласт.

Изоляционные материалы для ПП выполняют роль диэлектрика и различаются своими электрическими, механическими и температурными особенностями (табл. 5.1).

Таблица 5.1.

Современные изоляционные материалы для производства ПП

Обозначение	Состав	Относительная стоимость	Примечание
FR3	бумага и эпоксидная смола	0,85	
FR4	фольгированный эпоксидный стеклотекстолит	1	Наиболее распространенный материал для печатных плат.
FR5	то же с уменьшенным диаметром стекловолокна	1,4	Стеклотекстолит, подобный FR4, но температура использования этого материала выше.

Продолжение табл. 5.1.

Обозначение	Состав	Относительная стоимость	Примечание
BT	бисмалеинимид-триазиновая смола со стеклом	5,3	
CE	цианат-эфир со стеклом	4,5	
CEM1	бумага с эпоксидной смолой, на которую напрессованы листы стеклоткани	0,95	Из-за бумажной основы в материале невозможна металлизация отверстий, поэтому он применяется для односторонних плат.
CEM3	стеклотекстолит, облицованный с двух сторон FR4	0,95	CEM3 наиболее похож на FR4. Материал легко сверлится и штампруется. Это полная замена FR4 и у этого материала очень большой рынок в Японии.
PD	полиамидная смола	6,5	
PTFE	фторопласт	32-78	
CHn	смесь гидрокарбоната и керамики	90	

Существует несколько разновидностей фольги, применяемой для получения заготовок ПП: электролитическая фольга, отожженная катанная фольга, тонкомерная фольга, и др. [20].

5.3. Типы печатных плат

В зависимости от назначения и от возможностей производства печатные платы выполняют односторонними, двусторонними или многослойными, на жестком или гибком основании [2].

Односторонние печатные платы (ОСПП) представляют собой изоляционное основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок. Для механической фиксации выводов штыревых компонентов в плате служат сквозные неметаллизированные отверстия, а для присоединения – контактные площадки, которыми заканчиваются

все печатные проводники. Трассировка проводников на одной стороне не позволяет разрешить конфликт пересекающихся трасс иначе, как установкой перемычек. В настоящее время перемычки часто выполняются в виде резисторов с нулевым сопротивлением.

Односторонние платы составляют значительную долю выпускаемых в мире печатных плат. Стоимость односторонних плат составляет 10-20% от стоимости двухсторонних плат, что делает их вполне конкурентными, особенно в сфере бытовой электроники.

Двусторонняя печатная плата (ДСПП) имеет одно основание, на обеих сторонах которого выполнены проводящие рисунки, и все требуемые электрические соединения двух сторон, соединяются преимущественно сквозными металлизированными отверстиями (рис. 5.2). Конфликты пересекающихся соединений здесь решаются возможностью переноса конфликтующей трассы в обход на другую сторону печатной платы с использованием металлизированных отверстий.

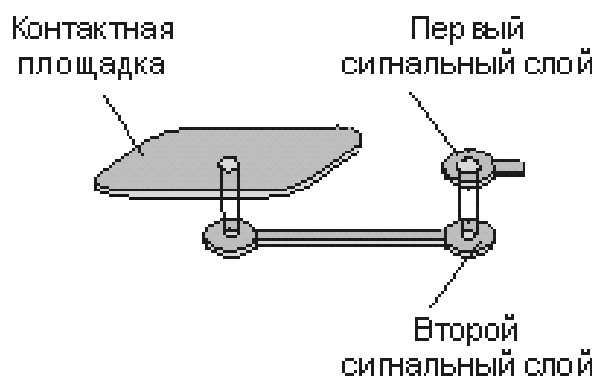


Рис. 5.2. Соединение сигнальных слоев через переходное отверстие

Многослойные печатные платы (МСПП) содержат чередующиеся слои тонких изоляционных подложек с нанесенными на них проводящими рисунками, физически соединенными в одно многослойное основание (рис. 5.3). Электрические соединения в многослойной структуре МСПП осуществляются сквозными (преимущественно) или глухими отверстиями. Каждый из внутренних слоев может представлять собой одностороннюю плату или двустороннюю с межслойными переходами.

Очень популярной в настоящее время является одна разновидность МСПП – четырехслойные печатные платы. Они содержат на внутренних слоях потенциальные цепи (питания и земли), а на внешних (наружных) слоях сигнальные трассы и монтажное поле присоединения компонентов. Конструкции четырехслойных печатных плат выгодно

выполнять так, чтобы их можно было изготавливать по технологии двусторонних, поэтому они стоят ненамного дороже двусторонних ПП.

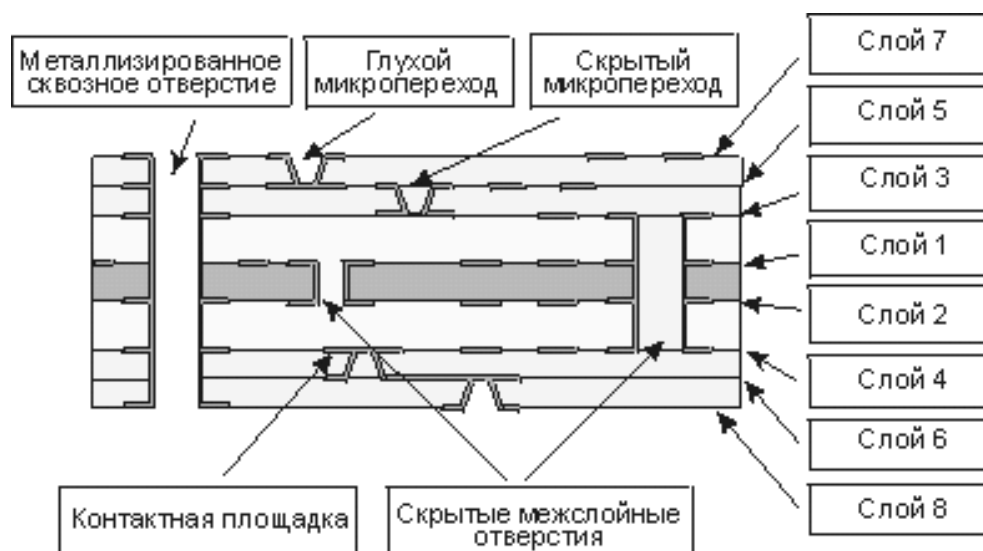


Рис. 5.3. Структура МСПП

Гибкие печатные платы (ГПП) изготавливаются на полиамидной или лавсановой пленке и поэтому могут легко деформироваться даже после формирования проводящего рисунка. Большая часть конструкций ГПП аналогична конструкциям печатных плат на жесткой основе (подробнее см. [2]).

5.4. Нанесение защитных покрытий

Для защиты участков поверхности ПП от различных воздействий применяют защитные покрытия [2].

5.4.1. Фоторезисты

Фоторезисты – светочувствительные материалы, применяемые в фотолитографии для формирования рельефного покрытия заданной конфигурации и защиты нижележащей поверхности от воздействия реагентов.

По характеру взаимодействия с излучением фоторезисты делятся на позитивные и негативные. Фоторезисты могут быть жидкими, сухими и пленочными. Жидкие фоторезисты наносят на подложку центрифугированием, напылением (пульверизацией) или накаткой валками, сухие – напылением и возгонкой, пленочные – накаткой (ламинированием). Последние имеют вид пленки, защищенной с двух

сторон тонкой пленкой светопроницаемого полимера, например, полиэтиленовой с одной стороны и полиэфирной – с другой.

Покрытие окунанием осуществляется путем погружения заготовок в кювету, наполненную фоторезистом, и вытягивания с постоянной скоростью (от 10 до 50 см/мин). Толщина слоя зависит от вязкости фоторезиста и скорости вытягивания.

При центрифугировании заготовки устанавливаются в центробежной установке горизонтально. Фоторезист растекается, и излишки его сбрасываются с поверхности заготовки под действием центробежной силы. Толщина слоя зависит от частоты вращения и от вязкости фоторезиста.

Жидкие фоторезисты после нанесения высушивают. При этом следят за отсутствием пыли: всякая грязь и пыль воспроизводятся в изображении рисунка.

При методе накатки можно наносить равномерные по толщине слои, но для этого нужны специальные сухие пленочные фоторезисты, которые бы не так быстро высыхали на валах валковой установки. Толщину слоя можно регулировать изменением скорости установки и варьированием зазоров между валами. Установка для нанесения фоторезиста этим методом называется ламинатором. В ламинаторе снимается полиэтиленовая пленка, а оставшаяся композиция сухого фоторезиста с полиэфирной пленкой нагревается и соединяется под давлением с поверхностью заготовки.

Для обеспечения избирательности экспонирования применяются **фотошаблоны**.

Обычно фотошаблоном является стеклянная пластина или лист пленки, на которую в процессе изготовления был нанесен рисунок, повторяющий расположение графических примитивов на соответствующем слое печатной платы [21]. Часто фотошаблоны имеют светочувствительный слой, при экспонировании которого формируется изображение слоя ПП. Также данное изображение может быть получено нанесением непрозрачного масочного слоя на пленку или стекло без использования фотопроцессов (трафаретной или офсетной печатью).

Фотопленки для фотошаблонов печатных плат содержат:

- полимерную основу,
- фоточувствительный слой эмульсии,
- дополнительные вспомогательные слои поддержки.

Основы из стекла не подвержены влиянию влажности. Стабильность их размеров зависит только от изменений температуры, но и при этом их температурный коэффициент расширения гораздо меньше, чем у других материалов: Примеси оксидов железа, неизбежно

присутствующие в обычном стекле, делают его непрозрачным в ультрафиолетовой области спектра, в которой должны работать фотошаблоны. Высокой прозрачностью для ультрафиолетовых лучей обладают кварцевое стекло, а также специальные увиолевые стекла.

Стекланные фотошаблоны должны обладать хорошей плоскостностью, поэтому стекланные пластины после отливки шлифуют и полируют. Чтобы придать им прочность, их делают относительно толстыми (до 6 мм). От этого они становятся тяжелыми и неудобными для ручной загрузки светокопировальных рам [20].

После экспонирования фоторезиста, покрывающего ПП, производится его **проявление и закрепление**.

Проявление скрытого изображения для негативных фоторезистов заключается в обработке фотослоя органическим растворителем. При этом участки, не подвергшиеся облучению, растворяются, а облученные участки, где при поглощении ультрафиолетового излучения происходит разрыв межатомных связей и перестройка структуры (фотополимеризация), сохраняются. В позитивных фоторезистах на участках, подвергшихся облучению, происходит разрушение структуры (деструкция) с образованием кислоты.

Дубление (закрепление) полученного при проявлении защитного слоя рисунка необходимо для повышения химической стойкости при последующих химических обработках за счет увеличения степени его полимеризации. Жидкие негативные фоторезисты для повышения химической стойкости подвергают температурной обработке или облучению ультрафиолетовым светом после проявления. Жидкие позитивные фоторезисты обычно не требуют дополнительного дубления, а для сухих пленочных фоторезистов характерным является не столько повышение химической стойкости после термообработки, сколько значительное увеличение механической прочности [22].

5.4.2. Паяльная маска

При групповой пайке печатных узлов и блоков между печатными проводниками могут образовываться перемычки припоя. Их визуальное выявление и устранение ручным инструментом вносят дополнительную трудоемкость, а случаи не обнаружения тонких малозаметных перемычек могут приводить к выходу из строя элементов.

Эффективным средством повышения надежности печатных узлов и блоков, снижения трудоемкости производства является селективная лаковая защита, наносимая на ПП до монтажа элементов. Она представляет собой пленку нагневостойкой эмали или термостойкого

сухого пленочного фоторезиста, которая наносится на ПП так, что открытыми остаются только контактные площадки и незначительная зона вокруг них, обусловленная погрешностями технологического процесса трафаретной печати или фотохимии.

Использование паяльной маски позволяет экономить припой, т.к. он не осаждается на печатные проводники во время пайки. Также паяльная маска защищает от перегрева изоляционное основание платы, которое не обладает высокой теплостойкостью при температурах пайки. При эксплуатации паяльная маска защищает ПП от воздействия влаги.

5.5. Операции химической обработки

Под **травлением** понимают химическое растворение меди (реже диэлектрика) под действием жидких травящих растворов (химическое травление).

Для травления меди применяются растворы на основе на основе хлорного железа FeCl_3 , а также на основе персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ и серной кислоты H_2SO_4 [2, 21].

Химическое осаждение металла (чаще всего химическое меднение) – это нанесение металла на поверхность без применения электрического тока.

Химическая металлизация (меднение) применяется в производстве ПП:

- для получения рисунка печатных проводников;
- для получения тонкого (3...5 мкм) подслоя меди на стенках монтажных и переходных отверстий, чтобы сделать их диэлектрические поверхности токопроводящими;
- в аддитивном методе – для получения токопроводящих участков селективным меднением (слой меди толщиной порядка 35 мкм).

Химическое меднение – окислительно-восстановительный автокаталитический процесс, в котором в качестве катализатора на начальном этапе выступает металлический палладий, а затем осажденные кристаллы меди катализируют дальнейшее выделение меди, и процесс протекает самопроизвольно. Расход палладия достигает 2 г на 100 м^2 . В качестве восстановителя меди из раствора используется дешевый и недефицитный материал – формальдегид (НСОН).

Гальванохимическое осаждение – это осаждение металлов на проводящую поверхность с применением электрического тока. Использование электрического тока существенно (более чем на порядок) увеличивает скорость осаждения металла по сравнению химической метал-

лизацией. Оптимальный подбор плотности тока при гальваническом нанесении покрытия наряду с оптимальным составом электролита обеспечивает хорошую рассеивающую способность (например, осаждение меди в металлируемых отверстиях малого диаметра) и эластичность покрытия, которая оценивается по относительному удлинению при испытаниях на разрыв. При этом все металлируемые токопроводящие поверхности должны быть соединены друг с другом и отрицательным полюсом источника постоянного тока (рис. 5.4), иначе гальванического осаждения не будет.

С помощью гальванического осаждения в технологии печатных плат осаждают не только медь, но другие покрытия, например: золото, серебро, родий, никель, олово, палладий. Назначение этих покрытий самое разное – от защитно-декоративных, с хорошей электропроводностью, стойкостью к истиранию, до технологических, обеспечивающих хорошую паяемость, защитные резистивные свойства при травлении меди в комбинированном позитивном методе [20, 21].

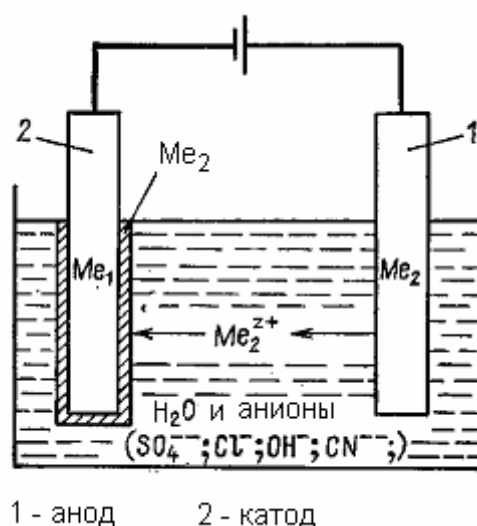


Рис. 5.4. Принцип гальванической металлизации

Основой для гальванической металлизации является водный раствор солей металла, содержащий осаждаемый материал в виде положительно заряженных ионов. Необходимые для восстановления электроны поступают от внешнего источника постоянного тока. Под действием внешнего напряжения ионы металла движутся к катоду, присоединяют электроны и осаждаются на нем как нейтральные атомы. Примером может служить восстановление меди. Заметим, что на рис. 5.4 показан принцип гальванического осаждения в упрощенной форме. Катодом яв-

ляется предмет, подлежащий покрытию, например ПП. В качестве анода преимущественно используют осаждаемый материал, реже – не растворяющийся платиновый или стальной электрод. Процессы, происходящие на аноде и катоде, имеют сложный характер. Их определяют реакции переноса, проникновения и адсорбции, которые, в свою очередь, зависят от концентрации компонентов ванны и температуры [19].

5.6. Методы изготовления ОСПП и ДСПП

Традиционно методы изготовления односторонних и двусторонних ПП принято разделять на две группы: субтрактивные и аддитивные [2].

Субтрактивные методы подразумевают получение печатных проводников путем удаления отдельных участков сплошного слоя металлизации. Субтрактивные методы наиболее освоены и распространены как для простых, так и для очень сложных конструкций печатных плат.

В качестве исходного материала используются фольгированные (в основном медью) изоляционные материалы. Некоторые из методов требуют нанесения на заготовку селективной защиты (пленки), которая обеспечивает избирательность удаления меди.

Химический метод (метод химического травления) применяется в производстве односторонних печатных плат, где присутствуют только процессы селективной защиты рисунка проводников и травливания металла фольгированных диэлектриков с незащищенных мест (рис. 5.5).

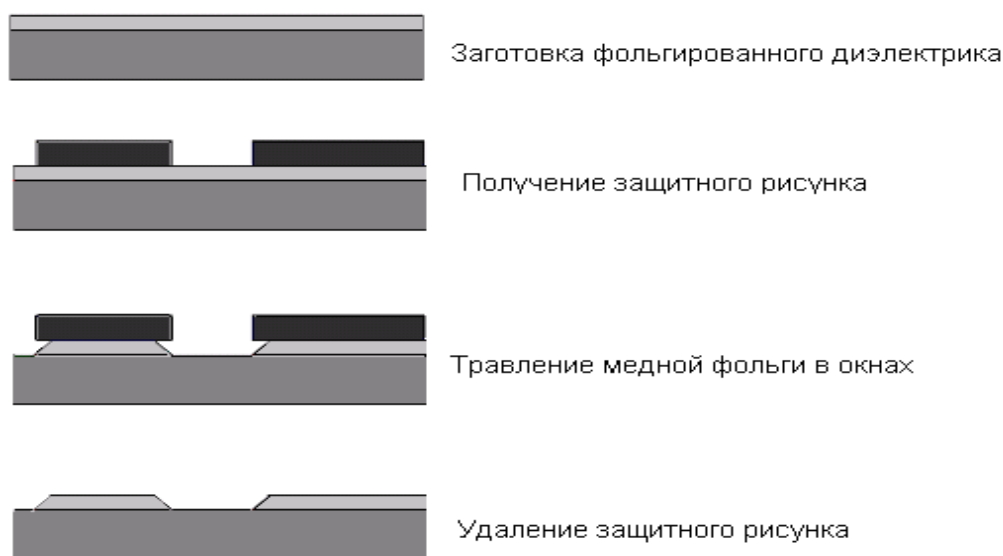


Рис. 5.5. Субтрактивный химический метод получения печатного рисунка

Механическое формирование зазоров. Вместо химического травления, изоляционные зазоры между проводниками можно формировать механическим удалением – фрезерованием (рис. 5.6). Формирование металлизированных отверстий производится механически с использованием проводников и заклепок.

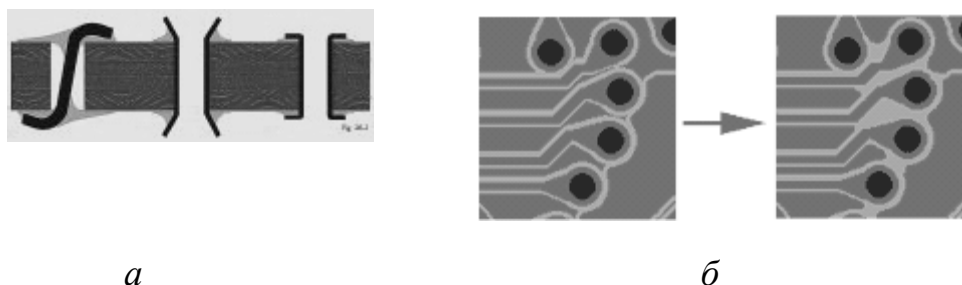


Рис. 5.6. Особенности ПП, изготовленных фрезерованием:
а – металлизированные переходы; б – печатные проводники

Для реализации переходных отверстий, помимо химической металлизации, которая производится перед фрезерованием, применяется ряд альтернативных методов: пустотелые заклепки, впрыскивание проводящей пасты, перемычки, пистоны, переходные втулки.

Поскольку сверло проходит через медную фольгу и подложку, получаемая высокая температура размягчает смолу, которая скрепляет стеклоткань. Растаявшая смола выносится из отверстия с остальными остатками сверления на поверхность подложки, где остаётся на краях недавно обработанных поверхностях отверстий в фольге. Таяние смолы также вызывает после выхода сверла неровное отверстие, на которое плохо осаждаются активирующие вещества.

Небольшие участки металлизации, оставшиеся после оконтуривания проводников, рекомендуется также удалять. Поскольку края таких островков повреждены, из-за своего малого размера они могут отрываться от поверхности ПП и вызывать различные неполадки в процессе эксплуатации.

Универсальные станки для изготовления плат подобным образом выпускает ряд фирм, таких как *Bungard*, *LPKF*, *VHF*, *Mutronic*. Данный метод пригоден для мелкосерийного или опытного производства.

Лазерное гравирование. Этот способ аналогичен механическому удалению фольги, но в данном случае вместо фрезы используется лазер. Ультрафиолетовые лазеры способны испарять медь фольги при минимальном воздействии на диэлектрическую подложку. Разрешающая способность данного метода составляет 0,05 мм. В настоящее время это оборудование слишком дорого для повсеместного использования.

Аддитивные методы предполагают использование нефольгированных диэлектрических оснований, на которые тем или другим способом избирательно наносят токопроводящий рисунок. Разновидности метода определяются способами металлизации и обеспечения ее избирательности [20].

Токопроводящие элементы рисунка можно создать:

- химическим осаждением металлов на катализированных участках диэлектрического основания (толстослойная химическая металлизация – ТХМ);
- переносом рисунка, предварительно сформированного на металлическом листе, на диэлектрическую подложку (метод переноса);
- нанесением токопроводящих красок или паст способом печати;
- восстановительным вжиганием металлических паст в поверхность термостойкого диэлектрического основания из керамики и ей подобных материалов;
- вакуумным или ионно-плазменным напылением;
- выштамповыванием проводников.

Избирательность осаждения металла можно обеспечить:

- фотолитографией;
- избирательным фотоочувствлением (через фотошаблон или сканирующим лучом) катализатора, предварительно нанесенного на всю поверхность основания (для фотоаддитивного метода ТХМ);
- трафаретной печатью (для паст и красок);
- масочные защиты (для вакуумной и ионно-плазменной металлизации).

В большинстве аддитивных методов полностью отсутствуют процессы травления, и, в этом смысле они экологически чистые, хотя другие, сопутствующие им процессы (отмывки от технологических загрязнений и растворов, избыточность растворов химической металлизации при их корректировках и т.п.) загрязняют промышленные стоки, но не в той мере, как субтрактивные технологии. Если все-таки процессы травления в них присутствуют, то их объемы настолько незначительны, что они не создают серьезных экологических проблем.

Распространению аддитивных методов мешает ряд сложностей их использования:

- нет возможности использовать высокопроизводительные процессы электрохимической металлизации элементов печатного монтажа на диэлектрическом основании из-за их электрической разобщенности.

- для всех методов (кроме чисто аддитивного процесса) затруднена металлизация отверстий;
- токопроводящие пасты имеют повышенное сопротивление (менее 50 % от сплошного металла);
- напыление через маски требует их очистки от осевших на них металлов химическим травлением, что уравнивает их с субтрактивными методами;
- штампы для тиснения металлического порошка и выштамповки проводников из фольги дорогие, так что они оправдывают себя только при объемах партии более десятков тысяч.

Эти и более подробно другие методы рассмотрены в литературе, например, [2, 20].

5.7. Методы изготовления МСПП

Процесс изготовления многослойных ПП базируется на методах изготовления ДСПП и ОСПП [20].

Метод попарного прессования. Этот метод изготовления многослойных печатных плат основан на выполнении межслойных соединений посредством металлизации отверстий по типу обычных двусторонних печатных плат.

Для изготовления МСПП используются две заготовки из двустороннего фольгированного диэлектрика. На одной стороне каждой заготовки фотохимическим способом изготавливаются схемы внутренних слоев – второго и третьего. Затем сверлятся и металлизированы отверстия межслойных переходов, со второго на первый и с третьего на четвертый слой. При электрохимической металлизации переходных отверстий для электрического соединения с катодом ванны используется фольга будущих наружных слоев. Заготовки с готовыми внутренними слоями платы спрессовываются. После прессования заготовка МСПП обрабатывается так же, как двусторонняя печатная плата, – позитивным комбинированным методом с получением металлизированных отверстий и печатных проводников на наружных слоях.

Преимущества метода является относительная простота реализации, так как он основан на обычной технологии металлизации отверстий двусторонних печатных плат. Однако прессование заготовок при недостаточной жесткости исходного материала может приводить к разрушению переходных отверстий, следовательно, к отказам соединений.

Метод послойного наращивания. Изготовление МСПП этим методом заключается в последовательном чередовании слоя изоляции и металлизированного слоя печатного рисунка. Соединения между про-

водящими элементами печатных слоев производятся гальваническим наращиванием меди в отверстиях слоя изоляции.

Изготовление платы начинается с приклейки к медной фольге изоляционной прокладки с перфорациями в местах будущих межслойных переходов. На всех операциях изготовления МСПП методом послойного наращивания эта фольга осуществляет соединение металлизировемых поверхностей с катодом гальванической ванны. На конечном этапе на ней вытравливают рисунок наружного слоя.

После изготовления металлизированных переходов и их планаризации в плоскость с диэлектриком, на поверхность межслойной изоляции полуаддитивным методом формируют печатный рисунок слоя. На изготовленный слой проводящего рисунка напрессовывают следующий слой перфорированной изоляции и через перфорации наращивают очередные металлизированные переходы. Таким образом, последовательно создаются слои проводящего рисунка и изоляции с межслойными переходами.

В качестве межслойной изоляции могут быть использованы стеклотекстолитовые прокладки с перфорациями в местах межслойных переходов или полимерные пленки, отверстия в которых химически вытравливают в назначенных местах.

Количество слоев МСПП при послойном наращивании ограничивают обычно пятью.

Преимуществом данного метода изготовления МСПП является исключительно высокая плотность монтажа, так как он дает возможность выполнения слепых межслойных переходов в любой точке платы, независимо от трассировки и местоположения межслойных соединений смежных слоев.

Ввиду строго последовательной обработки материалов данный метод имеет длительный технологический цикл. Также этот процесс требует исключительной тщательности и качества изготовления, так как любой производственный дефект, допущенный на одном слое, приводит к браку всей печатной платы.

Внедрение этого метода в серийное и даже в мелкосерийное производство затруднительно. Применение этого метода оправдано для создания аппаратуры с высокой надежностью.

Метод металлизации отверстий. Процесс изготовления МСПП методом электрохимической металлизации сквозных отверстий состоит в изготовлении отдельных внутренних слоев химическим методом, прессовании слоев в монолитный пакет, сверлении отверстий и их металлизации. При сверлении на стенках отверстий вскрывают торцы контактных площадок внутренних слоев. Соединения их друг с другом и с

контактными площадками наружных слоев получают за счет металлизации отверстий.

Ранее данный метод подразумевал использование только сквозных металлизированных отверстий. В этом случае плотность межсоединений несколько ограничена, так как каждое отверстие используется для внутреннего соединения только один раз и в то же время занимает определенную площадь на каждом слое, ограничивая свободу трассировки печатных цепей. Вводя промежуточные внутренние соединения или сквозные отверстия для групп слоев, межслойные соединения можно располагать друг над другом или только между теми слоями, где они нужны, не ограничивая трассировку печатных цепей на других слоях. Изготовление МСПП по методу, представленному на рис. 5.19, обеспечивает наибольшую свободу в выборе месторасположения внутренних соединений и путей трассировки печатных проводников, следовательно, позволяет получить максимальную плотность межсоединений.

Недостатком метода является относительно механически слабая связь металлизации отверстий с торцами контактных площадок внутренних слоев. Изготовление МСПП этим методом осложнено проблемой точного совмещения печатных слоев из-за погрешностей фотошаблонов и деформаций базовых материалов в процессе изготовления внутренних слоев и прессования. Особой тщательности требует подбор режимов прессования для обеспечения прочной адгезии пакета слоев, устойчивой к воздействию групповой пайки. Кроме этого, в процессе использования МСПП возникают трудности при внесении изменений в трассировку при ремонте плат.

В производстве МСПП используют различные комбинации перечисленных методов изготовления ДСПП, ОСПП и МСПП [2, 20].

5.8. Контроль печатных плат

Согласно требованиям системы менеджмента качества ISO 9001-2000, ГОСТ 23752–79, производство печатных плат, как и всякий другой производственный процесс, требует наличия обратной связи для его мониторинга и измерения. Инструментом, позволяющим оценить параметры техпроцесса, является контрольно-измерительное оборудование [21].

Контроль может быть следующих видов:

- работоспособности;
- диагностический;
- прогностический.

Контроль может быть разрушающим и неразрушающим (критерии деления приводятся в технических условиях), сплошным и выборочным. Необходимо определиться с тем, что контролировать в цеху, а что в центральной заводской лаборатории. Важно определиться также с объемом входного контроля поставщиков основных и вспомогательных материалов.

Методы неразрушающего контроля:

- оптические;
- электрические;
- прочие (рентгеновские, тепловизионные, радиационные).

Оборудование для оптического (визуального) контроля (контроля внешнего вида) можно разделить на три группы:

- линзы с подсветкой – используются, как правило, для определения целостности дорожек на небольших предприятиях при контроле несложных плат;
- оптические стереосистемы и микроскопы – это более сложная группа оборудования, с помощью которого можно определять не только целостность дорожек, но и качество металлизации переходных отверстий;
- автоматизированные оптические системы (АОИ – Automatic Optical Inspection) представляют собой программно-аппаратные комплексы, имеющие подвижную оптическую систему и модуль обработки видеоизображения.

Системы АОИ позволяют сравнивать полученное изображение с эталонным. Основной недостаток этих систем состоит в том, что они проверяют правильность взаимного расположения проводников только в одном слое, без учета переходных отверстий. Наибольшее распространение метод АОИ получил для тестирования внутренних слоев многослойных печатных плат (без глухих и скрытых отверстий) до их склеивания. Применение телевизионных камер, способных преобразовать рентгеновское и инфракрасное излучение в оптический диапазон, расширяет возможности данного вида контроля.

Электрический контроль параметров печатной платы предусматривает:

1. Контроль отсутствия обрывов и коротких замыканий.
2. Измерение сопротивления проводников.
3. Измерение сопротивления изоляции, которое складывается из поверхностного и объемного сопротивлений. Для измерений необходим тераомметр. Измерение проводится с помощью двух стандартных параллельных полосок металлизации, размещенных на технологическом

поле платы. Поверхностное сопротивление сильно зависит от влажности, поэтому перед его измерением плату необходимо просушить. Время (обычно не менее часа) и температура сушки оговариваются в технических условиях.

4. Контроль электрической прочности изоляции. Он может быть разрушающим (измерение напряжения пробоя) и неразрушающим (подача предельно допустимого рабочего напряжения);

5. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь и относительной диэлектрической проницаемости;

6. Измерение толщины и качества фольги в металлизированных отверстиях с помощью метода вихревых токов;

7. Измерение времени нарастания потенциала (CRT) – метод, запатентованный фирмой Luther and Maelzer, позволяет измерять электрическую емкость дорожек платы. Слишком малые CRT-значения означают обрыв дорожки, слишком высокие – короткое замыкание. Возможны и более сложные ситуации – двойные и тройные дефекты. Чтобы они не мешали, надо сначала проверить на обрывы и короткие замыкания другими способами;

8. Рефлектометрический метод – контроль волновых сопротивлений и локализация неоднородностей волнового сопротивления по результатам измерения временных характеристик отраженного импульса.

Оборудование для электрического контроля делится на две большие группы, отличающиеся методом доступа к тестируемой печатной плате: системы типа "поле контактов" ("ложе гвоздей") и системы с подвижными пробниками (Flying Prober – "летающие пробники"). Прочие неразрушающие виды контроля используют рентгеновское и другие виды ионизирующих излучений, а также тепловизионные (активные и пассивные) методы.

Среди разрушающих методов следует отметить весьма информативный металлографический анализ. В производстве обычно используют микрошлифы металлизированных отверстий, расположенных на технологическом поле печатной платы (так называемые "свидетели" или тест-элементы). Этот вид контроля рекомендуется в качестве обязательного при отработке технологического процесса, впоследствии он становится выборочным.

К разрушающим видам контроля относятся оценка прочности на отрыв проводников и металлизации в отверстиях, жесткости платы, стойкости к ударам и вибрациям и т. п.

ГОСТ 23752–79 предусматривает проведение приемо-сдаточных и периодических испытаний на влагоустойчивость, тепло- и

холодоустойчивость, устойчивость к пониженному давлению, циклическое воздействие температуры, паяемость, устойчивость к перепайкам, устойчивость металлизированных отверстий к токовой нагрузке и т. п. [21].

Испытания ПП и МСПП позволяют в условиях климатических и электрических воздействий оценить их соответствие техническим требованиям, предъявляемым к аппаратуре, и установить скрытые дефекты. Они разделяются на приемосдаточные, периодические и типовые [2].

Приемосдаточные испытания проводятся партиями не более 1000-1200 шт., изготовленными по одной конструкторской и технологической документации, и включают: 1) стопроцентный контроль габаритных и установочных размеров, внешнего вида диэлектрического основания и проводящего рисунка на соответствие конструкторской документации, величины изгиба и скручивания, правильности монтажных соединений на отсутствие обрывов и коротких замыканий; 2) выборочную проверку (3% от партии, но не менее 3 шт.) сопротивления изоляции в нормальных климатических условиях при ручном контроле и стопроцентную проверку при автоматизированном; 3) выборочный контроль (1–2 платы от ежедневной выработки) толщины металлизации в отверстиях; 4) выборочную проверку (3% от партии, но не менее 3 шт.) паяемости контактных площадок и металлизированных отверстий, а также их устойчивости к перепайкам.

Периодические испытания ПП и МСПП проводятся с целью подтверждения их эксплуатационных характеристик, правильности выполнения ТП и соответствия конструкторской документации не реже одного раза в шесть месяцев. Для контроля случайным образом выбираются платы, прошедшие приемосдаточные испытания в количестве 5 плат при опытном и мелкосерийном производстве и 10 плат при серийном производстве. В объем испытаний входят: 1) многократные изгибы ГПП (ГПП должны выдерживать пятикратный цикл изгибов радиусом $10 \pm 0,5$ мм); 2) перепайка (5–10) отверстий и (5–10) контактных площадок, проверка паяемости (1–2 платы); 3) проверка омического сопротивления металлизированных отверстий (3 шт.) и их устойчивости к кратковременной токовой перегрузке; 4) проверка в нормальных климатических условиях целостности электрических цепей и сопротивления изоляции (но не менее чем на 5 парах проводников, в том числе цепей питания); 5) контроль внешнего вида, целостности соединений и сопротивления изоляции после воздействия

климатических факторов, устанавливаемых в зависимости от группы жесткости испытаний по соответствующему стандарту.

Типовые испытания проводятся для определения эффективности внесенных изменений в конструкцию и технологию ПП. Программа испытаний составляется предприятием, изготавливающим ПП, и согласовывается с разработчиком.

5.9. Сборка печатных узлов

Основные операции по сборке печатных узлов включают в себя комплектацию элементов, устанавливаемых на плату, подготовку элементов к монтажу, установку элементов на плату и их фиксацию, пайку, и контроль готового модуля [2, 9].

5.9.1. Комплектация устанавливаемых на ПП элементов

Количество различных элементов по номиналам и типоразмерам определяется на основе спецификации, исходя из объема выпуска изделия в течение определенного периода. Закупаемые компоненты складывают на центральном складе, откуда по заявкам их доставляют на цеховой склад или участок комплектации и далее на рабочие места. В зависимости от степени развитости производства и объема выпуска предприятие может иметь автоматизированные склады, оснащенные программируемыми устройствами по размещению на стеллажах элементов, их поиску и комплектованию для различных сборочных цехов.

Комплект элементов может размещаться в ячейках тары матричного типа (рис. 5.7). Такая тара обеспечивает удобство нахождения конкретного элемента при установке его на плату как рабочим-монтажником, так и манипулятором при автоматизированной сборке. Для манипулятора тару устанавливают на программируемый стол, который перемещает ее по двум координатам и подводит под захват манипулятора определенную ячейку с элементом. При этом элементы должны быть определенным образом сориентированы в ячейке тары [9].

Дискретные SMT-элементы и ИМС небольшого размера часто выпускаются в упаковке в виде узкой пластиковой ленты, намотанной на катушку (рис. 5.8). ИМС также могут выпускаться в упаковке в виде тубуса, в котором компоненты расположены друг над другом. Такая упаковка предназначена для аппаратов автоматической установки элементов.

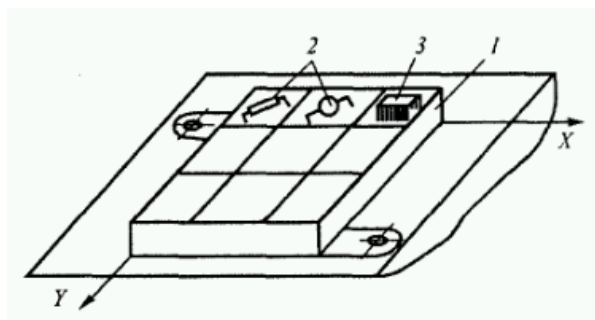


Рис. 5.7. Тара матричного типа



Рис. 5.8. Упаковка компонентов в ленты

5.9.2. Подготовка элементов к монтажу

Подготовка элементов к монтажу включает рихтовку, формовку, обрезку и лужение выводов. Рихтовка – исправление (выравнивание) формы выводов применяется, в основном, для осевых выводов. Формовка – придание определенной формы выводам (рис. 5.9).

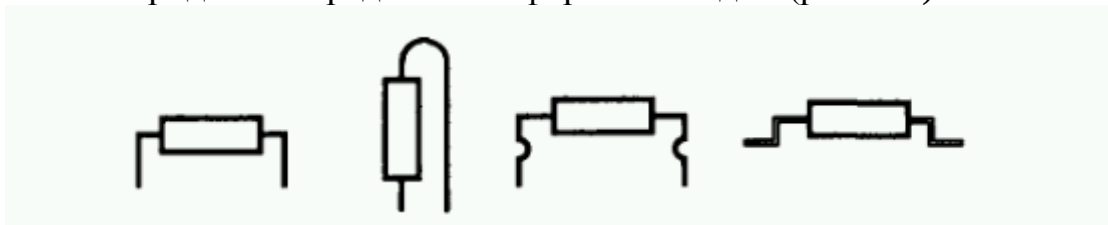


Рис. 5.9. Виды формовки выводов

Обрезка – удаление излишков выводов. Лужение выполняется в случае, если выводы компонентов не облужены при поставке [9]. SMT-

компоненты, как правило, выпускаются уже полностью готовыми к установке и пайке, и предварительная обработка им не нужна.

5.9.3. Установка компонентов на плату

В зависимости от типа производства установка компонентов на ПП проводится ручным, механизированным, или автоматическим способом.

Чтобы установленные на плату элементы не выпали или не сдвинулись со своих мест при последующей транспортировке, необходимо зафиксировать их на поверхности ПП. Фиксация должна быть легкой в исполнении, не допускать применения дополнительных элементов, выдерживать собственную массу элементов, осуществляться при обратном ходе рабочего инструмента. Существуют различные варианты фиксации элементов выводов в отверстиях плат (рис. 5.10): загибка (а), расплющивание (б), деформация (в), под действием упругих сил (г) или трения (д).

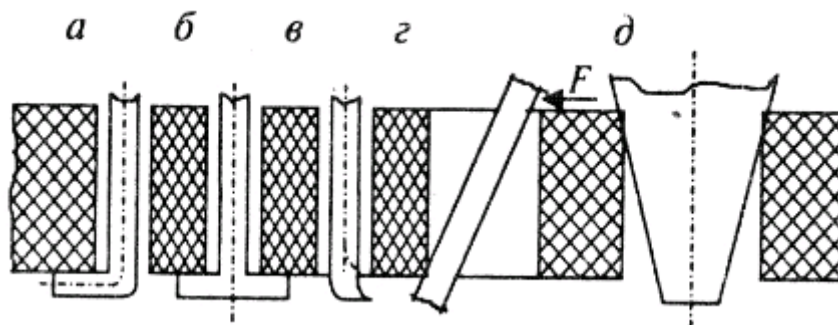


Рис. 5.10. Способы фиксации выводов

Элементы для поверхностного монтажа фиксируют путем приклейки на предварительно нанесенную паяльную пасту, на которой они устанавливаются и удерживаются [8].

Ручная установка компонентов. В условиях многономенклатурного и мелкосерийного производства часто экономически выгодно применять ручную сборку на специальных светомонтажных столах. Основные функции такого стола состоят в автоматической подаче компонентов в зону установки, и указании для данного компонента его посадочного места на ПП при помощи светового луча, а установка производится человеком.

При установке компоненты захватываются при помощи вакуумного пинцета (присоски), который удерживает компонент за счет понижения давления воздуха в зоне контакта с корпусом. Использование различных насадок пинцета позволяет устанавливать компоненты практически всех типов.

Современные светомонтажные столы программируются обучением, а также непосредственной загрузкой данных из САПР. Производительность ручной установки на современном светомонтажном столе может достигать 200 компонентов в час.

Автоматическая установка компонентов. Машины для автоматической установки работают по трем основным принципам: поочередная, поочередно-одновременная и одновременная установка компонентов.

В аппаратах поочередной установки один компонент устанавливается одной или двумя установочными головками. Поочередная установка также может проводиться при помощи револьверной головки. В поочередно-одновременной установке несколько компонентов может быть установлено одновременно. Установочные машины одновременного типа устанавливают все или возможно большее количество компонентов за один раз.

5.9.4. Пайка элементов на печатной плате

Пайка – соединение металлов в твердом состоянии путем введения в зазор расплавленного металла или сплава, взаимодействующего с основным металлом и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва [23].

Пайка производится с использованием двух веществ: припоя и флюса.

Припой – металл или сплав, применяемый при пайке для заполнения зазора между соединяемыми деталями с целью получения монолитного соединения.

Флюс – вещество, предназначенное для удаления окислов с паяемых поверхностей и регулировки поверхностного натяжения припоя.

Очень часто при пайке применяется паяльная или припойная паста, которая является смесью флюса и припоя.

Нанесение паяльной пасты. Характеристики частиц материала припоя в припойной пасте оказывают существенное влияние на качество паяного соединения [19]. Наиболее важным параметром, характеризующим припойный материал, является размер частиц. Если припойная паста наносится на коммутационную плату методом трафаретной печати, рекомендуется применять припойную пасту, у которой максимальный размер частиц припоя составляет половину размера ячейки трафарета.

Форма частиц материала припоя также оказывает существенное влияние на процесс трафаретной печати. Наилучшей считается сферическая форма частиц.

Флюс в составе припойных паст служит не только для активации контактируемых металлических поверхностей, удаления с них окислов и предотвращения окисления припоя в процессе пайки (что необходимо для создания паяного соединения), но и обеспечивает требуемую растекаемость (реологию), а также изменение вязкости со временем (тиксотропность) при нанесении припойной пасты на коммутационную плату. Если состав припойной пасты имеет недостаточную вязкость, она будет растекаться, или "расползаться", что, несомненно, приведет к потере точности рисунка, обеспечиваемой трафаретом. Считается, что больше 50% всех дефектов пайки связано с ошибками нанесения припойной пасты или несоответствии характеристик пасты требуемым условиям.

Для нанесения припойной пасты применяются два метода: диспенсорный (с помощью шприца) и трафаретный (посредством скребка) [19, 24, 25].

Пайка. Ручную пайку выполняют паяльником на монтажном столе, снабженным системой локального удаления газов. Для паяльников должны выполняться следующие требования: терморегулирование, дозированная подача припоя в зону пайки нажатием кнопки (рычага), отсос газов из зоны пайки. Монтажник должен иметь браслет на руке для снятия электростатического поля. Ручную пайку используют в опытном, ремонтном производствах, при исправлении брака и при установке небольшого числа элементов, которые невозможно припаять другими способами [9].

Пайка погружением является методом групповой пайки, так как обеспечивает одновременную пайку всех установленных компонентов. Плата с установленными элементами размещается в специальном приспособлении. Места, не подлежащие пайке, предварительно закрываются паяльной маской. На места пайки наносится флюс. Перед погружением платы в ванну с расплавленным припоем с его поверхности следует удалить оксидную (шлаковую) пленку. Существуют механические и химические способы удаления пленки и очистки поверхности. Цикл пайки следующий: плату опускают на поверхность припоя, где происходит прогрев мест пайки в течение 2...4 с, затем на приспособление накладываются колебания от вибратора в течение 3...5 с. За счет этого улучшается растекаемость припоя, и он проникает в зазор между выводом и монтажным отверстием. Частота колебаний составляет около 100 Гц, амплитуда – 0,1 ... 0,3 мм. Приспособление с платой поднимают из ванны и припой затвердевает.

Пайка погружением является производительным способом, так как при этом в приспособление можно устанавливать по несколько плат. Недостатком этого способа является сложность качественного удаления пленки с поверхности припоя, что приводит к некачественному пропаю. Кроме того, возможен и термоудар ПП, несмотря на защитную маску.

Пайка волной припоя также является методом групповой пайки. На рис. 5.11 приведена схема пайки обычной волной припоя, образуемой электромагнитным, механическим или гидродинамическим способами. Волна припоя 1 образуется вращением крыльчатки 2, которая нагнетает расплавленный припой через отверстие 3 из глубины ванны и гонит его под давлением через сопло патрубка 4, образуя волну. Печатные платы 5 с установленными на них элементами 6 проходят последовательно над волной припоя, при этом обеспечивается пайка выводов к контактным площадкам. Скорость перемещения платы должна быть такой, чтобы от соприкосновения соединения с волной и выхода из нее обеспечивалась качественная пайка; припой хорошо растекался в зазор между выводом и монтажным отверстием и не образовывались наплывы и сосульки на поверхности пайки. Платы устанавливают и крепят в специальные рамки, которые перемещаются транспортером 7. Места, не подлежащие пайке, закрываются защитной маской 8.

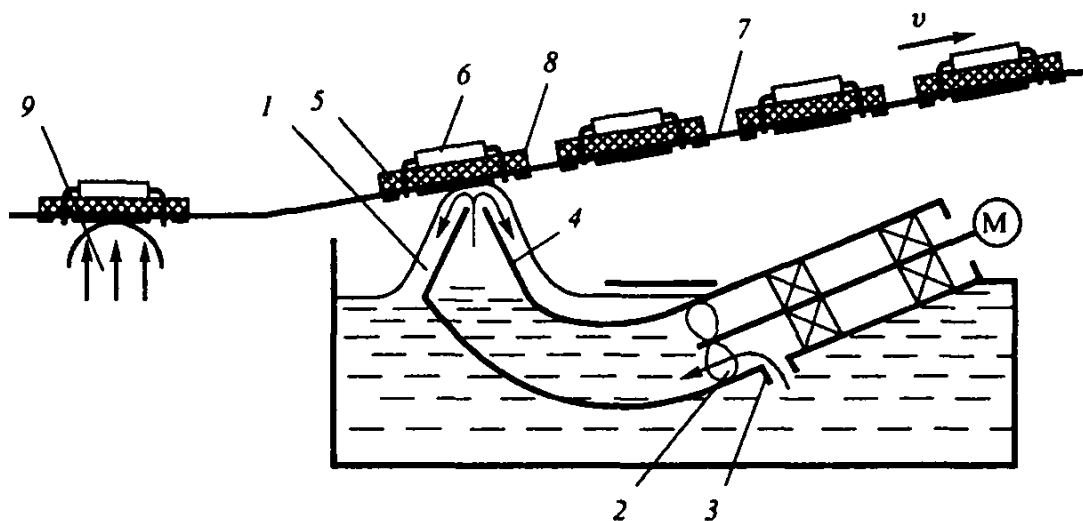


Рис. 5.11. Пайка волной припоя

Движение плат под углом устраняет выброс припоя на обратную сторону через зазоры в монтажных отверстиях и уменьшает вероятность образования припойных сосулек. Перед пайкой поверхность плат обрабатывают пеной спирто-канифольного флюса 9. После пайки остатки флюса удаляют органическим растворителем и вращающимися щетками. После очистки проводят сушку плат. Чтобы устранить окисление

припоя и поверхности пайки, пайку проводят в нейтральной среде (аргон, азот).

Рабочая часть патрубка 4 выполняется сменной, в виде различных сопловых насадок, обеспечивающих различную форму волны и скорость истечения припоя.

Некоторые установки для пайки оснащаются дешунтирующим воздушным ножом, который обеспечивает уменьшение количества перемычек припоя [8]. Нож располагается сразу же за участком прохождения волны припоя и включается в работу, когда припой находится еще в расплавленном состоянии на коммутационной плате. Узкий поток нагретого воздуха, движущийся с высокой скоростью, уносит с собой излишки припоя, тем самым разрушая перемычки и способствуя удалению остатков припоя.

Для повышения эффективности описанного метода применяют пайку двойной волной припоя. Первая волна делается турбулентной и узкой, она исходит из сопла под большим давлением (рис. 5.12).

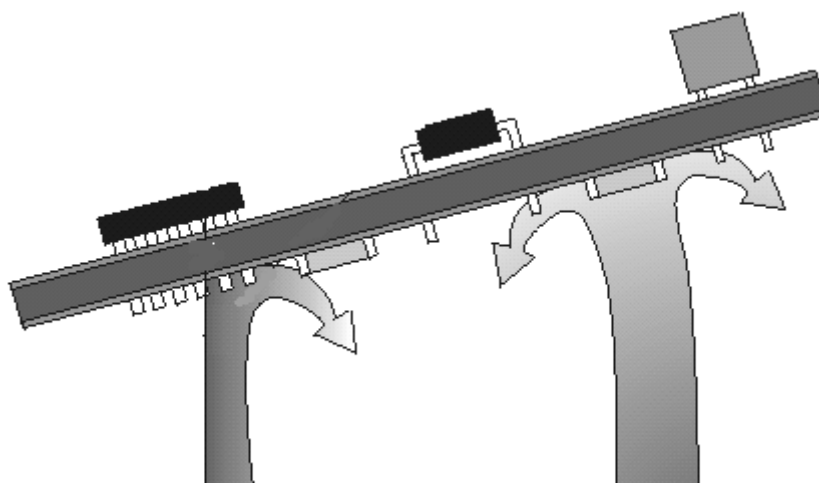


Рис. 5.12. Пайка двойной волной припоя

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 полой 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 регулируемыми. Поэтому установки для пайки двойной волной должны иметь отдельные насосы, сопла, а также блоки управления для каждой волны. Установки для пайки двойной волной рекомендуется

приобретать вместе с дешунтирующим ножом, служащим для разрушения перемычек из припоя.

Хорошо разнесенные, не загораживающие друг друга компоненты способствуют попаданию припоя на каждый требуемый участок платы, но при этом снижается плотность монтажа. При высокой плотности монтажа, которую позволяет реализовать технология поверхностного монтажа компонентов, с помощью данного метода практически невозможно пропаять поверхностно монтируемые компоненты с четырехсторонней разводкой выводов (например, кристаллоносители с выводами). Чтобы уменьшить эффект затенения, прямоугольные чипы следует размещать перпендикулярно направлению движения волны. Трудно паять двойной волной припоя транзистор в корпусе SOT-89, поскольку он имеет довольно массивный центральный вывод, что затрудняет его равномерное смачивание припоем (и растекание припоя) по всей поверхности [23].

Другие виды паек описаны в [2].

5.10. Проектирование печатных плат

Главная цель конструирования ПП – это определение оптимальной топологии рисунка печатных проводников, гарантирующего надежную, безотказную работу схемы.

Собственно процесс конструирования ПП – размещение корпусов электронных компонентов, их компоновка по определенным критериям, а затем трассировка – называют **топологическим** конструированием ПП.

При разработке конструкции печатных плат решаются следующие задачи [10].

- 1) схемотехнические – трассировка печатных проводников, минимизация количества слоев и т. д.;
- 2) радиотехнические – расчет паразитных наводок, параметров линий связи и т. д.;
- 3) теплотехнические – температурный режим работы печатной платы, теплоотвод и т. д.;
- 4) конструктивные – размещение элементов на печатной плате, контактирование и т. д.;
- 5) технологические – выбор метода изготовления, защита и т. д.

Все эти задачи взаимосвязаны между собой. Например, от метода изготовления зависят точность размеров проводников и их электрические характеристики, а от расположения печатных проводников – степень влияния их друг на друга и т. д.

Прежде всего, необходимо разобраться с понятиями компоновки и трассировки.

Как упоминалось ранее, с развитием кибернетики и вычислительной техники возникла необходимость в упорядочении терминов и определений. Существует так называемый терминологический «хаос» в этих областях знаний, который связан с использованием иностранной литературы, Интернета, неточного перевода или просто несовпадения понятий и определений в источниках информации и другими причинами.

Это касается и определений понятий размещения и компоновки.

Понятие «компоновка» имеет так называемый «классический» смысл, который приводится в энциклопедиях и толковых словарях, и первоначально он был привнесен в конструирование электронной аппаратуры.

Рассмотрим это понятие [2].

Компоновка в науке, технике, искусстве, литературе – составление из отдельных частей (компонентов) одного согласованного целого в соответствии с определенным замыслом.

Варламов Р.Г., один из известных авторов книг и справочников по компоновке и конструированию РЭА, дает следующее понятие компоновки:

«Компоновка РЭА (лат. *Componere* – складывать) – размещение в пространстве или на плоскости элементов, имеющих электрические соединения в соответствии с принципиальной схемой, и обеспечение допустимого минимума паразитных взаимодействий, которые не нарушают значения расчетных выходных параметров РЭА» [26].

Смысл этих понятий совпадает. Такой же смысл понятия «компоновка» присутствует в книгах Резевига В.Д., описывающих системы автоматизированного проектирования САПР *ACCEL EDA*, *PCAD 2001* и т. д.

В то же время в [27] дается понятие схемной компоновки. Предлагаются компоновки схем в типовые модули, не имеющие и имеющие схемную унификацию.

При использовании первого способа компоновки производится **разрезание** схемы соединения элементов на части заданного размера. Электрическая принципиальная схема устройства, например, разделяется на функционально законченные узлы, которые размещаются затем на ПП.

Второй случай, когда компоновка схем осуществляется с использованием унифицированных типовых конструкций, называется

покрытием. Пример: переход от схемы функциональной к схеме принципиальной на основе выбранной серии элементов ИМС и РЭК.

Предлагается использовать также понятие **размещение**, при котором осуществляется поиск оптимального значения некоторого критерия расположения элементов и их связей в монтажном пространстве типовой конструкции (в «классическом» смысле – это компоновка).

Для снятия противоречий и неопределенностей в терминологии в дальнейшем предлагается придерживаться следующих понятий и определений:

1. Использовать понятие схемной компоновки и конструкторской компоновки.

2. Для схемной компоновки использовать понятия разрезания и покрытия, которые определены выше.

3. Для конструкторской компоновки использовать понятия размещения и собственно компоновки.

В этом случае решение задачи конструкторской компоновки необходимо разбить на два этапа: 1) размещение; 2) компоновка.

Топологическое конструирование ПП начинается с **размещения** в области трассировки печатной платы посадочных мест для ИМС и РЭК с целью проверки достаточности площади ПП для размещения всех компонентов принципиальной схемы и последующей трассировки. На этом этапе уже можно учесть данные из ТЗ о размещении некоторых элементов в определенных позициях.

На втором этапе – **компоновке** – осуществляется перестановка (перекомпоновка) корпусов ИМС и РЭК для обеспечения минимума паразитных связей и наводок, минимума переходных отверстий, т. е. обеспечения надежного функционирования и качества ПП, и создание благоприятных условий для последующей трассировки.

При **трассировке** прокладываются линии соединений (проводники) между контактными площадками в соответствии с принципиальной электрической схемой с учетом геометрических (технологических) размеров и электрических соединений.

Процесс топологического конструирования является в общем случае процессом постепенного приближения к результату. Компоновка и трассировка многократно корректируются в поисках наилучшего решения.

Критерием наилучшего решения служит правило **двух минимумов**: при топологическом конструировании ПП должен быть достигнут минимум пересечений и минимум длины связей. Минимум пересечений означает и минимум переходных отверстий (для ДСПП и

МСПП). Это требование обычно обеспечивает технологичность по минимуму числа слоев, скорости обработки ПП (за счет уменьшения количества отверстий) и другие преимущества.

Минимум длины связей означает максимум связей между соседними элементами и имеет значение для электрических схем в зависимости от быстродействия и частотного диапазона.

Предварительное размещение перед компоновкой является самостоятельной процедурой и осуществляется для расчета предельного числа корпусов ИМС и РЭК с учетом норм компактного размещения и занимаемых площадок посадочных мест.

В процессе компоновки целесообразно сначала выполнить правило минимума длины связей, при этом рядом с разъемом разместить те ИМС, которые с ним связаны, и таким образом ограничить длину проводников, по которым поступают входные и выходные сигналы.

После этого выполнить правило минимума пересечений, анализируя скопления пересечений связей, проведенных по кратчайшему расстоянию (по евклидовой метрике).

Последний вариант компоновки является основой для получения сборочного чертежа ПП, но последний вариант можно получить только после окончательной трассировки. В процессе трассировки компоновка корпусов ИМС и РЭК может еще изменяться.

Трассировка ПП выполняется на основе компоновочного эскиза при соблюдении конструкторско-технологических требований.

Трассировка выполняется внутри области трассировки, за границы которой не должен выступать ни один печатный проводник или монтажная площадка. По периметру области трассировки размещается краевое поле ПП, предназначенное для технологических целей. Ширина краевого поля выполняется в соответствии с определенными правилами.

Рисунок соединений состоит из графических элементов – проводников и контактных площадок. Ширина проводников и расстояния между проводниками определяется в соответствии с выбранной технологией изготовления ПП, т. е. в соответствии с разрешающей способностью технологического метода.

Регламентируется работа конструктора в процессе выполнения компоновки и трассировки координатной сеткой с шагом 2,5; 1,25; 0,625 мм. Координатная сетка – это взаимноперпендикулярные линии в прямоугольной (очень редко полярной) системе координат. Пересечение этих линий называют узлами координатной сетки. Одно из основных правил при топологическом конструировании ПП – это любые отверстия на ПП должны размещаться в узлах координатной сетки, а печатные проводники прокладываются вдоль линий координатной сетки, а изменять направления следует под определенным углом (чаще под углом 90° и 45°). Эти правила могут изменяться для

обеспечения большей свободы для трассировки, но пока они жестко соблюдаются, так как регламентированы стандартом ГОСТ 2.417-91 «Печатные платы. Правила выполнения чертежей».

Основные принципы конструирования печатных плат. Приступая к разработке аппаратуры, основанной на использовании в качестве коммутирующих элементов печатные платы, конструктор должен учитывать следующие важные факторы [2, 28]:

1. Максимальный размер печатной платы как однослойной, так и многослойной ограничен требованиями прочности и не превышает 500 мм.

В России пока не существует стандарта, ограничивающего типоразмеры печатных плат. Их размеры определяются ведомственными нормами и ОСТами. По данным этих документов максимальный размер печатной платы не должен превышать 240х360 мм (в ряде изделий для одностороннего монтажа – 500х300 мм).

2. При установке в блоки крупных печатных плат необходимо предусмотреть специальные меры по повышению их жесткости.

3. Уменьшение размеров плат, как правило, влечет за собой снижение общей площади монтажа.

4. Осуществление на печатной плате монтажа высокой плотности всегда сопряжено с большими трудностями как конструкторскими, так и технологическими.

5. Принятый способ изготовления печатной платы оказывает в известной мере влияние на все основные характеристики узла: конструкторско-технологические, технико-экономические, что вызывает необходимость обоснованного выбора материалов и метода изготовления проектируемых печатных плат.

6. Выбор оптимального способа изготовления печатной платы должен осуществляться, как правило, на эскизной стадии проектирования аппаратуры.

7. При установлении плотности печатного монтажа нужно учитывать, что основными регламентирующими факторами являются допустимые значения ширины печатных проводников и минимальных расстояний между соседними токонесущими элементами.

8. На основе проверенных на практике данных при определении габаритных размеров платы рекомендуется выбирать следующие соотношения размеров сторон: 1:1, 2:1, 3:2, 3:1.

9. Размеры разрабатываемых плат рекомендуется выбирать по ГОСТ 2417-91.

10. Рекомендуются платы толщиной 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3 мм. Толщину платы следует выбирать с учетом метода изготовления,

исходя из механических требований, предъявляемых к конструкции. Для одно- и двусторонних печатных плат толщина обеспечивается подбором материала по соответствующим техническим условиям.

11. Исходным параметром при конструировании печатных плат является шаг координатной сетки.

С помощью координатной сетки регламентируются основные геометрические параметры печатных плат.

Правила выполнения чертежей печатных плат (см. ГОСТ 2417-91) предусматривают нанесение координатной сетки в декартовой или полярной системе координат и указание размеров при помощи размерных и выносных линий.

По ГОСТ 2417-91 шаг координатной сетки в двух взаимно-перпендикулярных направлениях должен равняться 2,5 мм. Для особо малогабаритной аппаратуры, а также в исключительных технически обоснованных случаях допускается применение дополнительного шага 1,25 мм и 0,625 мм.

Схемные детали и печатные проводники размещают на координатной сетке в соответствии с принципиальной схемой.

12. При компоновке печатной платы стремятся достигнуть максимального заполнения ее поверхности навесными элементами и разместить их так, чтобы обеспечить кратчайшие связи между ними, выполняемыми печатными проводниками.

13. По краям платы с двух противоположных сторон должны быть предусмотрены технологические зоны шириной не менее 1,5...2 мм (для установки платы в приспособление при пайке и монтаже). Размещать установочные отверстия и детали в технологической зоне не допускается.

14. Элементы, имеющие большие габариты и вес (силовые трансформаторы, большие конденсаторы и др.), следует размещать вне платы, а соединение осуществлять монтажным проводом.

15. Монтажные отверстия в печатных платах служат для закрепления выводов радиодеталей и других элементов.

Центры монтажных и переходных отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки. Центры крепежных отверстий рекомендуется также располагать в узлах координатной сетки.

Центры отверстий под выводы многоконтактных навесных элементов, выводы которых не подлежат дополнительной формовке и не кратны шагу координатной сетки, располагаются по следующим правилам:

а) если в конструкции элемента имеется два и более выводов, расстояние между которыми кратно шагу координатной сетки, то центры отверстий под эти выводы обязательно располагаются в узлах координатной сетки, а центры отверстий под остальные выводы располагаются согласно чертежу на данный элемент;

б) если в конструкции элементов не имеется выводов, расстояния между которыми кратны шагу координатной сетки, то в узле сетки располагается центр одного из отверстий, принятого за основное, а центры остальных отверстий следует по возможности располагать на вертикальных или горизонтальных линиях координатной сетки.

16. Обычно диаметр отверстия берется на 0,5 мм больше, чем диаметр вывода, для обеспечения наиболее полного его заполнения припоем при пайке. При автоматизированной установке элементов зазор берется несколько большим.

17. Применение различных диаметров отверстий в одной печатной плате следует ограничивать. Не рекомендуется применять более трех различных диаметров монтажных и переходных отверстий.

18. В настоящее время актуальным является проектирование ПП с учетом потребностей электрического контроля. Основные рекомендации при этом следующие:

а) Трассировку нужно производить так, чтобы зондовый контакт контрольного (испытательного) приспособления осуществлялся только с тестовыми площадками либо площадками межслойных переходов, а не с выводами компонентов.

б) Нельзя осуществлять контроль с двух сторон платы. В случае необходимости вывода испытательной точки на требуемую поверхность платы следует использовать межслойные переходы.

в) Площадь по периферии платы должна быть свободной. Для надежного прижима испытательной оснастки к плате достаточна свободная полоса шириной не менее 3 мм.

г) Тестовые площадки не должны сосредотачиваться в одной зоне платы, поскольку плата может деформироваться во время испытаний под действием зондов.

6. ТРЕТИЙ И ЧЕТВЕРТЫЙ МОДУЛИ КОНСТРУКЦИИ ЭВМ

Модули третьего уровня конструкторской иерархии ЭВМ предназначены для электрического объединения и механического закрепления модулей второго уровня – печатных плат, а также в определенных случаях размещения, закрепления и электрического объединения с печатными платами необходимых для работы источников питания или автономных электрически вентиляторов для принудительного охлаждения и других подобных элементов схем и конструкций. Модули четвертого уровня предназначены для объединения и закрепления модулей третьего уровня.

Модули третьего уровня имеют различные названия, такие, как «панель», «блок», «кассета», «комплектный блок», «системный блок» и др.; модули четвертого уровня имеют названия «рама» – в ЕС ЭВМ, «стойка» – в СМ ЭВМ или «шкаф», «крейт» – в других типах ЭВМ.

Все они выполняют роль несущих конструкций и должны обеспечивать требуемую механическую жесткость и прочность; удобство в сборке, наладке и эксплуатации; оперативную замену вышедших из строя конструктивных элементов; минимальный вес; надежное закрепление конструктивных элементов; максимальное использование унифицированных деталей [2, 3].

6.1. Элементы верхних уровней конструкции ЭВМ

При разработке конструкции блоков, панелей и т. д. следует использовать такие конструкторские материалы и покрытия, которые отвечают предъявленным требованиям по условиям эксплуатации.

Каждый из элементов конструкторской иерархии второго, третьего, четвертого уровней характеризуется длиной L , высотой H и глубиной (шириной) B . Соотношения размеров должны подчиняться определенным правилам и закономерностям, которые устанавливают соответствующие стандарты, распространяющиеся на определенный класс электронной аппаратуры.

Для каждого уровня иерархии конструкции ЭВМ устанавливаются ряды размеров по L , H , B , каждый из которых взаимосвязан с рядами размеров других уровней с целью обеспечения прежде всего конструкторской совместимости, обуславливающей и другие виды совместимости – электрические, эстетические, тепловые. Эти ряды размеров – простые арифметические. Каждый последующий элемент

ряда образуется приращением к предыдущему принятого значения модуля [10].

Если создается конструкционная система ЭВМ, то для конкретного проектирования базовых конструкций из отдельных элементов рядов составляются оптимальные типоразмеры, среди которых выделяются предпочтительные. Главным исходным требованием при выборе типоразмера является плотность компоновки, определяемая отношением числа активных элементов (корпусов ИМС) к площади (объему) изделия или коэффициентом заполнения по объему $K_{\text{зап}}^V$, который равен

$$K_{\text{зап}}^V = \frac{\sum V_{\text{уст.дет}}}{V_{\text{изд.внутр}}},$$

где $V_{\text{уст.дет}} = V_{\text{д.физ}} + V_{\text{доп}} + V_{\text{монт}}$; $V_{\text{д.физ}}$ – физический объем детали; $V_{\text{доп}}$ – объем пространства, который нельзя занять другими деталями из-за сложной конфигурации корпусов и выводов ИМС и РЭК; $V_{\text{монт}}$ – объем монтажа детали; $V_{\text{изд.внутр}}$ – внутренний объем изделия.

Типоразмеры являются рабочим средством достижения сквозной совместимости иерархических уровней конструкции ЭВМ.

Далее приведены примеры и краткое описание модулей III и IV уровней конструкторской иерархии ЭВМ.

Панель. Являясь промежуточным элементом конструкции между ячейкой (печатной платой) и стойкой (шкафом) панель чаще всего выполняется в виде нераздельной части шкафа (стойки). Частями конструкции панели, как правило, являются основание; каркас; направляющие ячеек (ПП); ответные части разъемов (слотов) ячеек; элементы коммутации панели; элементы фиксации ячеек; элементы крепления панели в шкафу.

В качестве основания используется листовой диэлектрик (например, стеклотекстолит) или многослойная печатная плата. Толщина основания должна быть не менее 2 мм, его габаритные размеры определяются количеством ПП (ячеек) и принятым шагом их расположения. Ответные части разъемов ПП (вилки или розетки) размещаются и закрепляются в основании панели. В зависимости от технологии монтажа шины питания могут быть навесными (из медной проволоки плоской формы) или печатными. Сигнальные связи между печатными платами осуществляются навесным монтажом (накруткой), с помощью которого объединяются ответные части разъемов (штырьков разъемов), размещенные в основании панели или посредством многослойного печатного монтажа основания.

На рис. 6.1 приведен пример основания панели ЕС ЭВМ. В основании панели в данном случае размещены вилки (4) соединителя (разъема) навесного типа СНП34-135.

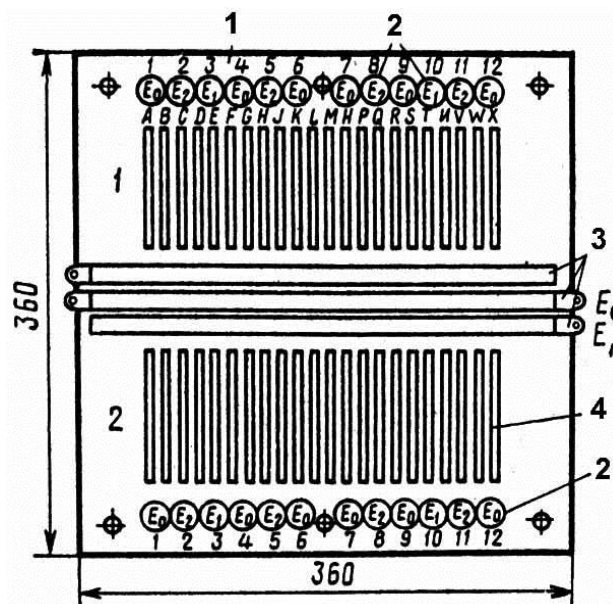


Рис. 6.1. Схема размещения элементов конструкции с монтажной стороны панели ЕС ЭВМ:

- 1 – МПП панели; 2 – узлы подвода питания E_{Π} и земли E_0 ;
3 – навесные шины питания; 4 – вилка соединителя ТЭЗ

На рис. 6.2 представлена конструкция откидной панели, которая удерживается в горизонтальном положении с помощью шарниров. Данный вариант конструкции панели используется в ЭВМ CPS-30 фирмы «Computer Signal Processors». В ней ПП (1) вставляются в ответные части разъемов (2), которые закреплены на откидывающемся основании панели (3). Электрическое соединение панели с остальными узлами машины осуществляют гибким кабелем (4).

Блок. Блок, как и панель, предназначен для электрического и механического объединения ПП (ячеек), но отличается от нее тем, что является разъемным конструктивно и функционально законченным узлом ЭВМ. Как правило, блок включает в себя одно из устройств машины, поэтому в конструкции блока должны быть предусмотрены элементы контроля, а при необходимости и элементы управления устройством, размещенном в блоке. Эти элементы, как правило, располагаются на передней панели блока (рис. 6.3). Основой служит металлический каркас (2), к которому прикрепляют переднюю панель (9) с ручкой (8), маркировкой (5) и колодкой с контрольными гнездами (7). На задней стенке каркаса размещают разъемы блока (3) и винт

фиксирующего устройства (4). Боковые стенки каркаса профилированы под направляющее (6), а в нижней части блока находятся ответные части разъемов (10). В блок может быть установлено до 28 ПП (1) в два ряда.

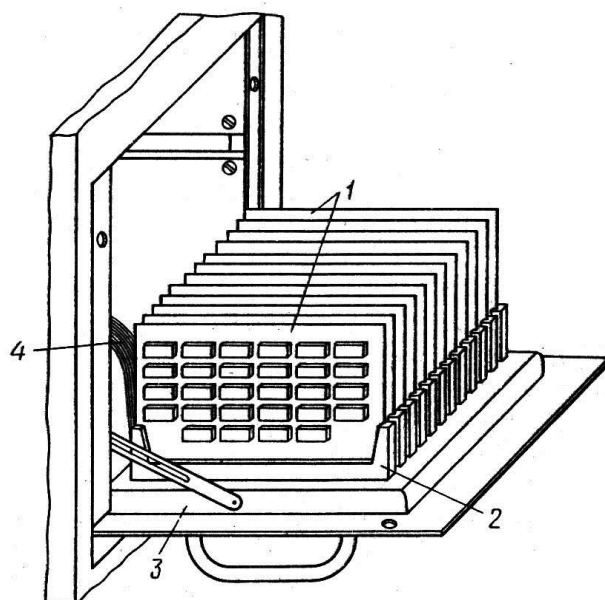


Рис. 6.2. Конструкция откидной панели

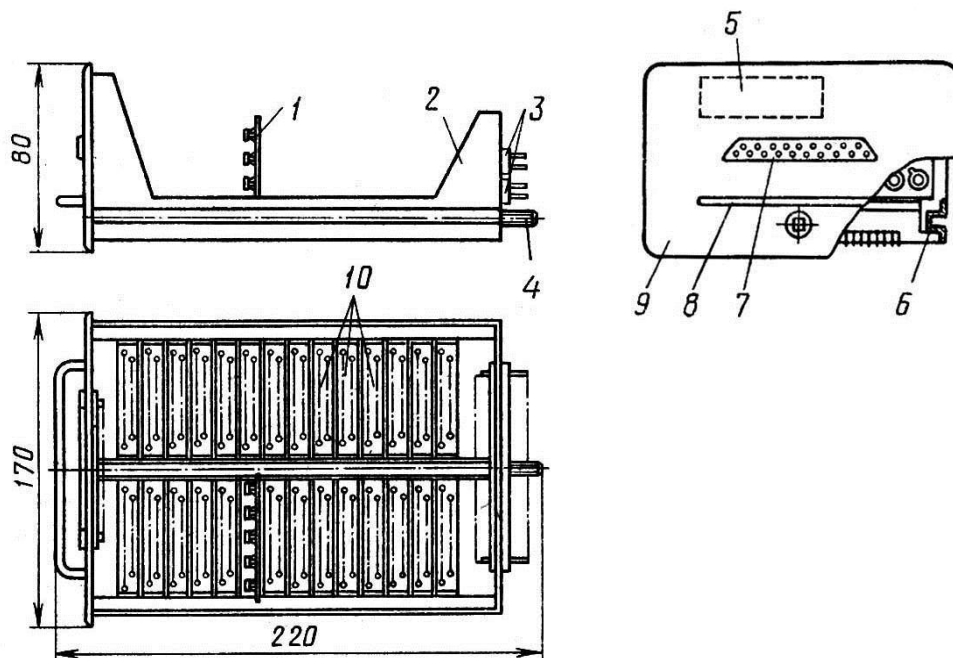


Рис. 6.3. Пример конструкции блока, соединяющего до 24 ячеек

Стойка (шкаф). Стойка является модулем четвертого уровня конструкторской иерархии ЭВМ. Она является несущей конструкцией, предназначенной для электрического и механического объединения модулей третьего уровня иерархии блоков. Стойка (шкаф) также должна быть типовым элементом, как ПП, панель, блок и т. п. При конструировании стойки (шкафа) необходимо учитывать все требования к ЭВМ.

В стойках (шкафах) устанавливают, как правило, блоки питания и основные элементы, обеспечивающие тепловой режим, например вентиляторы. Стойки также выполняют функции защиты оборудования от внешних воздействий и поэтому являются закрытыми конструкциями.

Основой стойки служит несущий каркас, состоящий из сварных рам, соединенных сваркой и болтами. Каркас и все силовые детали стойки изготавливают из профилированного проката стали квадратного сечения. Сверху стойку закрывают решеткой и обшивкой. У основания стойки установлены регулируемые опоры. Боковые стороны стойки зашивают металлической обшивкой.

Лицевой стороной стойки являются лицевые панели блоков. Стойка может иметь заднюю дверь. Шкаф, в отличие от стойки, обязательно имеет переднюю и заднюю двери. В шкафах для объединения панелей используют рамы, которые могут быть подвижными и неподвижными.

Стойки (шкафы) соединяют между собой с помощью коаксиальных кабелей. Отметим некоторые основные правила конструирования стоек (шкафов):

- 1) общая масса аппаратуры, размещенной в стойке, не должна превышать 500 кг;
- 2) дверцы шкафа не должны открываться на угол, больший чем 90°;
- 3) все дверцы стойки (шкафа) должны быть электрически связаны с рамой (каркасом стойки);
- 4) мощность потребления аппаратуры, установленной в стойке, не должна превышать 3 кВт при принудительном охлаждении и 200 Вт при естественном охлаждении (рабочая температура 10–40°);
- 5) блоки, установленные с массой меньше 20 кг, рекомендуется располагать сверху или крайних вертикальных рядах;
- 6) приборы и блоки, масса которых превышает 20 кг, рекомендуется располагать в нижней части стойки;
- 7) размер стойки в глубину не должен превышать 1 м;
- 8) ячейки (ПП), модули, блоки, субблоки следует располагать так, чтобы они равномерно обдувались движущимися потоками воздуха.

На рис. 6.4 представлена конструкция стойки СМ ЭВМ. В стойке размещаются комплектные блоки (1), элементы системы питания и вентиляции. Стойка снабжена специальными направляющими (5), позволяющими осуществлять плавное перемещение комплектных блоков в стойке, сетевым коробом (4), в котором размещены кабели, сетевые фильтры электропитания и розетки (3). Для произвольного размещения комплектных блоков предусмотрены отверстия с определенным шагом по вертикали U , которые позволяют крепить направляющие в соответствии с требуемым размещением блоков. Для удобства доступа к комплектным блокам, находящимся в стойке, предусмотрены быстросъемные боковые обшивки и задняя дверь ($U = 63,6$ мм).

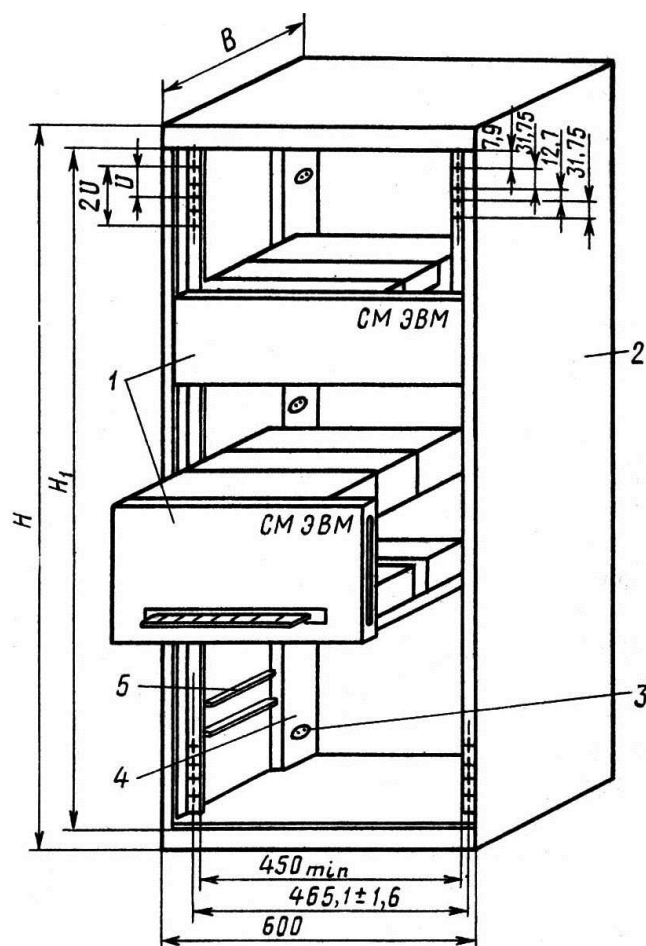


Рис. 6.4. Конструкция стойки СМ ЭВМ

6.2. Компонировка внутренняя и внешняя

Основная задача компоновки электронной аппаратуры – выбор форм, основных геометрических размеров, ориентировочное определение веса и взаимного расположения в пространстве любых элементов. С помощью компоновочного эскиза можно оценить возможный характер и причину паразитных связей и наводок.

Компоновочные характеристики: геометрические размеры, вес, мощность источников питания, время работы и условия работы оператора, а также различные коэффициенты, связывающие электрические параметры с механическими.

Факторы, определяющие компоновку. Известны два вида компоновки: *внутренняя* и *внешняя*.

Внутреннюю компоновку еще называют функциональной. На функциональную компоновку влияют следующие факторы: 1) принципиальные электрические связи; 2) геометрические размеры корпусов, форма и размеры выводов; 3) паразитные связи между элементами; 4) соблюдение тепловых режимов. При этом необходимо учитывать ряд специфических требований технического задания.

На внешнюю компоновку влияют две группы факторов под условным названием «оператор» и «объект» [9].

Сущность внешней компоновки, учитывающей группу факторов под названием “оператор”, заключается в согласовании “параметров” оператора с объектом и изделием: расположение органов управления и контроля, соответствие их требованиям инженерной психологии и эргономики. Имеется в виду выбор размеров, веса и форм отдельных приборов, расположение их органов управления, регулировки и контроля, количество и качество информации на индикаторах, экранах и т. п., оцифровка шкал, выбор количества делений на них, форма и размеры обозначений шрифтов, а также их цвет и контрастность. Учет «зоны комфорта» оператора – освещение, температура, вибрации.

К группе факторов под названием «объект» относятся не только соответствующие параметры объекта (самолет, лаборатория и т. д.), но и параметры окружающей среды (температура, давление, влажность, пыль, испарения, вибрации и т. п.).

Основная задача компоновки электронной аппаратуры состоит в том, чтобы выбрать оптимальное расположение элементов с точки зрения их функциональных связей и обеспечить при этом максимальное использование рабочего объема изделия.

Методы решения компоновочных задач для электронной аппаратуры представлены в [2, 9, 20].

Далее рассмотрим монтаж и компоновку модулей второго уровня в системном блоке IBM PC [2].

Системный блок *IBM PC* – это модуль III уровня конструкторской иерархии ЭВМ. Разработкой системного блока в данном случае заканчивается конструирование персонального компьютера. В таком блоке может быть установлена одна ПП и ряд соединений (от 4 до 8) для ячеек наращивания (контроллеров, адаптеров и др.). Таким образом, персональный компьютер комплектуется в базовом комплекте в одном системном блоке.

Применяются в основном два способа монтажа ячеек (печатных плат) в системном блоке – на основе кроссплаты и с магистральным соединителем, устанавливаемым на базовой ячейке.

Монтаж на основе кроссплаты (*Crossplate* – плата с пересечением печатных проводников) показан на рис. 6.5.

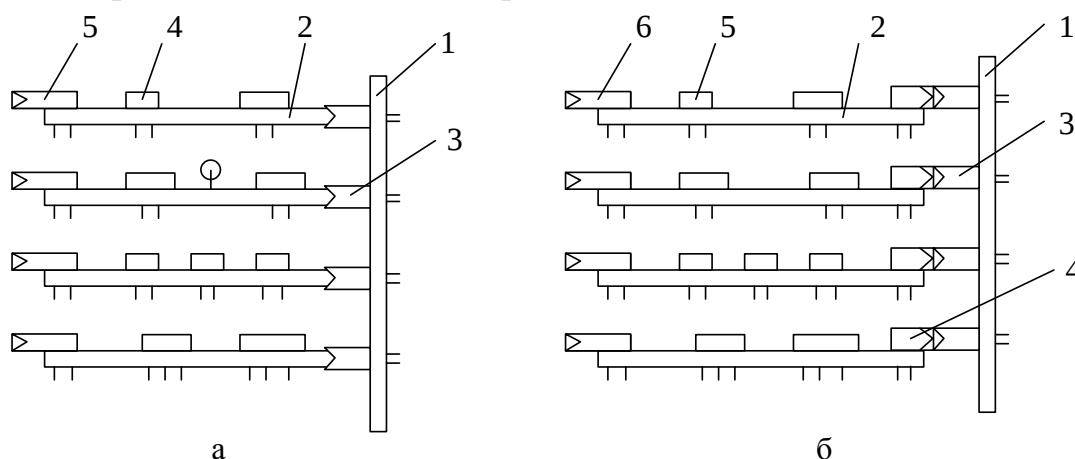


Рис. 6.5. Монтаж на основе кроссплаты:

а – компоновка ячеек с магистральным соединителем печатного типа:

1 – кроссплата; 2 – печатная плата; 3 – соединитель магистральный – розетка с печатной вилкой; 4 – элементы: ИМС, R, C и др.; 5 – соединитель интерфейсный внешний;

б – с магистральным соединителем объемного типа:

1 – кроссплата; 2 – печатная плата; 3 – соединитель магистральный – розетка; 4 – соединитель магистральный – объемная вилка; 5 – элементы: ИМС, R, C и др.; 6 – соединитель интерфейсный внешний

На кроссплате организуется шинная магистраль, на которой устанавливаются соединители-розетки с определенным шагом. Печатные платы одного (модульного) типоразмера входят в базовый состав ЭВМ. Весь комплект ячеек помещается в каркас (частичный корпус), снабженный механическими средствами объединения и закрепления этих ячеек (ПП).

На рис. 6.6 представлены компоновка и монтаж ПП расширения на базовой (материнской) плате. Монтаж на основе базовой (материнской) ячейки (ПП) заключается в том, что базовая ячейка компоуется на большой печатной плате произвольных размеров. На этой плате организуется шинная магистраль, вместе с ней на этой ПП размещаются все элементы базовой конструкции ЭВМ – процессоры, память, интерфейсы и т. п.

Печатные платы наращивания в количестве 4...8 штук устанавливаются различными способами. Установку этих ПП предлагается делать потребителю по мере возникновения необходимости в них.

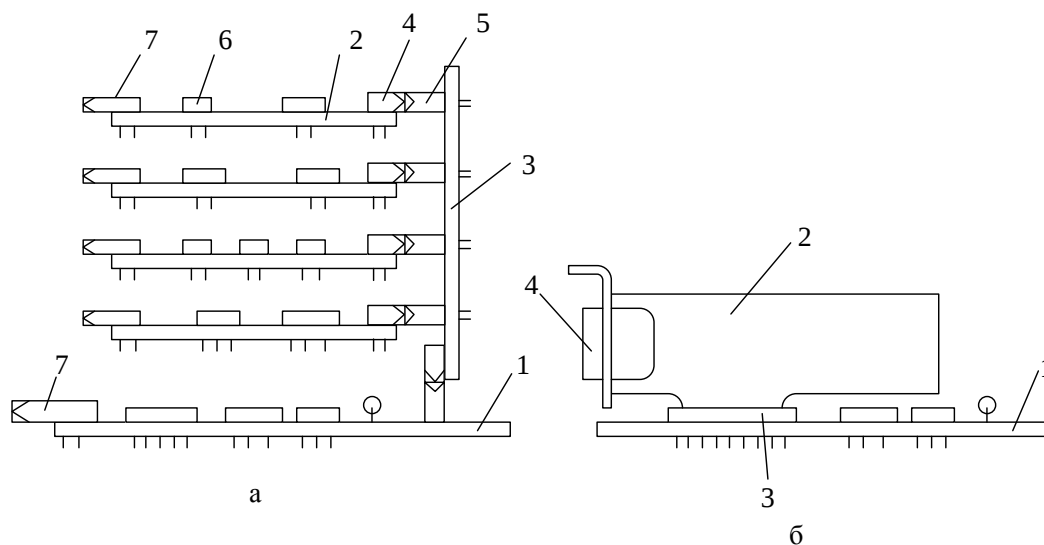


Рис. 6.6. Компоновка ПП (ячеек) на базовой (материнской) печатной плате:

а – с применением кроссплаты:

1 – базовая печатная плата; 2 – печатная плата расширения; 3 – кроссплата; 4 – магистральный соединитель – объемная вилка; 5 – магистральный соединитель – розетка; 6 – элементы: ИМС, R, C и др.; 7 – соединитель интерфейсный внешний;

б – без кроссплаты, с магистральным соединителем, устанавливаемом на базовой ячейке:

1 – базовая печатная плата; 2 – печатная плата расширения; 3 – магистральный соединитель – розетка; 4 – соединитель интерфейсный внешний

6.3. Примеры конструкций ЭВМ

6.3.1 Конструктивная иерархия ЭВМ фирмы IBM

Эта машина имеет 5 уровней: многочиповые модули, печатные узлы, блоки, каркасы и шкаф (рис. 6.7) [29].

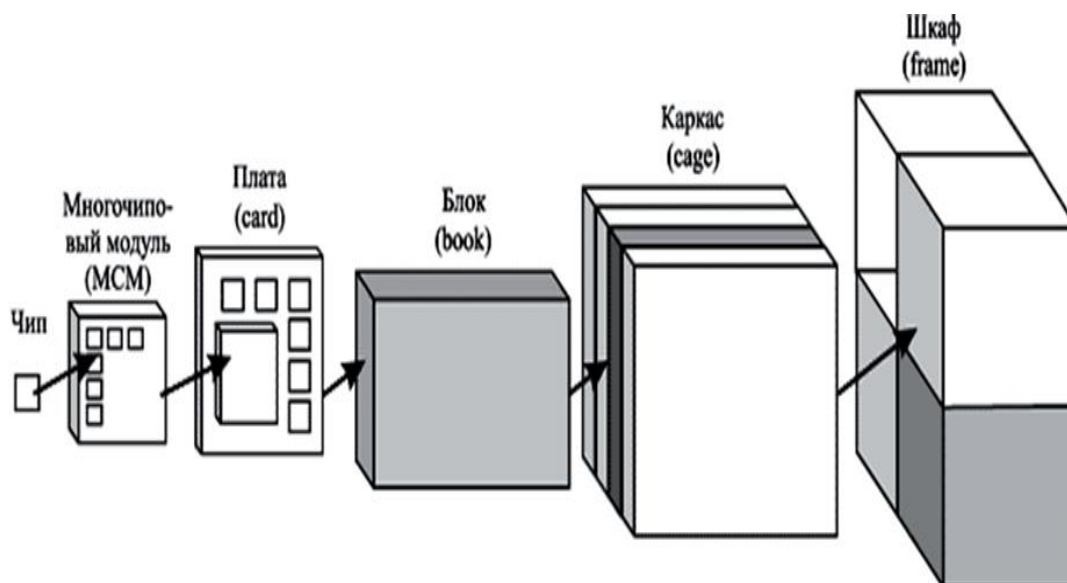


Рис. 6.7. Общая конструкция машины IBM

Первый уровень – многокристальный (многочиповый) модуль МСМ. МСМ представляет собой многослойную подложку, на которой размещается необходимый набор чипов, а межсоединения выполняются в нескольких низлежащих слоях.

Слои межсоединений реализуются с использованием стеклокерамических подложек, обеспечивающих задержку распространения сигналов 7,8 нс/м.

В каждом слое межсоединений используется сигнально-потенциальное звено, состоящее из двух слоев ортогональных сигнальных (X, Y слои) и слоя питания или земли.

В нижней части МСМ устанавливается разъем с количеством контактов до 5184.

Нагревание МСМ контролируется несколькими термисторами с использованием охлаждающей системы.

Процессорный чип z990 имеет размер 14,1×18,9 мм и содержит 122 млн. транзисторов, для чипа кэш-памяти SD эти параметры равны соответственно 17,5×17,5 мм и 521 млн. транзисторов.

На рис. 6.8 показан многокристальный модуль S390 G5.

S390 G5

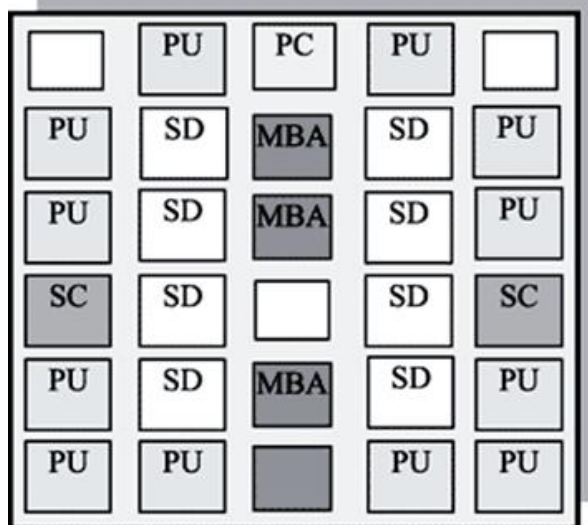


Рис. 6.8. Расположение чипов в модуле МСМ:

PU – процессорный чип; SD – чипы КЭШ-памяти L2;

SC – системный контроллер, MBA – адаптер памяти,

MSC – контроллер памяти

В других версиях машины *IBM* на первом уровне используются более быстродействующие чипы (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Технические характеристики МСМ

Модель	Число чипов/число выводов	Число процессоров	Частота (MHz) / напряжение (в) процессора	Мощность (вт)	Число тонко-пленочных слоев межсоединений	Число керамич. слоев	Общая длина межсоединений МСМ (м)	Размер (мм)	Интегральная технология (чм)
S390 G5	29/4224	12	500/2,0	800	6	75	600	127×127	0,25
S390 G6	31/4224	14	637/2,0	900	6	87	640	127×127	0,22
z900	35/4224	20	770/1,7	1100	6	101	920	127×127	0,18
z990	16/5184	12	1200/1,35	800	-	101	378	93×93	0,125
z890	13/5184	5	1200/1,35	450	-	101	378	93×93	0,125

Второй уровень – плата. Основой печатного узла *CEC z900* является многослойная ПП размером 553×447 мм с 10 сигнальными слоями и 24 слоями питания и земли (рис. 6.9). Модули размещаются на плате *CEC* с двух сторон, что обеспечивает более плотную упаковку.



Рис. 6.9. Конструкция печатного узла СЕС z900

Третий уровень – блок. Блок (book) содержит одну СЕС и вспомогательные системы питания, охлаждения и управления (рис. 6.10).

Для защиты от электромагнитных помех блок закрыт металлическим кожухом, имеет габаритные размеры 56×14 см и вес 32 кг.

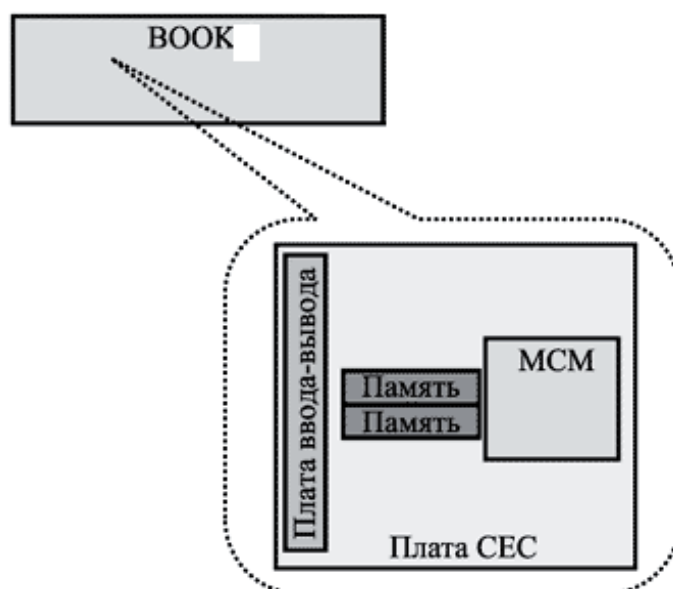


Рис. 6.10. Конструкция блока машины IBM

Четвертый уровень – каркас. Для объединения блоков используется центральная плата, имеющая с одной стороны четыре слота для подключения до четырех блоков СЕС, а с другой – до восьми слотов для установки вторичных источников питания (рис. 6.11).

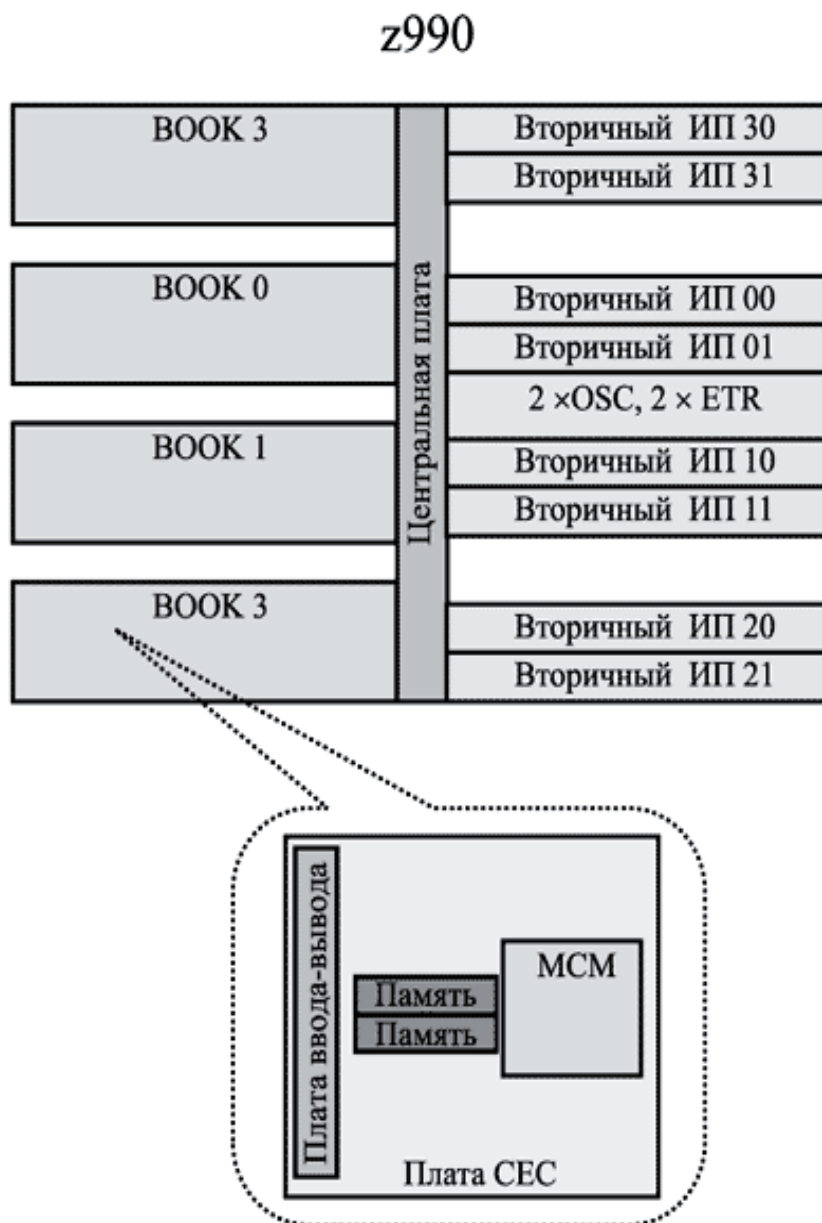


Рис. 6.11. Конструкция каркаса z990

Пятый уровень – шкаф. В состав сервера входят два шкафа (рис. 6.12). Габаритные размеры равны 154×158×194 см, а вес – 790 кг (А) и 767 кг (Z).

В шкафу Z располагаются первичные источники питания, формирующие постоянное напряжение 350 В.

Для повышения надежности питания предусмотрено подключение сервера к двум внешним фидерам трехфазного напряжения. Постоянное напряжение 350 В разводится по шкафам для подачи на вторичные источники питания, находящиеся в каждом из каркасов.

В верхней части шкафов размещены батареи, обеспечивающие питание сервера в случае отключения внешнего питания, а также системы охлаждения блоков сервера.

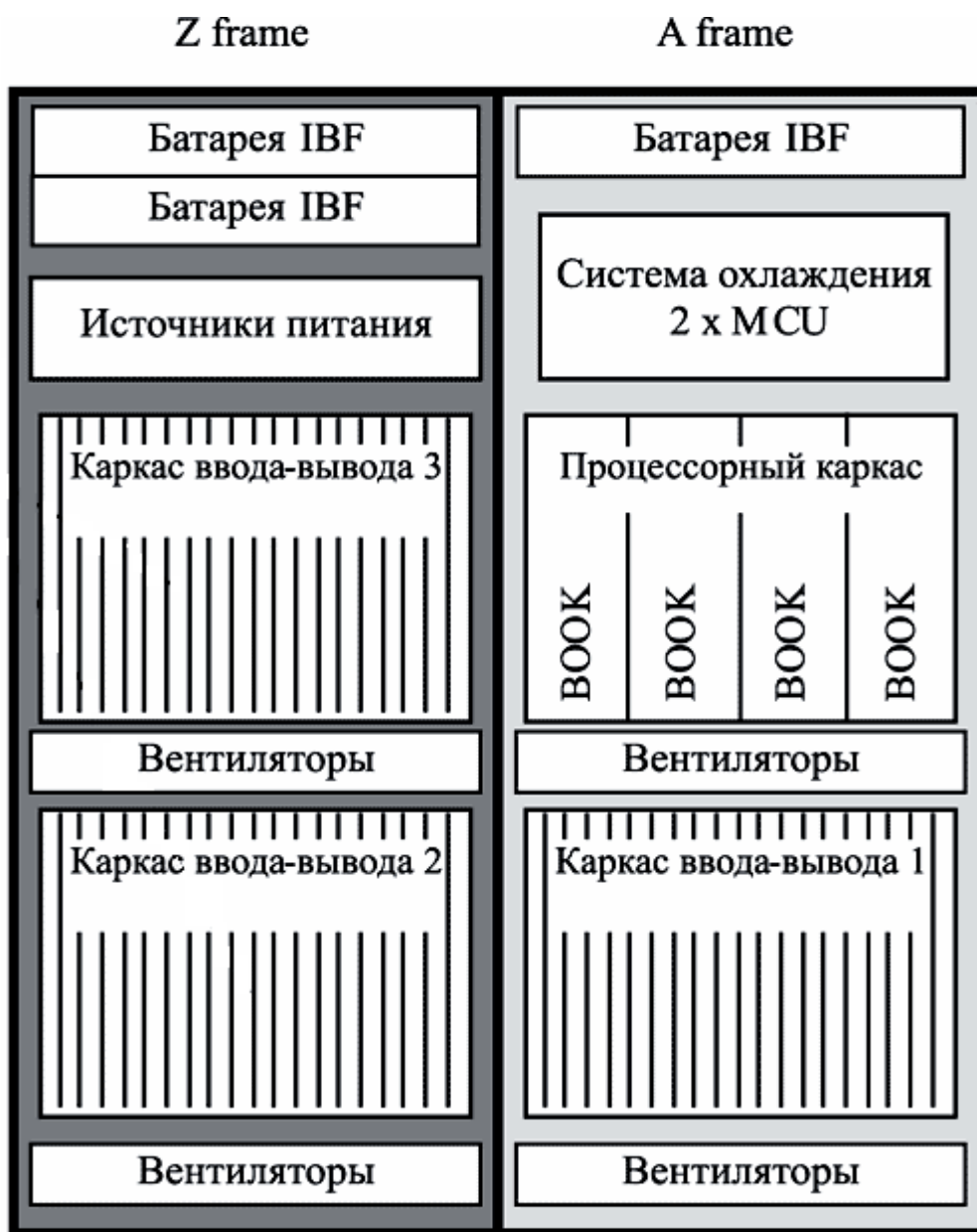


Рис. 6.12. Конструкция шкафов машины IBM

6.3.2 Устройство компьютера *Space Shuttle*

В 1970 году тендер на поставку компьютеров для космических челноков выиграла компания *IBM*. Её компьютер *IBM AP-101* (рис. 6.13), под именем *GPC* (General Purpose Computer) стал ядром компьютерной системы *Space Shuttle – DPS*.

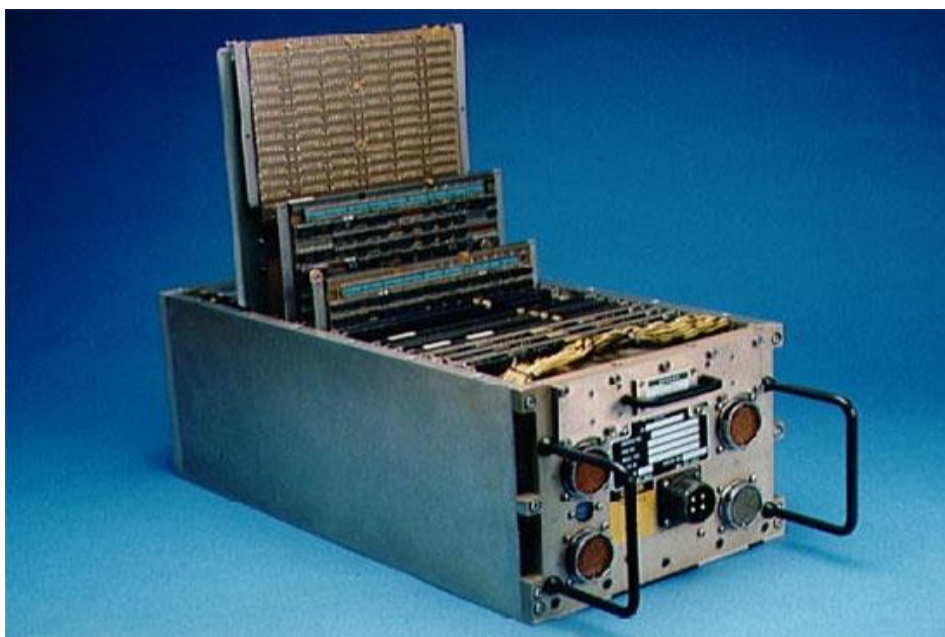


Рис. 6.13. Конструкция компьютера *AP-101*

Процессорный модуль *AP-101* был сделан на основе микросхем *TTL* средней и высокой степени интеграции, оформленных на плате-шасси, которую легко заменить в случае поломки. Процессор работал с 16 или 32-битными командами и данными в режиме целочисленных вычислений. С плавающей запятой он обрабатывал 32, 40 и 64-битные данные со средней скоростью 480 тысяч команд в секунду. Память *AP-101* первого поколения была реализована на магнитных сердечниках, то есть поддерживала хранение информации и при выключенном питании. Единицей хранения было 18-битное слово, шестнадцать бит которого использовались для команд и данных, и два бита применялись для контроля четности и защиты памяти. Всего один *AP-101* поддерживал общий объем памяти в 106496 32-битных слов, считываемых за время 400 наносекунд каждое. На борту было целых пять *AP-101*.

Компьютерная система *DPS* (рис. 6.14) неоднократно совершенствовалась. Так, в 1984 году компьютеры *IBM AP-101* были модернизированы и стали обрабатывать более миллиона операций в секунду. Память на магнитных сердечниках сменилась флэш-модулями. Появились, усиливающие автономность, аккумуляторы. Компактность и вес системы также были повышены [30].



Рис. 6.14. Компьютерная система *DPS*

6.3.3. Система Евромеханика

Система Евромеханика – конструктив, предназначенный для размещения стандартных плат, модулей (кассет) и прочих конструкций, унифицированных по высоте (*U* или *HE* (в Германии)), ширине (*TH* или *TE* (в Германии)) и глубине.

Разрабатывался на основе стандарта *ASA C 83.9* (США) как нормативный документ, определявший размеры передних панелей блоков для установки в шкафы [31]. В 1983 году стал международным стандартом МЭК 60297.

Краткий глоссарий

Конструктив – изделие, состоящее из отдельных элементов системы Евромеханика, вместе представляющих собой единую целостную механическую конструкцию. Допустимы изменения и дополнения, но без механической обработки отдельных конструктивных элементов.

Крейт (рама, корзина, субблок) – конструкция, предназначенная для установки печатных плат или модулей (кассет) с последующей их

фиксацией каким-либо способом на несущих элементах конструктива (например, винтами на резьбовых вставках профиля). Слева и справа на крейте размещены фланцы, имеющие стандартные отверстия для его крепления в стойке (шкафу). Фланцы бывают: в виде отдельных элементов ("рабочими" – для крепления конструктива и декоративными – передние фланцы) и в составе боковых стенок (выполненных в виде единого несущего элемента конструкции).

Модуль (кассета) – законченное изделие, перемещаемое по направляющим в крейт. Может иметь защитную внешнюю оболочку, например, металлическую (в этом случае, модуль называется *кассетой*). В модуль входит одна или несколько печатных плат или иных электромеханических конструкций. Внешние габариты модуля соответствуют стандартным габаритам системы Евромеханика.

Плата – печатная плата, перемещаемая по направляющим в крейт. Имеет стандартные или нестандартные габариты. На платах устанавливаются стандартные или нестандартные разъёмы ("male") для подключения к кросс-плате или кросс-шине (с установленными разъёмами "female").

Лицевая панель – прямоугольная панель из металла или пластика. Выполняет также дизайнерские и информационные функции. Чаще всего удерживает печатные платы или может являться только фальш-панелью (заглушкой). Имеет по углам отверстия для крепления в крейте.

Стойка – изделие, являющееся внешним конструктивом для крейта, причем крейт может вставляться в кожух и закрепляться в кожухе за фланцы. Внешние габариты стойки могут быть самыми различными. Стойка может наращиваться только по высоте и никогда по ширине. Стойка в настольном исполнении часто выполняется в виде отдельного прибора. Имеются варианты закрепления стойки на стене, и тогда она превращается в настенный пульт.

Конструктив Евромеханика является международным стандартом. В крейт Евромеханика могут встраиваться изделия от разных производителей. Все габариты несущих конструкций имеют необходимые допуски для обеспечения совместимости, что позволяет учитывать отклонения размеров при производстве и сборке конструктивов Евромеханика и печатных плат [32].

Базовым параметром в евроконструктивах является размер 19 дюймов (482,6 мм) – ширина передней панели крейта. Ширина крейта

измеряется в единицах TH (0,2 дюйма = 5,08 мм). Высота крейта определяется в единицах U (1,75 дюйма = 44,45 мм) (рис. 6.15).

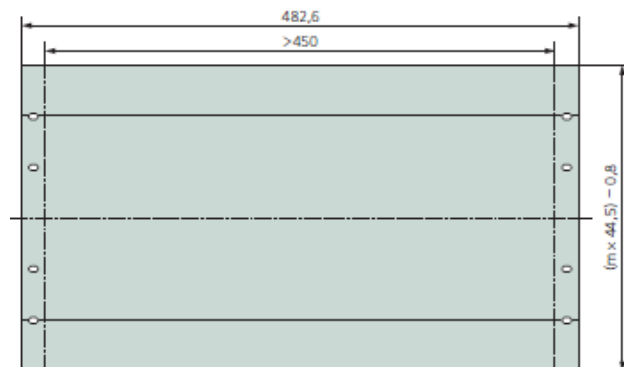


Рис. 6.15. Размеры передних панелей крейта Евромеханика (n – натуральное число из допустимого ряда)

Крейты могут быть разной высоты, но рекомендуются к применению субблоки высотой $3U$ и $6U$. Тогда размеры ПП для $3U$ – 100 мм в высоту и 160 мм или 220 мм в глубину. Глубина ПП может быть и больше с шагом 60 мм. Высота ПП может изменяться с шагом $1U$ и для типоразмера $6U$ её габариты составят $233,35 \times 160$ мм или $233,35 \times 220$ мм (рис. 6.16.).

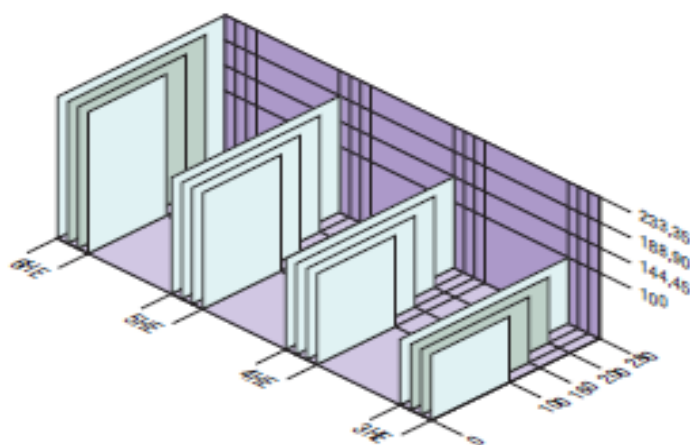


Рис. 6.16. Типоразмеры печатных плат Евромеханика

Плату размерами 100×160 мм называют Европлатой (*Eurocard*), а плату с габаритами 233×160 мм называют двойной Европлатой.

В системе Евромеханика принят интерфейс на базе разъемов стандарта *DIN 41612*. Они крепятся либо на профилях крейта, либо на ПП в один ряд для $3U$ и в два ряда для $6U$.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ЭВМ

В процессе создания ЭВМ, работающих в условиях высокого уровня помех, разработчик встречается, как правило, с большими трудностями по обеспечению надежного, устойчивого функционирования системы, если им не приняты меры по обеспечению помехозащищенности. Эти трудности возрастают при построении ЭВМ с использованием быстродействующих микропроцессорных наборов [33].

Наиболее успешная борьба с помехами возможно лишь в том случае, когда разработки электрических схем и конструкций элементов и узлов неразрывно связаны [34].

Для вычислительного устройства помеха – внешнее или внутреннее воздействие, приводящее к искажению дискретной информации во время ее хранения, преобразования и передачи.

По источнику создания помехи целесообразно разделять на помехи внешние, как правило, создаваемые внешними по отношению к рассматриваемому устройству аппаратами, устройствами, условиями эксплуатации (двигатели, электромеханические механизмы, передатчики электромагнитной энергии, удары молнии и т. п.), и помехи внутренние, обуславливаемые конкретным выполнением линий связи в рассматриваемом устройстве.

По месту проявления помехи могут быть подразделены на помехи в сигнальных линиях связи и помехи в цепях питания. Помехи в сигнальных линиях связи, в свою очередь, подразделяют на помехи в электрически коротких и помехи в электрически длинных линиях связи.

Существует и другая классификация помех [10].

Помехи могут быть классифицированы по причине наведения, характеру проявления и пути распространения (рис. 7.1).

Основные причины, вызывающие искажения сигналов при прохождении их по цепям ЭВМ, следующие:

- а) отражения от несогласованных нагрузок и от различных неоднородностей в линиях связи;
- б) затухание сигналов при прохождении их по цепям последовательно соединенных элементов;
- в) ухудшение фронтов и задержки, возникающие при включении нагрузок с реактивными составляющими;
- г) задержки в линии, вызванные конечной скоростью распространения сигнала;
- д) перекрестные помехи;

е) паразитная связь между элементами через цепи питания и заземления;

ж) наводки от внешних электромагнитных полей.

Степень влияния каждого из перечисленных факторов на искажение сигналов зависит от характеристик линии связи, логических элементов и сигналов, а также от конструктивного выполнения всей системы элементов и связей, т. е. ЭВМ.

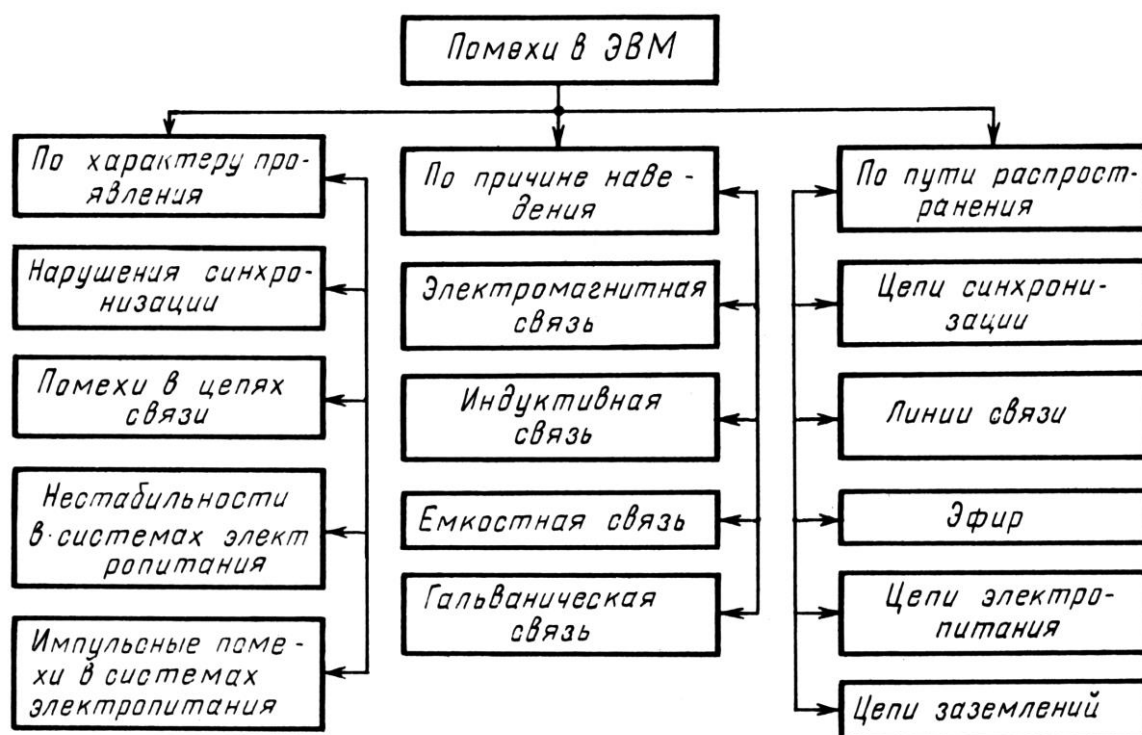


Рис. 7.1. Классификация помех в ЭВМ

Борьба с помехами приобретает все большую актуальность из-за следующих причин:

1. энергетический уровень полезных сигналов имеет тенденцию к уменьшению (повышение частоты и снижение перепада напряжений), а энергетический уровень внешних помех непрерывно увеличивается;

2. увеличение взаимного влияния элементов из-за уменьшения габаритных размеров активных элементов и линий связи между ними, а также увеличения плотности их размещения;

3. возрастание уровня помех из-за усложнения системы, в частности увеличения числа внешних устройств, которые содержат большое количество электромеханических узлов;

4. внедрение СВТ во все сферы человеческой деятельности.

7.1. Помехи в сигнальных линиях связи

Связи между элементами ЭВМ можно выполняются различными способами:

- 1) для сравнительно медленных устройств – в виде печатных или навесных проводников;
- 2) в устройствах с повышенными скоростями работы – в виде печатных полосковых линий, «витых пар» (бифиляров), в качестве обратного проводника – «земляных пластин», сравнительно большого сечения шины питания.

При группировке элементов по узлам и блокам между ними образуется большое число электрических связей, которые можно разделить на электрически *«короткие»* и электрически *«длинные»* [10].

Электрически *«короткой»* называют линию связи, время распространения сигнала в которой *много меньше* значения переднего фронта передаваемого по линии импульса.

Сигнал, отраженный от несогласованных нагрузок в этой линии связи, достигает источника раньше, чем успеет существенно измениться входной импульс. Свойства такой линии можно описать *сосредоточенными* сопротивлениями, емкостью и индуктивностью.

Электрически *«длинная»* линия связи характеризуется временем распространения сигнала, *много большим* фронта импульса.

В этой линии отраженный от конца линии сигнал приходит к ее началу после окончания фронта импульса и искажает его форму. При расчете такие линии следует рассматривать как линии с *распределенными* параметрами.

В ИМС, ячейках и модулях связи, как правило, электрически «короткие». В более крупных конструктивных единицах ЭВМ в основном электрически «длинные».

Доля «длинных» связей в машинах с ростом их быстродействия растет как следствие роста быстродействия.

В быстродействующих ИМС сверхвысокого уровня интеграции многие шины необходимо рассматривать как «длинные» связи [10].

7.2. Помехи в «коротких» линиях связях

При анализе процессов передачи сигналов электрически «короткую» линию связи можно представить в виде эквивалентной схемы, содержащей **сосредоточенные индуктивность и емкость** (омическим сопротивлением пренебрегают) [10].

Паразитную связь между двумя «короткими» линиями также можно представить как связь через **сосредоточенную взаимную емкость** и

взаимоиндуктивность.

В зависимости от геометрических размеров сечений линий, их длины, диэлектрических свойств изоляционных материалов тот или иной параметр линии может оказывать большее воздействие на процессы передачи сигнала, чем все остальные. Исходя из предположения преобладания того или иного параметра, рассмотрим влияние каждого из них в отдельности на передачу сигналов [10].

Индуктивный характер сигнальной связи. Задержку распространения сигнала в линии связи можно рассматривать как изменение формы сигнала, т. е. как воздействие помехи.

Эквивалентная схема соединения двух элементов Э1 и Э2 для индуктивного характера связи представлена на рис. 7.2, а.

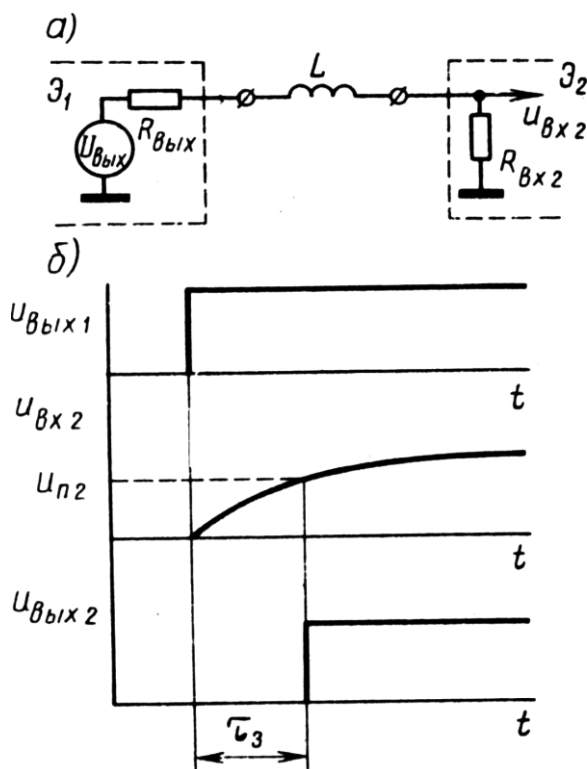


Рис. 7.2. Индуктивный характер «короткой» линии связи:

а – эквивалентная схема; б – временная диаграмма

При подаче на вход схемы ступеньки напряжения амплитудой $U_{\text{вых}1}$ состояние схемы может быть описано дифференциальным уравнением

$$U_{\text{вых}1} = u_{\text{вх}2} + [L(R_{\text{вых}1} + R_{\text{вх}2})](du_{\text{вх}2}/dt).$$

При этом напряжение на входе второго элемента

$$u_{\text{вх}2} = U_{\text{вых}1} \frac{R_{\text{вх}2}}{R_{\text{вх}2} + R_{\text{вых}1}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

$$\text{где } \tau = \frac{L}{R_{\text{вх}2} + R_{\text{вых}1}}.$$

Так как в микроэлектронных элементах, как правило, выполняется соотношение $R_{\text{вых}} \ll R_{\text{вх}}$, то

$$u_{\text{вх}2} \approx U_{\text{вых}1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \text{и} \quad \tau \approx \frac{L}{R_{\text{вх}2}}.$$

Элемент Э2 срабатывает, когда напряжение на его входе $u_{\text{вх}2}$ достигает *порога срабатывания* $V_{\text{пор}}$, т. е. с некоторой задержкой τ_3 (рис. 7.2, б). Задержка может быть определена как показано выше.

Если принять $u_{\text{вх}2} = V_{\text{пор}} = U_{\text{вых}1}/2$, то $\tau_3 \approx 0,7 \tau = 0,7 L/R_{\text{вх}2}$.

Для уменьшения задержки необходимо уменьшать индуктивность линии и увеличивать входное сопротивление элементов.

В ЭВМ третьего и последующих поколений используют элементы, время переключения (задержка) которых составляет доли и единицы наносекунд. Желательно, чтобы задержка, вносимая линиями связи, составляла малую, в худшем случае соизмеримую, часть от времени переключения элементов [10].

При **емкостном характере сигнальной цепи** (емкость включена параллельно входу Э2) получим

$$u_{\text{вх}2} \approx U_{\text{вых}1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

$$\text{где } \tau \approx R_{\text{вых}1} C.$$

Влияние емкости сигнальной связи *аналогично* влиянию индуктивности сигнальной связи и выражается в задержке включения нагруженных схем (см. рис. 7.2, б).

Комплексный характер «КОРОТКОЙ» сигнальной цепи. В реальной цепи процессы, происходящие в ней, зависят от всех её элементов.

Составим уравнение для цепи из последовательно соединенных элементов R, L, C (рис. 7.3, а)

$$u(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_c(0).$$

Операторное уравнение с учетом ненулевых начальных условий (рис. 7.3, б)

$$U(p) = I(p)R + pLI(p) - LI(0) + \frac{I(p)}{pC} + \frac{U_c(0)}{p}.$$

Отсюда

$$I(p) = \frac{U(p) + LI(0) - \frac{U_c(0)}{p}}{R + pL + \frac{1}{pC}}. \quad (7.1)$$

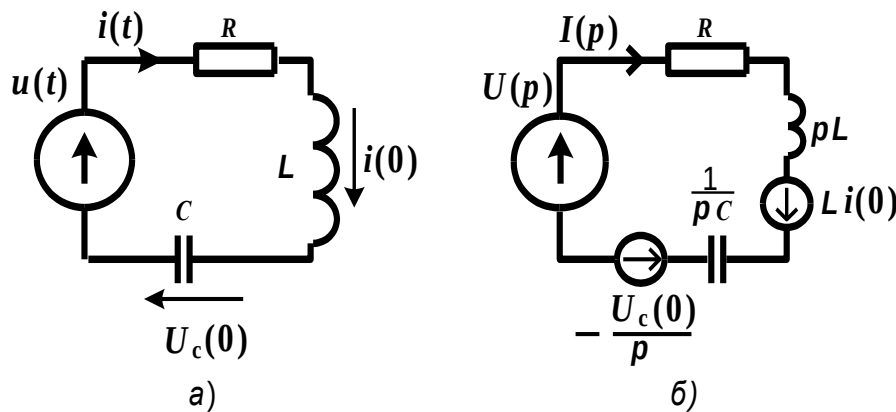


Рис. 7.3. Расчетные схемы для короткой сигнальной цепи:
а – эквивалентная схема; б – операторная схема замещения

Величина

$$R + pL + \frac{1}{pC} = Z(p)$$

называется операторным сопротивлением цепи.

Известно, что для нахождения оригинала можно использовать обратное преобразование Лапласа [35].

На практике часто используют *теорему разложения*.

Пусть имеется изображение в виде

$$F(p) = \frac{A(p)}{B(p)}, \quad (7.2)$$

где числитель и знаменатель полиномы от p .

Пусть также степень полинома числителя m меньше степени полинома знаменателя n . Далее полагаем, что (7.2) не имеет кратных полюсов, т. е. одинаковых корней знаменателя. Тогда оригинал можно найти по формуле

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{A(p_k)e^{p_k t}}{B'(p_k)}, \quad (7.3)$$

где p_k – корни знаменателя.

Выражение (7.3) и называется **теоремой разложения**.

Заметим, что для случая кратных, т. е. одинаковых, корней оригинал находится по другим формулам [35].

Для нахождения реакции, т. е. тока $I(p)$ необходимо задаться конкретным входным воздействием, например,

$$u(t) = E_0 \cdot 1(t), \quad U(p) = \frac{E_0}{p}.$$

Это означает, что к последовательной цепи через ключ подается постоянное напряжение E_0 [36].

Тогда при нулевых начальных условиях, т.е. $I_L(0) = 0$, $U_c(0) = 0$, из (7.1) получим

$$I(p) = \frac{\frac{E_0}{p}}{R + pL + \frac{1}{pC}} = \frac{E_0}{p^2 L + pR + \frac{1}{C}}.$$

Эту формулу можно преобразовать к виду

$$p^2 L + pR + \frac{1}{C} = L(p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC}) = L(p - p_1)(p - p_2).$$

Применив формулу разложения, после преобразования получим

$$i(t) = \frac{E_0}{2L\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{p_1 t} - \frac{E_0}{2L\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{p_2 t},$$

где $p_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$, $p_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\alpha = \frac{R}{2L}$.

Для напряжений на индуктивности и емкости получим [36]

$$u_L(t) = \frac{E_0}{2\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}),$$

$$u_C(t) = E_0 + \frac{E_0}{2\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}).$$

Переходные процессы в рассматриваемой цепи могут иметь *апериодический* или *колебательный* характер.

Апериодическая составляющая тока (напряжения) – составляющая электрического тока (напряжения), изменяющаяся во времени без перемены знака.

Колебательная составляющая тока (напряжения) – составляющая электрического тока (напряжения), совершающая колебания.

При условии $\alpha > \omega_0$ наблюдается апериодический переходный процесс напряжения на емкости (рис. 7.4, а).

При включении постоянного напряжения в цепи будет колебательный процесс напряжения на емкости при $\alpha < \omega_0$ (рис. 7.4., б).

Отсюда видно, что в линии без потерь принципиально существует колебательный процесс.

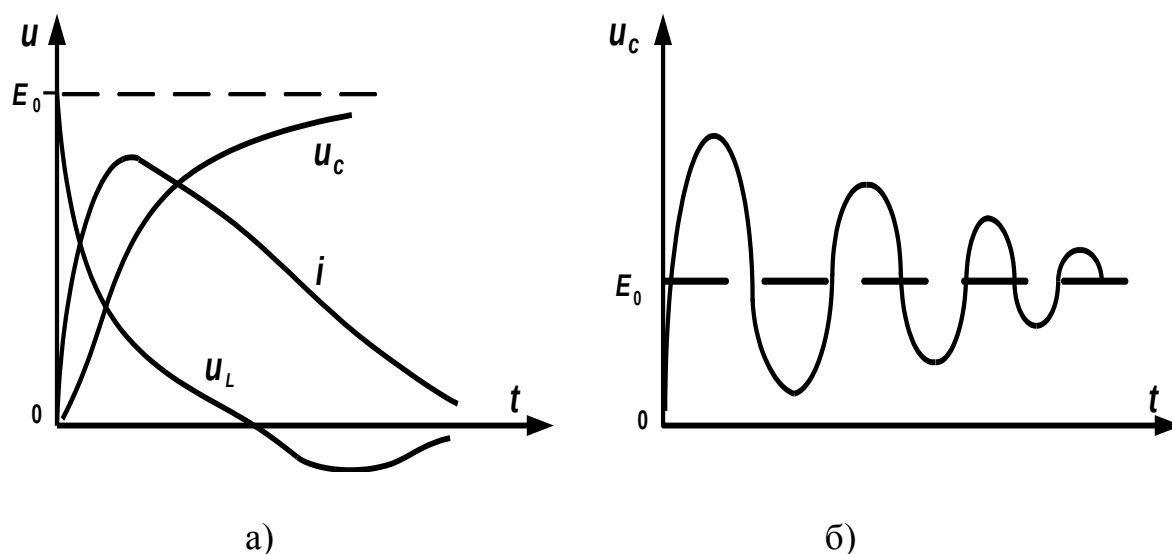


Рис. 7.4. Напряжения и токи в последовательном контуре:
а – апериодический режим, б – колебательный режим

7.3. Перекрестная помеха

Перекрестная помеха (*pickup, crosstalk signal*) – паразитная передача сигнала от одного устройства (линии) к другому (обычно соседнему).

Взаимная индуктивная и емкостная связь – причина возникновения взаимных помех в «пассивных» проводниках при передаче по «активным» проводникам импульсных сигналов.

Перекрестная помеха – одна из важнейших проблем обеспечения целостности сигнала и электромагнитной совместимости (ЭМС). В течение времени спада и нарастания сигнала в «активной» линии в «пассивной» линии возникают помехи, проявляющиеся в изменении уровней напряжения передаваемой информации и ложным срабатываниям элементов схемы [33].

При взаимодействии линий различают перекрестную помеху на ближнем к драйверу конце пассивной линии и на дальнем конце, на нагрузке.

Рассмотрим две цепи, выполненные по печатной технологии, име-

ющие общий участок l , на котором они располагаются параллельно друг другу на расстоянии d (рис. 7.5, а) [10].

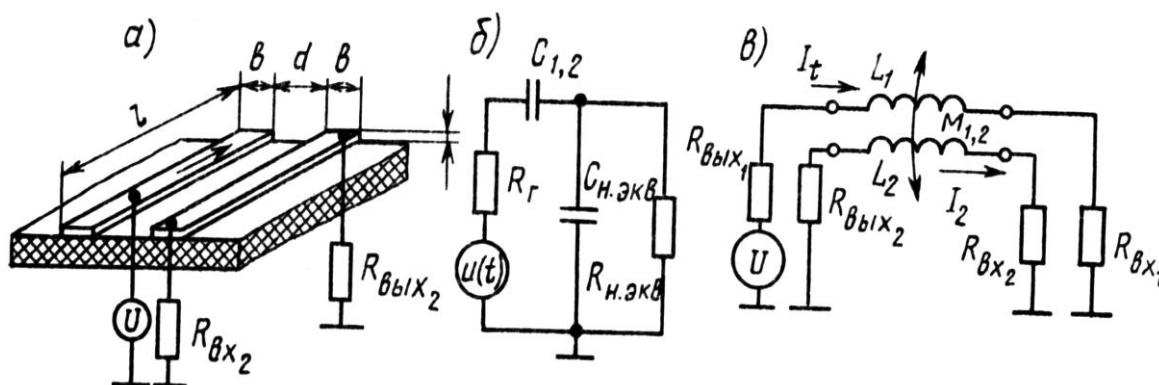


Рис. 7.5. Короткие линии связи (а) и паразитные емкостная (б) и индуктивная связи (в) между ними

На этом участке между ними имеются паразитные взаимные емкость $C_{1,2}$ (рис. 7.5, б) и индуктивность $M_{1,2}$ (рис. 7.5, в).

В общем случае эквивалентная схема связанной линии связи имеет вид, как показано на рис. 7.6.

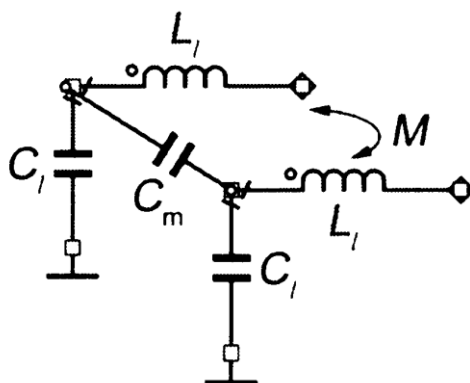


Рис. 7.6. Эквивалентная схема одной секции связанных линий передачи

В такой цепи, как указывалось ранее, возможны колебательные процессы (рис. 7.7).

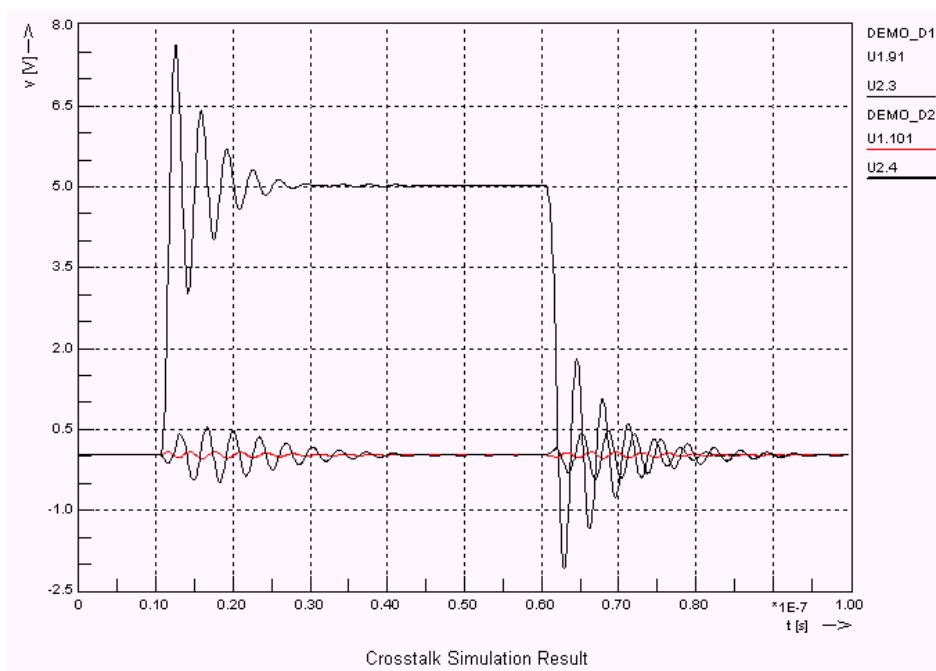


Рис. 7.7. Временная диаграмма сигнала в активной линии и перекрестной помехи в пассивной

В руководящих технических материалах по применению ИС, как правило, приводятся значения допустимых длин линий связи, при которых взаимные помехи не существенны, например в табл. 7.1 приводятся значения допустимой длины печатных параллельных проводников в устройствах на ИС ТТЛ-типа при ширине последних $(0,5 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ м [33].

Таблица 7.1

Допустимая длина $l_{\text{доп}}$, м печатных параллельных проводников при интервале между ними Δh , м

Число параллельных проводников	0,0005	0,001	0,0015	0,003	0,005
2	0,10	0,12	0,130	0,150	0,170
3	0,06	0,07	0,075	0,090	0,100
4	0,05	0,06	0,065	0,070	0,080
5	0,04	0,05	0,060	0,065	0,070

Учитывая особенности элементной базы, нетрудно понять, что для линий связи между логическими элементами КМОП-типа доминирующей оказывается емкостная взаимная связь (токи в сигнальных линиях малы), для линий связи элементов ТТЛ-типа доминирует по влиянию индуктивная помеха (зарядовая составляющая помехи оказывает малое

влияние из-за относительно больших значений собственной емкости «пассивной» линии). Поэтому с точки зрения уменьшения взаимных емкостных помех в линиях связи элементов КМОП-типа монтаж рекомендуется выполнять с использованием двусторонних печатных плат с перпендикулярным расположением проводников на их сторонах.

Способы снижения уровня перекрестных помех. В случае преобладающего влияния **емкостной** связи между сигнальными цепями для обеспечения надежной работы элементов ЭВМ необходимо уменьшать выходное сопротивление, длину связей и их сечения, увеличивать фронт импульсов и коэффициент помехоустойчивости элементов, расстояние между линиями связи, применять изоляционные материалы с хорошими диэлектрическими свойствами.

В случае преобладающего влияния **взаимной индуктивной** связи между сигнальными цепями необходимо уменьшать длину цепей связи, амплитуды токов, увеличить порог срабатывания элементов, фронт передаваемых импульсов, расстояние между проводниками связей.

В общем случае в цепи приемника возникают как емкостная, так и индуктивная помехи.

При этом **емкостная наводка** изменяет **потенциал всей линии связи**, а **индуктивная** создает **разность потенциалов между входом и выходом** линии [10].

Другими методами снижения помех являются:

1. Покрывание линий диэлектрическим материалом, что делает среду более однородной. Это может быть, например, толстая паяльная маска.
2. Переход на полосковые линии. В этом случае линии расположены в однородном диэлектрике и помехи на дальнем конце равны нулю.
3. Применение защитных трасс, расположенных между активной и пассивной линиями передачи. Разнесение линий передачи позволяет снизить уровень помех до 5 %. Для дальнейшего уменьшения часто используют защитную трассу. Но это требует корректного технического и топологического решения.

7.4. Помехи в электрически длинных линиях связи

Если между логическими элементами линия связи электрически длинная, то ее эквивалентная схема представляется распределенной однородной структурой (рис. 7.8) и связь между токами и напряжениями в любой момент времени t в точке x описывается следующей системой дифференциальных («телеграфных») уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = i r_0 + L_0 \frac{\partial i}{\partial t},$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = u g_0 + C_0 \frac{\partial u}{\partial t},$$

где C_0, L_0, r_0, g_0 – соответственно удельные емкость, индуктивность, сопротивление и проводимость длинной линии связи.

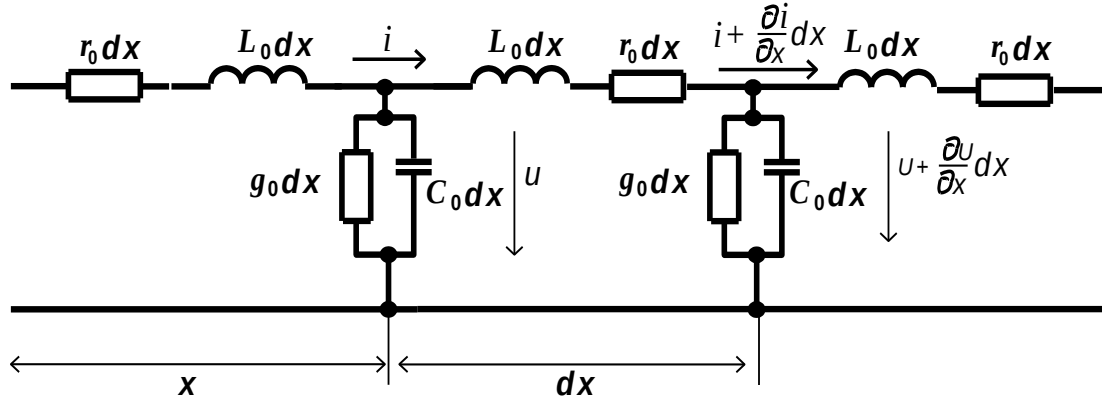


Рис. 7.8. Погонные элементы длинной линии связи

При неоднородностях в линиях связи или несогласованности сопротивлений нагрузки на концах электрически длинной линии с волновым сопротивлением линии в последней наряду с задержкой передачи сигнала $t_{зд} = l\sqrt{L_0 C_0}$ происходит искажение передаваемой информации.

Характер возникающих искажений нетрудно предсказать, если процессы, происходящие в электрически длинной линии, представлять как совокупность падающей и отраженных волн. При этом параметрами

линии являются $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ – скорость распространения прямой и об-

ратной волн; $z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ – характеристическое (волновое) сопротивление

длинной линии связи.

Из теории «длинных» линий известно, что если линия с волновым сопротивлением z_0 нагружена на сопротивление z_n , и $z_0 = z_n$, то такую линию называют **согласованной** [10].

Если $z_0 \neq z_n$, линию называют **несогласованной**.

При этом волна напряжения, достигнув конца линии, отражается от нагрузки.

Отраженная волна, достигнув начала линии, затухает при сопротивлении генератора $z_r = z_0$. Если $z_r \neq z_0$, волна вновь отражается (от начала линии).

Процесс поочередного отражения волны напряжения от обоих концов линии связи продолжается до тех пор, пока амплитуда отраженной волны не уменьшится до нуля. Отраженные волны напряжения накладываются на падающие, и в итоге форма входного напряжения может *существенно исказиться* (рис. 7.9). Аналогичные явления происходят и с волной тока. Отражения волн напряжения и тока могут быть не только от несогласованных нагрузок на концах линий, но и от различных *неоднородностей* в ней самой.

Рассмотренные процессы могут вызывать *выбросы напряжения*.

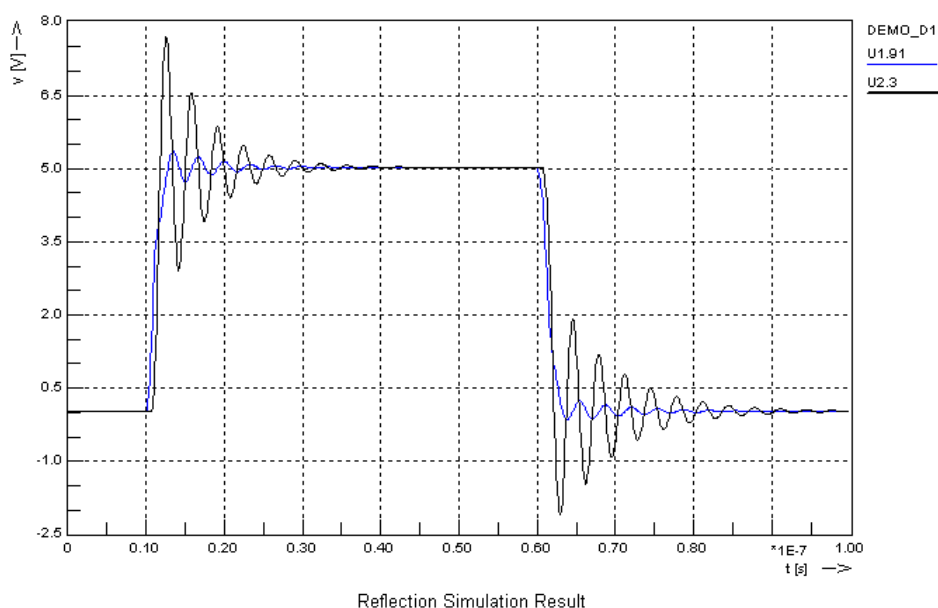


Рис. 7.9. Пример сигнала, искаженного отражениями

Для уменьшения влияния выброса на параметры нагруженных ИМС в качестве нагрузки используют диоды Шоттки как динамические нелинейные сопротивления. По мере возникновения паразитного выброса один из диодов начинает открываться до тех пор, пока его сопротивление не станет приблизительно равным волновому сопротивлению линии. В результате энергия выброса поглощается, что ведет к повышению устойчивости работы ИМС. Особенно эффективно использование диодов Шоттки для длинных (до 1 м) линий связей, обычно выполняемых бифиляром. Замена бифиляра одиночным проводом с диодом Шоттки на конце позволяет уменьшить требуемое количество контактов разъема, ячейки, субблока, блока и т. д. [10].

Задача проектирования состоит в том, чтобы создать такую линию передачи на плате, в которой мгновенное значение волнового сопротивления остается неизменным по длине, т. е. линия должна быть *однородной*. Отсюда большое значение имеют методы и приемы управления

волновым сопротивлением. Например, уменьшение длины шлейфов, использование хабов вместо разветвления трасс, применение топологии «от точки к точке» и ряд других приемов, призванных стабилизировать значение волнового сопротивления.

Известны 4 *основных* правила проектирования высокоскоростных ПП [2, 37]:

1. применять управляемое волновое сопротивление для линий передач на плате;
2. обеспечить согласование линий;
3. использовать такую топологию, чтобы минимизировать воздействия от разветвления линии;
4. минимизировать любые геометрические неоднородности.

Существуют следующие *методы согласования* [37]:

1. последовательное согласование одиночным резистором на входе линии (рис. 7.10, а);
2. параллельное согласование одиночным резистором на выходе линии (рис. 7.10, б);
3. согласование на выходе линии при помощи резистивного делителя напряжения (рис. 7.10, в);
4. согласование на выходе линии по активной схеме (рис. 7.10, г);
5. согласование на выходе линии при помощи *RC*-цепи (рис. 7.10, д).

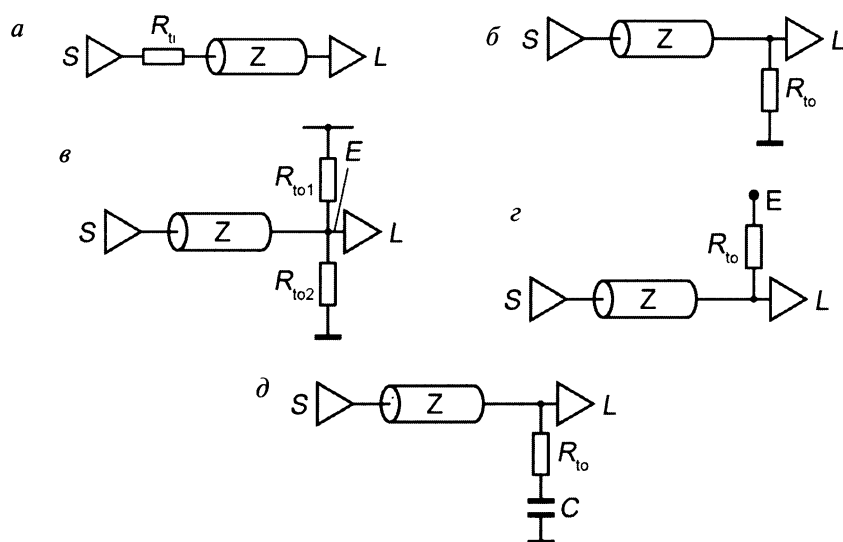


Рис. 7.10. Способы согласования линий

Магистральные линии, в любой промежуточной точке которых могут быть подключены и передатчик и приемник, согласуют на обоих концах, включая делители напряжений из сопротивлений R_1 , R_2 между шиной питания и «общей» шиной, такие, что

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = z_0; \quad \left| U_{\text{пит}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right| \geq U_{\text{мин}}^1.$$

В таком случае отражения, возникающие в любой промежуточной точке линии, достигнув ее конца, прекращаются [33].

Наряду с искажениями сигналов, вызываемыми отражениями, в электрически длинных линиях связи, как и в электрически коротких линиях возникают взаимные помехи, амплитуда которых даже в согласованных микрополосковых линиях связи может составлять до 30 % от амплитуды логического перепада при длительности импульса помехи $t_{\text{пом}} = 2l\sqrt{L_0 C_0}$.

На практике линии связи элементов ЭСЛ-типа уже в пределах ячеек (печатных плат) необходимо рассматривать как электрически длинные, применяя согласованные симметричные и несимметричные микрополосковые линии. Электрически длинными также являются межячеечные и межблочные линии связи элементов ТТЛ-типа, и их выполняют с использованием радиочастотных кабелей, плоских кабелей, гибких печатных плат, бифиляров.

Перспективным направлением в создании высокоскоростных и высокопомехоустойчивых линий связи является применение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) (рис.7.11).

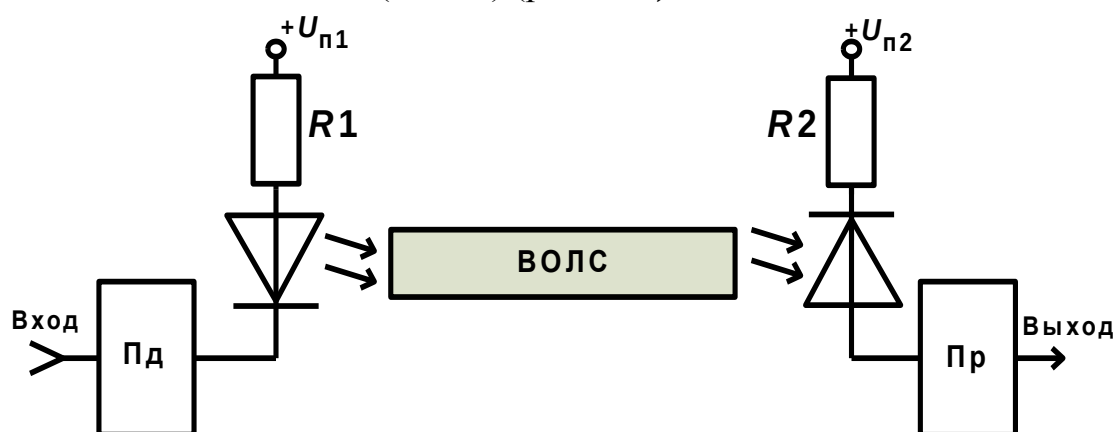


Рис. 7.11. Соединение источника и приемника посредством ВОЛС

Оптический сигнал в таких линиях распространяется по волоконно-оптическому кабелю с полосой пропускания до 3 ГГц при весьма малом затухании 5 дБ/км. В качестве передатчика Пд может быть использован лазер или светодиод, в качестве приемника Пр *pin*-диод или лавинный фотодиод.

Применение ВОЛС наряду с максимальными скоростями передачи информации при умеренном затухании уменьшает габаритно-весовые показатели, как правило, на порядок и обеспечивает устойчивость к внешним электромагнитным помехам. Эти линии связи широко применяют при построении линий связи, обеспечивающих последовательную передачу информации между территориально удаленными СВТ.

Методы разводки «длинных» линий связи. В быстродействующих системах, в которых задержка определяется только задержками в цепях связей, основную проблему может составить *способ разводки* линий между отдельными ИМС.

В настоящее время существует три способа разводки: *радиальный, с промежуточными отводами, комбинированный* [10].

При *радиальном способе разводки*, когда каждую нагрузку подключают к источнику сигнала индивидуальной связью, все входы должны быть согласованы с волновым сопротивлением линии связи.

Кроме того, источник сигнала должен иметь выходное сопротивление, равное z_0/n , где n – число нагруженных на него ИМС (или нагрузочная способность ИМС).

При большом n потребуется источник сигнала с недостижимо малым выходным сопротивлением.

Другой недостаток радиального способа – необходимость наличия отдельной линии связи для каждой нагрузки. Поэтому радиальный метод рекомендуют только для $n = 1$.

При *способе разводки с промежуточными отводами*, когда нагрузку подключают к магистрали и далее к источнику сигнала через короткие проводники, нагрузочные ИМС должны иметь высокие входные сопротивления, иначе они будут перегружать линии связи.

Комбинированный способ обеспечивает согласование в любой точке линии связи путем разводки сигналов на нагрузки, размещенные по разным направлениям.

При этом число проводников меньше, чем при радиальном способе, а выходное сопротивление источника сигналов допускается сравнительно высоким.

Если на линии связи находятся всего две нагрузки, то источник сигнала можно пометить в любой точке вдоль нее.

7.5. Помехи по цепям питания и методы их уменьшения

Электрическое объединение логических и других элементов ЭВМ осуществляют связями двух видов: *сигнальными* и *цепями питания* [10].

По *сигнальным связям* информация передается в виде импульсов напряжения и тока.

Шины питания служат для подведения энергии к элементам от низковольтных источников постоянного напряжения.

При использовании одного источника напряжения питания к элементам подводится с помощью двух проводников: прямого и обратного.

Часто на элементы необходимо подавать напряжение от нескольких источников с разными номиналами. Тогда для уменьшения количества шин питания обратные проводники объединяют в одну шину, которую соединяют с корпусом машины и называют шиной «*земля*».

В статическом состоянии по цепям питания протекают стационарные токи, вызывающие падение напряжения на элементах. Необходимо, чтобы это падение напряжения составляло малую часть от номинала источника напряжения.

При работе блоков и устройств ЭВМ, когда происходит выключение одних элементов и включение других, возникает *процесс перераспределения токов*.

Ток потребления по шинам питания изменяется, что приводит к нежелательным *падениям напряжения* и *паразитным помехам (наводкам)*.

В масштабах крупного устройства (например, стойки), изменение тока в шине питания вследствие переключения элементов незначительно, так как для этой шины в любой момент времени число включенных элементов можно считать примерно одинаковым.

Иное происходит в шинах питания, подводящих энергию к более мелким устройствам (регистрам, счетчикам, блокам формирователей и т. д.). В этом случае переключение элементов приводит к значительному изменению тока потребления от источника напряжения.

Так как шины питания имеют паразитную емкостную и индуктивную связь с сигнальными шинами, то в зависимости от значения этой связи и перепада напряжения и тока при переключении элементов на сигнальных связях наводятся сравнительно большие помехи. При определенных условиях эти помехи могут вызвать ложное срабатывание схем.

Кроме того, изменение тока в шине питания приводит к возникновению в ней *переходного процесса*. Последнее обусловлено тем, что шина питания, как и любая сигнальная связь, обладает емкостью, ин-

дуктивностью, волновым сопротивлением и различной степенью согласования на концах.

Переходный процесс в шине питания приводит к колебанию напряжения, приложенного к элементу, что изменяет, с одной стороны, режим его работы, а с другой – параметры выходного сигнала.

Для уменьшения наводок, связанных с падением напряжения на шинах питания и «земля» и переходными процессами в них, используют различные методы. Рассмотрим некоторые из них [10, 33].

7.5.1. Применение развязывающих конденсаторов

Развязывающие конденсаторы (РК) устанавливают между шинами питания и «земля» непосредственно возле точек присоединения электронного устройства к этим шинам. Будучи заряженным до значения источника напряжения, РК является как бы индивидуальным источником питания схемы, максимально приближенным к ней физически [10].

В микроэлектронной аппаратуре используются два вида РК – *индивидуальные*, устанавливаемые непосредственно у каждой микросхемы и *групповые*, устанавливаемые на группу микросхем в пределах одной ячейки, модуля, ТЭЗ.

Первый тип РК предназначен в основном для «сглаживания» импульсных помех в момент переключения микросхемы за счет локализации цепи протекания бросков тока в цепи микросхема – РК. В качестве таких РК используют обычно обладающие малой собственной индуктивностью керамические конденсаторы.

Индивидуальную емкость $C_{ир}$ выбирают, исходя из условия равенства заряда, накапливаемого конденсатором за время переключения микросхемы, заряду, переносимому выбросом тока за время переключения элемента.

При этом изменение напряжения на конденсаторе не должно превышать некоторого наперед заданного значения, равного допустимой помехе по шине питания. Отсюда

$$C_{ир} \gg \frac{\Delta I t_{\phi}}{2U_{пом}}; \quad \Delta I = k I_{кз},$$

где ΔI – максимальное значение переменной составляющей тока потребления; t_{ϕ} – длительность фронта переключения; $U_{пом}$ – напряжение допустимой импульсной помехи на шине питания; $I_{кз}$ – выходной ток короткого замыкания микросхемы; k – коэффициент, зависящий от типа схемы (например, для ТТЛ-схем $k = 0,33$).

Если известна потребляемая мощность $P_{потр}$ и напряжение питания $U_{ип}$ микросхемы, то емкость рассчитывают по формуле

$$C_{\text{ир}} = \frac{20P_{\text{потр}} t_{\text{ф}}}{U_{\text{ип}}^2}.$$

Для серий К133, К155 ИМС значение емкости конденсатора индивидуальной развязки обычно выбирается из расчета $(7 \div 10) \cdot 10^3$ пФ на вентиль; для серий К164, К564, К765 – $(1,5 \div 2) \cdot 10^3$ пФ на вентиль [33].

Второй тип РК, устанавливаемый на группу микросхем, предназначен для компенсации бросков тока в системе электропитания. Это обычно электролитические конденсаторы большой емкости, обеспечивающие исключение резонансных явлений в цепях питания.

Выбор групповой емкости $C_{\text{гр}}$ этого типа проводят, используя выражение

$$C_{\text{гр}} = \frac{4L_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}^2},$$

где $L_{\text{ш}}$ и $R_{\text{ш}}$ – индуктивность и сопротивление шины «Питание» соответственно.

В [37] приводится более удобная формула

$$C_{\text{гр}} = \frac{P_{\text{потр}} \Delta t}{U_{\text{ип}}^2 \delta},$$

где Δt – время разряда конденсатора; δ – допуск на напряжение питания.

Например, при $P_{\text{потр}} = 1$ Вт, $U_{\text{ип}} = 3,3$ В с пульсацией не более 5 % получим

$$C_{\text{гр}} = \frac{1 \cdot \Delta t}{3,3^2 \cdot 0,05} = 2 \cdot \Delta t.$$

Пусть конденсатор должен среагировать на изменение напряжения питания быстрее, чем за 10 мкс. Тогда емкость конденсатора должна быть не меньше 20 мкФ.

Особенности использования развязывающих конденсаторов. Приблизленно эквивалентную схему конденсатора можно представить в виде последовательного соединения емкости и индуктивности (выводов), т. е. последовательного резонансного контура. На высоких частотах (ВЧ) полное сопротивление в основном определяется индуктивной составляющей. Как правило, электролитические конденсаторы имеют сравнительно большие значения индуктивности. Поэтому фильтрация ВЧ сигналов ухудшается.

Существуют следующие пути снижения индуктивности контура развязывающего конденсатора:

1. поддерживать короткие межслойные отверстия путем установки шин питания и заземления близко к поверхности;
2. использовать конденсаторы малых размеров;

3. использовать очень короткие соединения между контактными площадками конденсатора и межслойными отверстиями к ниже находящимся слоям;

4. использовать параллельное соединение нескольких конденсаторов.

Наиболее часто для шин питания используют последний прием (рис. 7.12).

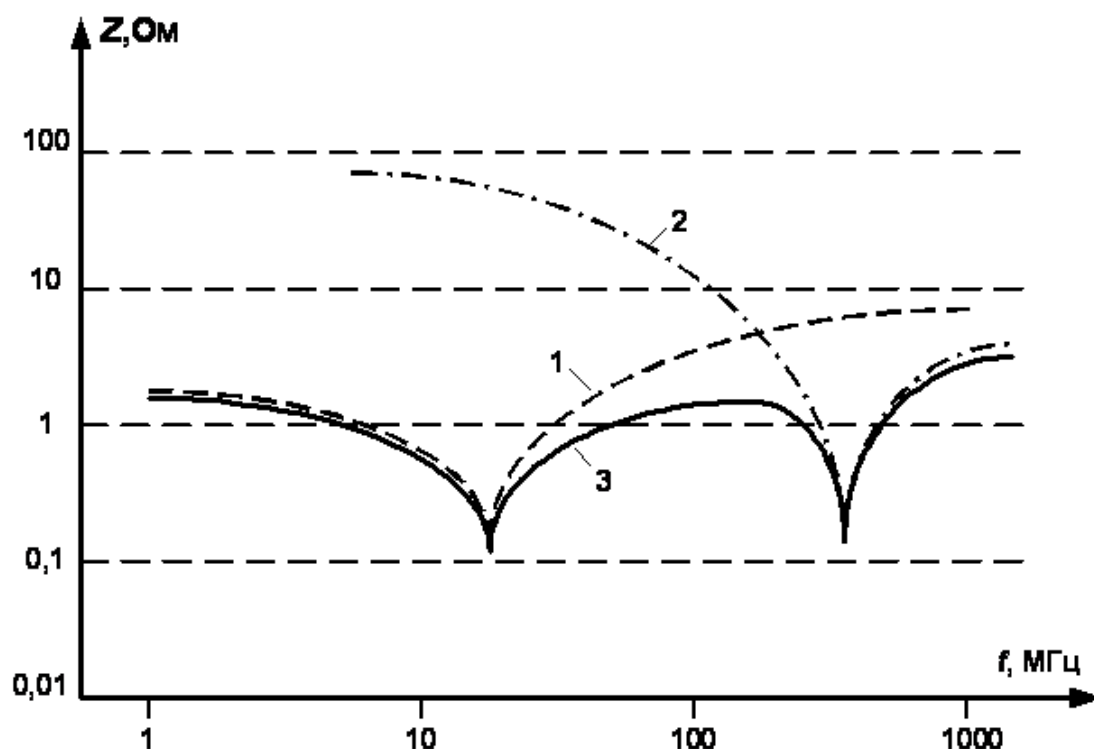


Рис. 7.12. Частотная зависимость полного сопротивления Z конденсаторов: 1 – конденсатор 47 нФ; 2 – конденсатор 220 нФ; 3 – параллельное соединение конденсаторов 1 и 2

7.5.2. Уменьшение общих участков протекания токов

Этот метод заключается в установке дополнительных перемычек в шинах питания и «земля», которые уменьшают длину общих участков протекания токов элементов. На рис. 7.13 представлены три варианта соединения элементов шиной питания и «земля». В первом варианте (рис. 7.13, а) переключение элемента, например Э12 (изменение тока потребления схемы), приводит к возникновению паразитной наводки в остальных одиннадцати элементах по шине питания и «земля». Во втором варианте (рис. 7.13, б) эта помеха в худшем случае воздействует

только на четыре элемента, а в третьем варианте (рис. 7.13, в) помеха еще более уменьшается за счет введения дополнительных перемычек (распараллеливания) [10].

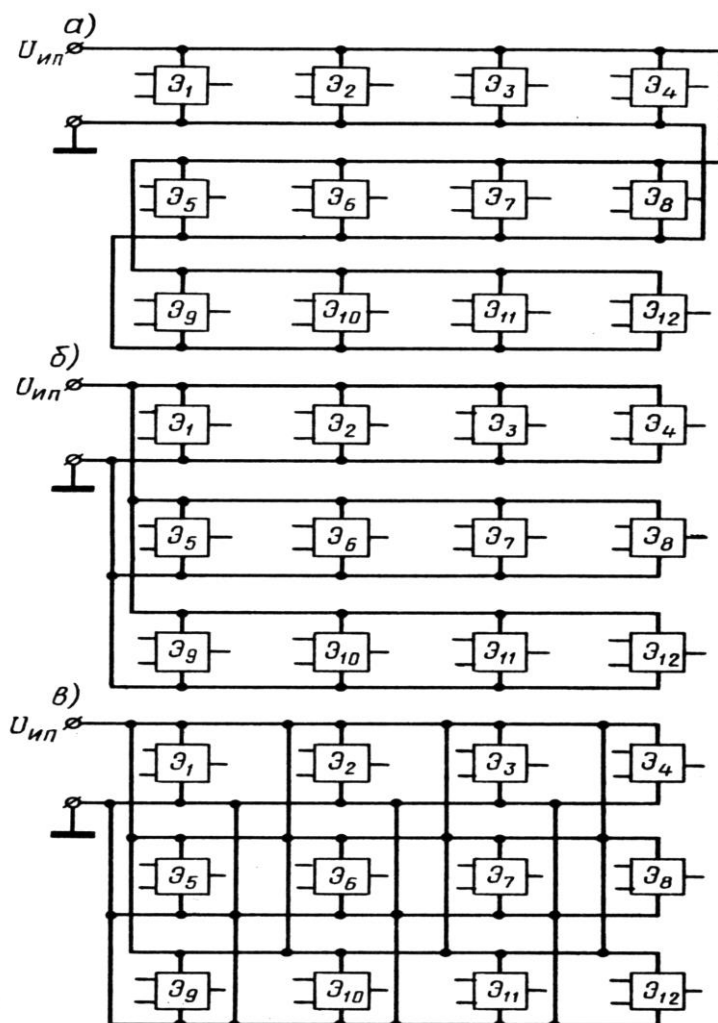


Рис. 7.13. Использование перемычек на шинах питания

7.5.3. Использование металлического листа

Этот метод применим для элементов второго уровня конструктивной иерархии ЭВМ (субблоков, блоков, панелей) и заключается в установке в эти конструктивные элементы сравнительно толстого металлического листа, к которому припаивают обратные провода от всех закрепленных ячеек или модулей [10].

7.5.4. Использование сплошных металлических прокладок

Этот метод применим в случае использования многослойных печатных плат для устройств сверхбыстродействующих ЭВМ. В таких платах отдельные слои изготавливают с максимально большой площадью металла и применяют их в качестве шин питания (эти слои размещают внутри многослойной платы). При использовании сплошных металлических слоев уменьшаются собственное индуктивное сопротивление шин питания, общие участки протекания токов различных элементов и увеличивается взаимная емкость между шинами питания [10].

7.6. Электромагнитная совместимость

В настоящее время электромагнитная совместимость является одним из важнейших качественных показателей ЭВА, которые подлежат сертификации. ЭМС характеризуются двумя основными свойствами – *восприимчивостью* к внешним электромагнитным возмущениям и *помехоэмиссией* (способностью создавать электромагнитные помехи (ЭМП) для других радиоэлектронных средств) [37].

Под ЭМП понимается любое электромагнитное явление, которое может ухудшить качество функционирования аппарата безотносительно к частоте или механизму связи.

Повышение восприимчивости ЭВА обусловлено использованием ИМС, что сопровождается уменьшением электромагнитной энергии, потенциально необходимой для нарушения функционирования ЭВА.

Все страны активно проводят техническую политику по регулированию ЭМС. В 1992 г. Европейская комиссия приняла Директиву ЭМС № 89/336/ЕЕС. Эта директива применяется к аппаратам, способным создавать ЭМП, или к тем, качество которых подвержено воздействию таких помех.

Существенные требования базовых нормативных документов в области ЭМС заключаются в том, что аппараты должны быть изготовлены таким образом, чтобы:

1. создаваемые ими ЭМП не превышали уровня, обеспечивающего функционирование радио- и телекоммуникационного оборудования и других аппаратов в соответствии с назначением;
2. аппараты имели достаточный уровень собственной устойчивости к ЭМП, позволяющий им функционировать в соответствии с назначением.

Обеспечение требований ЭМС на уровне печатного узла – задача комплексная, решаемая на всех этапах проектирования аппаратуры – от выбора элементной базы до конструирования изделия в целом.

К средствам обеспечения ЭМС относятся [2, 37]: а) зонирование, связанное с компоновкой устройства; б) фильтрация; в) экранирование; г) заземление.

Подробно эти вопросы рассмотрены в [37].

Далее рассмотрим вопросы фильтрации и экранирования.

7.6.1. Аналоговые фильтры

Электрический фильтр представляет собой устройство, которое преобразует заданным образом проходящий через него входное напряжение. Фильтр проектируется для выделения и пропускания требуемого сигнала из смеси полезных и нежелательных сигналов.

Диапазон частот, пропускаемых фильтром без затухания (с малым затуханием), называют *полосой пропускания* (прозрачности), а диапазон частот, пропускаемых фильтром с затуханием, – *полосой задерживания*. Согласно IEC 60050-151(2001) полоса пропускания (*pass-band*) – полоса частот, в пределах которой затухание меньше определенной величины. Согласно IEC 60050-704(1993) *полоса частот* (*frequency band*) – непрерывное множество частот, лежащее между двумя заданными граничными частотами. Полоса частот характеризуется двумя значениями, которые определяют ее положение в спектре частот, например, своей верхней и нижней граничными частотами.

Аналоговые фильтры (АФ) классифицируются в зависимости от полосы частот на сосредоточенные и распределенные, от используемой элементной базы – пассивные и активные.

По виду АЧХ различают фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовые фильтры (ПФ), заграждающие фильтры (ЗФ), избирательные фильтры (ИФ).

С точки зрения теории фильтров рассмотренная ранее цепь (рис. 7.2, а) является пассивным ФНЧ первого порядка.

Основы символического метода расчета цепей. Гармонические сигналы могут быть представлены в графическом виде – в виде временных и векторных диаграмм [35, 36]. Однако расчеты, основанные на этих диаграммах трудоемки и недостаточно точны. Поэтому в электротехнике и электронике часто используют **символический метод расчета**, основанный на комплексном представлении элементов и параметров цепи.

Изображение гармонического колебания на комплексной плоскости. Если рассматривать вектор напряжения $\vec{U}$ в комплексной плоскости ($+j, +1$), то показательная форма записи *комплексного мгновенного напряжения* имеет вид

$$\dot{u}(t) = U_m e^{j\alpha},$$

где аргумент равен

$$\alpha = \omega t + \varphi.$$

Тогда вращающийся вектор $\vec{U}$ запишется в показательной форме

$$\dot{u}(t) = U_m e^{j(\omega t + \varphi)}$$

и в тригонометрической форме

$$\dot{u}(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi) + j U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (7.4)$$

Перепишем комплексное мгновенное напряжение в следующем виде

$$\dot{u}(t) = U_m e^{j\varphi} e^{j\omega t} = \dot{U}_m e^{j\omega t} = \operatorname{Re}[\dot{U}_m e^{j\omega t}] + j \operatorname{Im}[\dot{U}_m e^{j\omega t}], \quad (7.5)$$

где

$U_m e^{j\varphi} = \dot{U}_m$ – комплексная амплитуда гармонического напряжения.

Из формул (7.4), (7.5) видно, что переход от комплексного мгновенного напряжения к реальному мгновенному напряжению осуществляется по выражениям

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}[\dot{u}(t)], \\ u(t) &= U_m \sin(\omega t + \varphi) = \operatorname{Im}[\dot{u}(t)]. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Рассмотрим некоторые основные операции над комплексными величинами.

1. Сложение (или вычитание) двух гармонических колебаний

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad u_2(t) = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2), \\ \dot{u}_\Sigma(t) &= \dot{u}_1(t) + \dot{u}_2(t) = (\dot{U}_{m1} + \dot{U}_{m2}) e^{j\omega t}. \end{aligned}$$

Результирующая фаза $\varphi_\Sigma = \varphi_1 + \varphi_2$ находится из формулы

$$\operatorname{tg} \varphi_\Sigma = \frac{U_{m1} \sin \varphi_1 + U_{m2} \sin \varphi_2}{U_{m1} \cos \varphi_1 + U_{m2} \cos \varphi_2}.$$

2. Умножение текущего комплекса на постоянное вещественное число A

$$A \dot{u}(t) = A \dot{U}_m e^{j\omega t} = A U_m e^{j(\omega t + \varphi)}$$

приводит к новому колебанию с той же частотой, но с увеличенной амплитудой.

3. Дифференцируя и интегрируя комплексное воздействие, получим

$$\frac{d\dot{u}(t)}{dt} = j\omega \dot{u}(t)$$

и

$$\int \dot{u}(t)dt = \frac{1}{j\omega} \dot{u}(t).$$

Таким образом, символический метод, благодаря представлению реальных гармонических сигналов их условными комплексными изображениями, позволяет заменить операции дифференцирования и интегрирования на алгебраические операции умножения и деления. Это в свою очередь позволяет свести решение интегро-дифференциальных уравнений к решению более простых алгебраических уравнений.

Определение реальных сигналов производят по формулам (7.6).

Пример расчета цепи символическим методом.

Определим выходное напряжение пассивного R, C -фильтра низких частот первого порядка на гармоническое входное напряжение с нулевой начальной фазой

$$u(t) = U_m \cos \omega t.$$

Расчет проводим в следующей последовательности:

1. Реальное входное напряжение представляем в комплексном виде

$$\dot{u} = U_{вхm} e^{j\omega t}.$$

2. Определяем комплексный коэффициент передачи по напряжению

$$\dot{K} = \frac{\dot{x}_c}{\dot{x}_c + R} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{1}{1 + j\omega \tau},$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени фильтра.

3. Находим модуль и аргумент комплексного коэффициента передачи по напряжению

$$K = \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{K})^2 + (\operatorname{Im} \dot{K})^2} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}, \quad (7.7)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \dot{K}}{\operatorname{Re} \dot{K}} = \operatorname{arctg}(-\omega \tau). \quad (7.8)$$

4. Определяем комплексное выходное напряжение

$$\dot{u}_{\text{вых}} = \dot{K} \dot{u}_{\text{вх}} = K e^{j\varphi} U_{\text{вх}m} e^{j\omega t} = K U_{\text{вх}m} e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

5. Определяем реальное выходное напряжение

$$u_{\text{вых}} = \operatorname{Re}[\dot{u}_{\text{вых}}] = K U_{\text{вх}m} \cos(\omega t + \varphi).$$

6. Определяем входное сопротивление

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = R + \dot{X}_c = R + \frac{1}{j\omega C}.$$

7. Определяем выходное сопротивление

$$\dot{Z}_{\text{вых}} = R \parallel \dot{X}_c = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega CR}.$$

8. По выражениям (7.7) и (7.8) строим АЧХ и ФЧХ (рис. 7.14)

Определяем полосу пропускания на уровне минус 3 дБ, т. е. минус 30 %.

При этом частота среза определяется из условия $\omega\tau = 1$ и равна

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

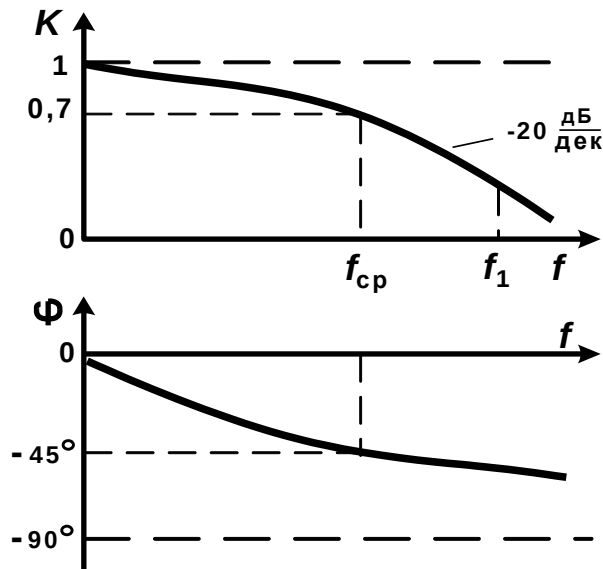


Рис. 7.14 Частотные характеристики ФНЧ

7.6.2. Применение экранов в ЭВМ

Для того чтобы локализовать, где это возможно, действие источника полей или сам приемник помех, используют экраны [10].

По принципу действия различают *электростатическое*, *магнито-статическое* и *электромагнитное* экранирования.

Электростатическое экранирование. От внешних электростатических полей (преобладает емкостная связь) защитой может служить металлический экран (провод в металлической оплетке, коаксиальный ка-

бель, корпус и крышка блока), заземленный в одной любой точке.

Этот вид экранирования заключается в шунтировании большей части (или всей) паразитной емкости емкостью на корпус (рис. 7.15).

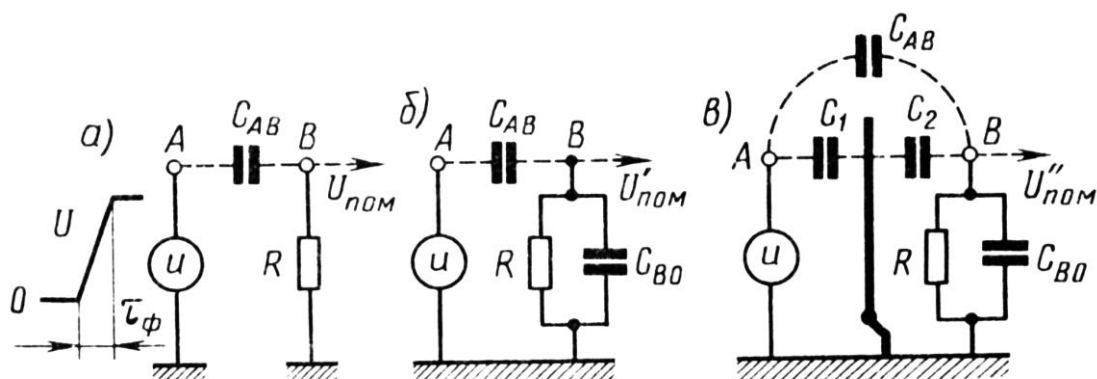


Рис. 7.15. Схемы электростатического экранирования

Пусть емкостная помеха (рис. 7.15, а) наводится через паразитную емкость C_{AB} между проводниками А (источник наводки) и В (приемник наводки).

Если корпус удален на такое расстояние, что емкостью между ним и проводниками можно пренебречь (рис. 7.15, а), то помеха не будет ослабляться.

В том случае, когда экран, соединенный с корпусом, располагают вблизи проводников (рис. 7.15, б), шунтирующая емкость C_{BO} уменьшает амплитуду помехи.

Если $C_{AB} \ll C_{BO}$, то напряжение наводимой помехи снижается в C_{AB}/C_{BO} раз.

Если же экран расположить между проводниками так, как показано на рис. 7.15, в, то помеха еще более уменьшится за счет уменьшения самой паразитной емкости C_{AB} .

На основании изложенного можно считать, что экранирующий эффект заземленного металлического листа заключается в шунтировании на корпус большей части паразитной емкости, имеющейся между источником и приемником наводок.

В качестве металлического листа, соединенного с корпусом ЭВМ, служат детали шасси, каркасов; обшивки стоек, панелей, субблоков, кассет, специальные листовые металлические прокладки на монтажной стороне плат, блоков, субблоков; экранные сплошные металлические слои в многослойных печатных платах и т. д.

Заметим, что эффективность электростатического экрана практически не зависит от параметров проводящего материала (проводимости, толщины), а в основном зависит от конструкции экрана (наличие щелей,

отверстий и других неоднородностей, их размеров и ориентации).

С целью улучшения экранировки особо чувствительных к помехам цепей (например, для передачи синхроимпульсов) на обеих сторонах печатных плат сигнальные и заземленные экранные проводники чередуют таким образом, чтобы против сигнальной линии, проходящей с одной стороны платы, всегда располагалась заземленная линия с другой стороны платы. При этом каждая сигнальная линия оказывается окруженной тремя заземленными линиями, в результате чего достигается не только эффективная экранировка сигнальной линии от внешних помех, но и для полезного сигнала обеспечивается подобная волноводу цепь от источника до нагрузки.

Магнитостатическое экранирование. Магнитостатические экраны используют для защиты чувствительных цепей, элементов и устройств от постоянного и медленно изменяющегося переменного магнитного поля.

В этом случае источник или приемник наводки заключают в сплошной экран, изготовленный из ферромагнитных материалов.

Если в такой экран заключен источник наводки, то магнитные силовые линии замыкаются в нем и далее не распространяются.

Если в экран заключен приемник наводки, то силовые линии магнитного поля не проникают в полость экрана.

Эффективность экранирования прямо пропорциональна магнитной проницаемости и толщине экрана.

Заметим, что медные слои ПП «прозрачны» для магнитного поля и не оказывают никакого влияния. Магнитный экран заземляют только из соображений электробезопасности, хотя для обеспечения эффективной работы это не требуется.

Электромагнитное экранирование. Механизм электромагнитного экранирования (когда преобладает индуктивная связь) основан на отражении электромагнитных волн от границ раздела сред «воздух – экран» и поглощении энергии при прохождении волны в толще стенки экрана.

Переменное высокочастотное электромагнитное поле при прохождении через металлический лист либо перпендикулярно, либо под некоторым углом к его плоскости наводит в этом листе вихревые токи, поле которых ослабляет действие внешнего поля. Металлический лист в данном случае является электромагнитным экраном.

Примером электромагнитного экрана служит обшивка стоек вычислительных устройств.

Широкое распространение в технике ЭВМ нашли экранированные провода, коаксиальные кабели и «витые» пары проводников (бифиляры). Мерой эффективности использования бифиляра в качестве связи

между элементами по сравнению с одиночным проводом в данном случае будет кратность уменьшения индуктивности.

Экран нужно обязательно заземлять в крайних его точках, добиваясь уменьшения контура потекосцепления сигнальных проводников с внешним магнитным полем. Следует помнить, что защитное влияние экрана ухудшается по мере уменьшения частот внешних помех, начиная с частот среза экранов $f_{срз} = R_э / 2\pi L_э$, где $R_э$ и $L_э$ – сопротивление и индуктивность экрана; $f_{срз}$ не превышает диапазона звуковых частот, т. е. $f_{срз} \leq 10 \div 15$ кГц.

При *низкочастотных внешних помехах* рекомендуется использовать экранированную «свитую» пару или триаксиальный кабель.

На рис. 7.16 приведены наиболее эффективные способы экранирования от электромагнитных внешних помех по данным [33, 34].

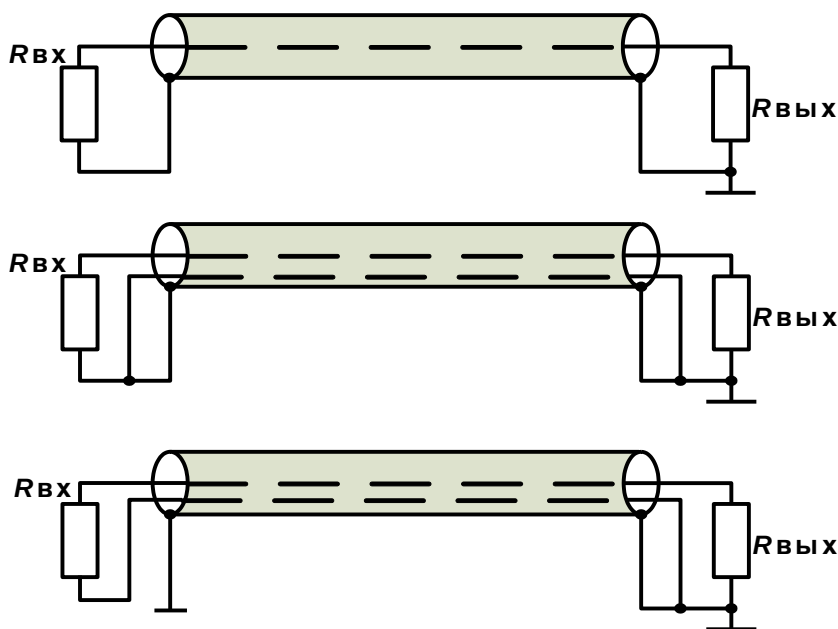


Рис.7.16 Пример эффективных способов экранирования проводников

8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭВМ С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ

Рост сложности объектов управления, контроля, измерения, испытаний, совершенствование ТХП обусловили необходимость высокой степени автоматизации процессов вычисления параметров управления, проведения процедур контроля, измерения элементов процесса [33]. Согласно ГОСТ 34.003-90 (Информационная технология. Автоматизированные системы. Термины и определения) под автоматизированной системой понимают систему, состоящую из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций.

8.1. Устройства сопряжения с объектом

Современные технические средства для реализации сбора и обработки данных должны содержать комплекс устройств, реализующих задачу ввода информации в ЭВМ как с участием, так и без участия человека-оператора. Ядром таких систем является так называемое устройство сопряжения ЭВМ с объектом (УСО), структура которого приведена на рис. 8.1 [38].

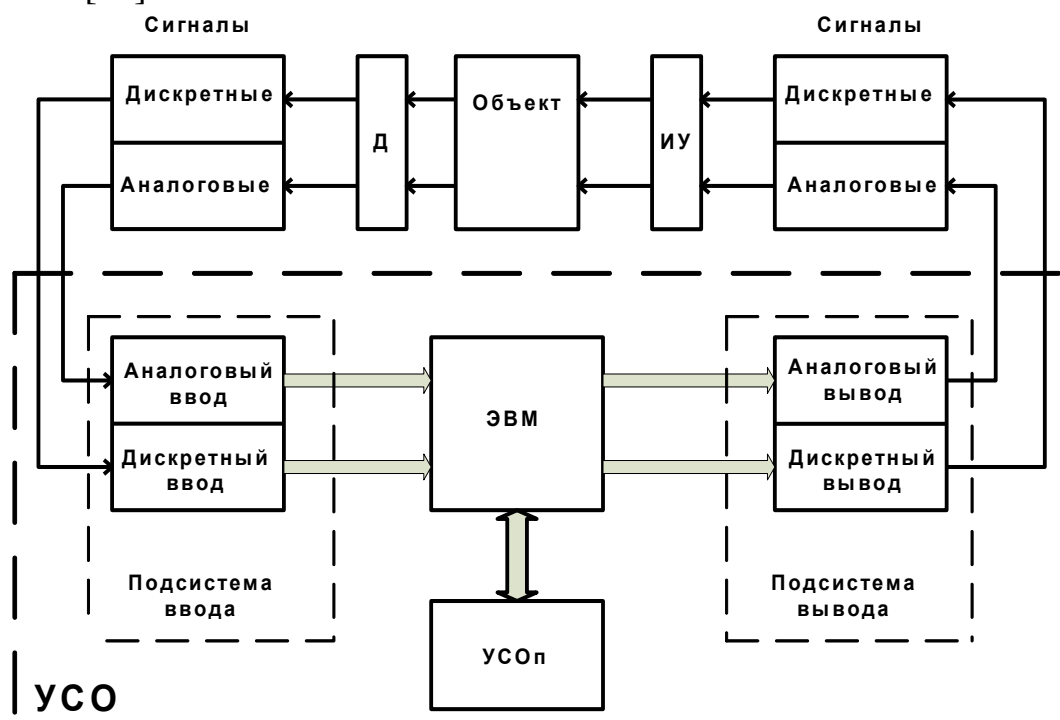


Рис. 8.1. Структура УСО

Центральным узлом УСО является ЭВМ (универсальная или специализированная), устройство связи с оператором (УСОп), включающее в себя пульты, табло, средства индикации и регистрации и т. п., подсистему ввода аналоговой и дискретной информации (ПВв) и подсистему вывода аналоговой и дискретной информации (ПВыв). Аналоговые и дискретные входные сигналы поступают с соответствующих датчиков (Д) от объекта (ОБ). Аналоговые и дискретные выходные сигналы поступают на соответствующие исполнительные устройства (ИУ) объекта.

Различные требования по стоимостным и техническим характеристикам, предъявляемым к УСО, определяют возможность вариаций ее структуры на основе метода обработки сигналов.

8.2. Подсистемы аналогового и цифрового ввода-вывода

Подсистемы аналогового ввода в большинстве случаев используют сигналы постоянного и переменного напряжения различного диапазона частот и реже токи.

На рис. 8.2, а показана структура, реализующая принцип параллельной, а на рис. 8.2, б – последовательной обработки аналоговых сигналов от датчиков [33].

Достоинством параллельной структуры является – максимальная производительность всех измерительных каналов из-за независимости обработки каждого сигнала; высокая точность преобразования сигналов вследствие возможности системы по обеспечению требуемого уровня сигнала на входе каждого АЦП; возможность значительно повысить помехозащищенность на основе использования цифровых каналов передачи данных на вход ЭВМ в случае применения интеллектуальных датчиков с цифровым выходом. Важную роль играют НП: они преобразуют ток в напряжение, масштабируют сигнал, осуществляют сдвиг уровня сигнала.

Предельное количество измерительных каналов системы ограничено допустимым значением динамической погрешности преобразования i -го параметра, т. е.

$$N_{\text{ц}} \leq \frac{\Delta x_{i_{\text{доп}}}}{t_{\text{к}} \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_{\text{max}}},$$

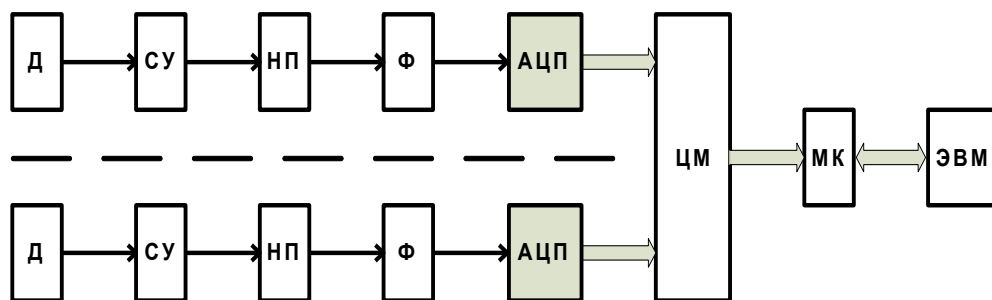
где $N_{\text{ц}}$ – количество цифровых каналов; $\Delta x_{i_{\text{доп}}}$ – допустимое значение динамической погрешности i -го параметра; $\left(\frac{dx_i}{dt} \right)_{\text{max}}$ – максимальное

значение производной i -го параметра в диапазоне преобразования; t_k – период коммутации.

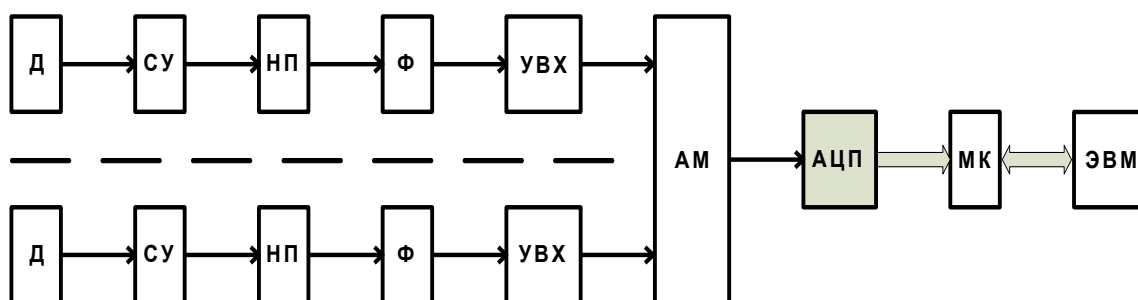
Время преобразования входной информации не зависит от числа каналов, а зависит лишь от характеристик блоков, входящих в их состав, т. е.

$$t_{\text{пар}} = t_k + t_{\text{п}},$$

где $t_{\text{п}}$ – время преобразования АЦП.



а



б

Рис. 8.2. Структурная схема подсистемы с параллельным (а) и последовательным (б) вводом данных в ЭВМ: Д – датчик; СУ – согласующее устройство; НП – нормализующий преобразователь; Ф – фильтр; УВХ – устройство выборки-хранения; АМ – аналоговый мультиплексор; ЦМ – цифровой мультиплексор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер.

В последовательной структуре мультиплексирование каналов переносится из цифровой области в аналоговую. Кроме этого часто применяются устройства выборки-хранения для фиксации аналоговых сигналов на входе АЦП. Это дает возможность использовать только один АЦП независимо от числа аналоговых входов, предельное количество которых можно определить из выражения

$$N_a \leq \frac{\Delta x_{i_{\text{доп}}}}{(t_k + t_n) \left(\frac{dx_i}{dt} \right)_{\text{max}}},$$

где N_a – количество аналоговых каналов. Достоинством является более простой состав системы, использование всего лишь одного АЦП и более простого АМ. Но производительность системы зависит от быстродействия АЦП, а точность преобразования ухудшается из-за погрешностей АМ и УВХ.

УВХ в других вариантах последовательной структуры может быть перенесен за АМ. В случае близких и высоких уровней аналоговых сигналов последние могут подаваться непосредственно на вход АМ, что существенно упрощает структуру.

Время преобразования входной информации возрастает с увеличением числа каналов:

$$t_{\text{посл}} = t_k + N_a t_n.$$

Возможно построение и последовательно-параллельных структур [33]. Последние оптимальны для специализированной, ориентированной на конкретное применение УСО. В таких УСО сигналы с датчиков объединены в группы с одинаковыми допустимыми временами и точностью преобразования входных данных. Внутри группы реализуется принцип последовательной обработки, а между группами – параллельный. Время преобразования при этом больше, чем в параллельных, но меньше, чем в последовательных УСО:

$$t_{\text{посл-пар}} = t_k + M t_n,$$

где $M = N_a/k$ – количество каналов в каждой группе при равномерном распределении; k – количество групп.

Прохождение сигналов через измерительный канал показано на рис. 8.3.

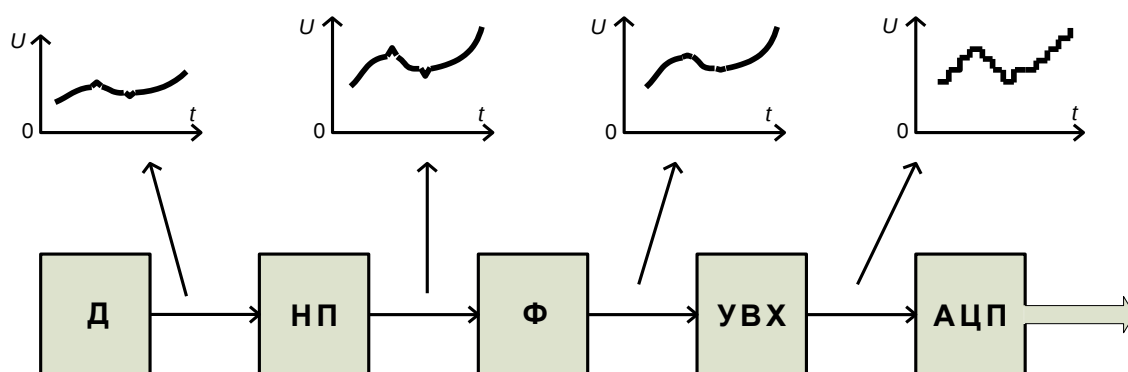


Рис. 8.3. Преобразование сигналов в аналоговом канале

Обратим внимание на вход АЦП. Преобразование аналоговой величины в цифровую всегда происходит за некоторый конечный промежуток времени, в течение которого сигнал на входе АЦП должен поддерживаться неизменным. Как правило, эту функцию выполняет УВХ, сигнал на выходе которого в режиме выборки (слежения) пропорционален сигналу на входе до тех пор, пока не поступит команда хранения (записи). После этого сигнал на выходе УВХ остается постоянным в течение промежутка времени, необходимого для преобразования сигнала в цифровую форму. Таким образом, видно, что непрерывно изменяющийся сигнал заменяется совокупностью дискретных периодически измеренных значений, причем внутри каждого интервала амплитуда сигнала сохраняется постоянной.

Процессы дискретизации и квантования искажают входной сигнал. Теорема Котельникова о дискретном представлении утверждает, что для точного восстановления первоначального сигнала из дискретного частота опроса должна по крайней мере вдвое превышать самую высокочастотную составляющую входного сигнала. Частота дискретизации ограничена сверху скоростью работы АЦП. Время, необходимое для одного преобразования, называется временем преобразования.

Если во входном сигнале имеются гармонические составляющие с более высокой частотой, чем частота дискретизации, то при восстановлении аналогового сигнала они вызовут разностные частоты более низкой частоты. Для предотвращения такого искажения следует использовать ФНЧ, который бы не пропускал все составляющие сигнала, имеющие частоту выше $1/2$ частоты дискретизации. Только при этих условиях процесс дискретизации не вызовет потерь информации, содержащейся во входном сигнале.

Следует отметить, что из-за ограниченной разрешающей способности цифрового представления возникает также и амплитудная погрешность, которую необходимо учитывать.

Подсистема дискретного ввода. Основными функциями являются преобразование дискретных сигналов, поступающих от дискретных датчиков (ДД), в двоичные коды (стандартные логические уровни) с помощью НП и вводе одиночных или подсчете многократно повторяющихся дискретных сигналов (рис. 8.4).

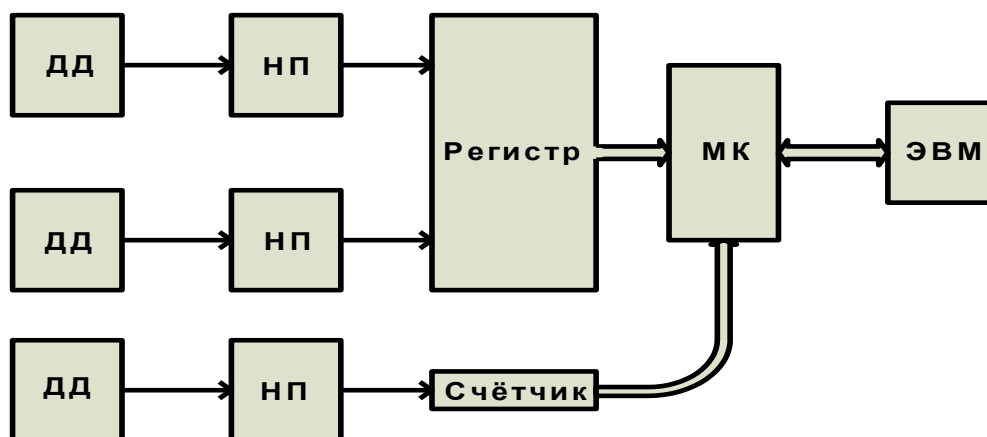


Рис. 8.4. Структурная схема подсистемы дискретного ввода

Сигналы на входе обычно имеют уровни напряжения, тока или состояния контактов («Замкнуто-разомкнуто»). Для преобразования этих сигналов в стандартные, например ТТЛ, нормализующие преобразователи НП здесь выполняют следующие функции – ограничение, преобразование в соответствующий уровень напряжения, фильтрация с целью устранения влияния дребезга механических контактов и т. п.

Подсистемы аналогового вывода. Такие подсистемы во многом похожи на подсистемы аналогового ввода (рис. 8.5).

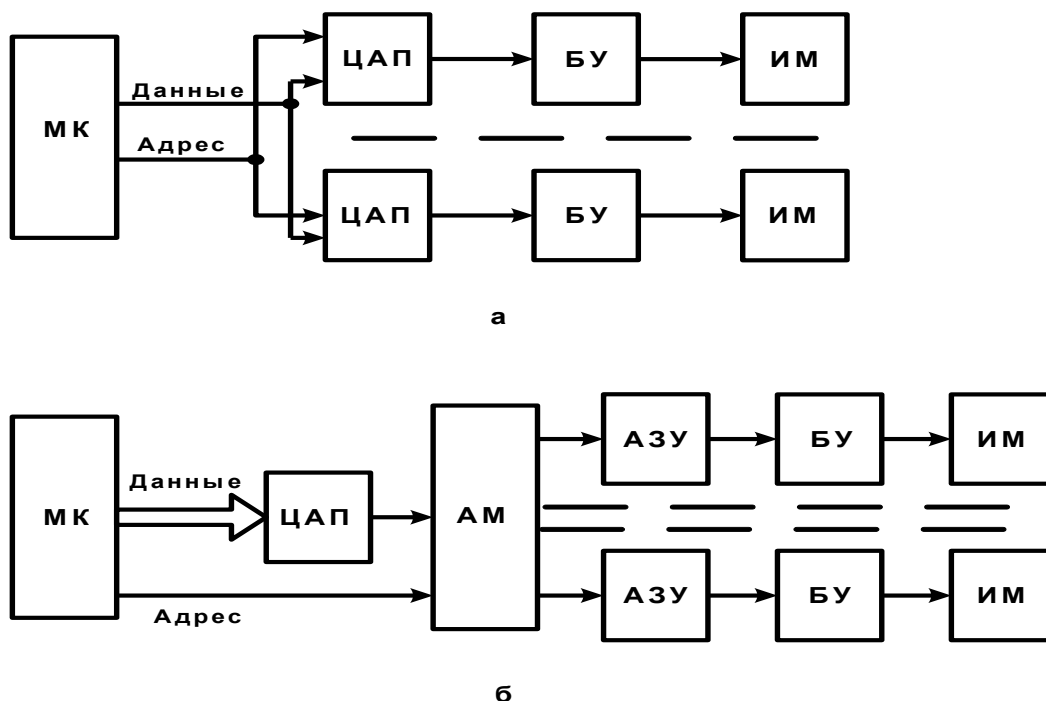


Рис. 8.5. Структурная схема подсистемы аналогового вывода

Преобразование цифровых выходных сигналов в аналоговый сигнал выполняется с помощью ЦАП. В параллельной структуре количество каналов преобразования и соответственно ЦАП определяется количеством исполнительных механизмов (ИМ). Как правило, для согласования сигналов по мощности, гальванической развязки используются буферные устройства (БУ). Такая конфигурация применяется там, где требуется высокое быстродействие и повышенная точность.

В последовательной структуре один ЦАП работает в режиме временного мультиплексирования посредством АМ и аналогового запоминающего устройства (АЗУ).

Подсистема цифрового вывода. Основная функция цифрового вывода – функция ключа. Обычно каждый двоичный разряд выходных данных имеет самостоятельный смысл, т.е. каждый бит выходного слова может использоваться для управления каким-либо параметром объекта независимо (рис.8.6). Выбор типа ключа определяется значением коммутируемой мощности и скорости переключения.

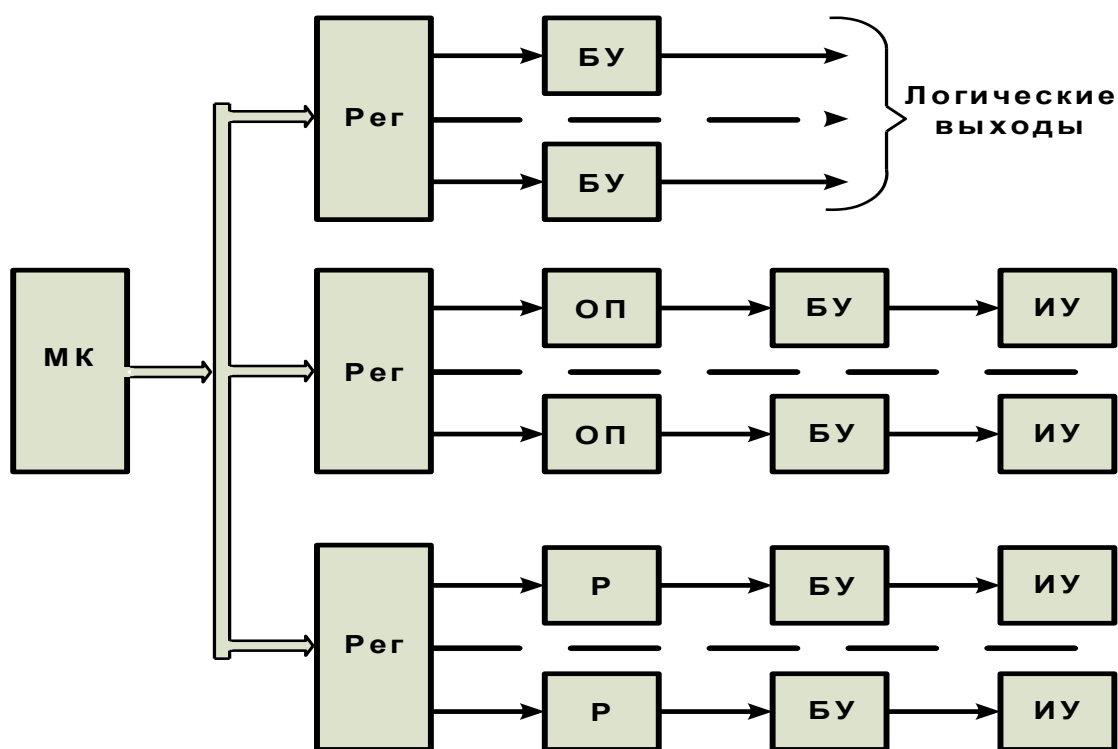


Рис. 8.6. Структурная схема подсистемы дискретного вывода

8.3. Выбор АЦП

Одним из важнейших вопросов проектирования измерительных каналов УСО является обеспечение их требуемой точности. В общем случае погрешность канала зависит от погрешности элементов, входящих в канал. Наиболее значимый вклад в общую погрешность вносит АЦП.

Выбор АЦП определяется его статическими и динамическими погрешностями. Как известно посредством АЦП осуществляются операции дискретизации непрерывной величины во времени, квантования по уровню и кодирования.

Погрешность от квантования по уровню. Квантование по уровню приводит к методической погрешности (шум квантования), вызванной округлением значения непрерывной измеряемой величины до какого-либо (обычно ближайшего) значения известной дискретной величины [39]. Далее ограничимся рассмотрением *статической* составляющей погрешности квантования, полагая, что измеряемая величина в процессе квантования неизменна.

Наиболее распространено равномерное квантование, при котором диапазон изменения значений непрерывной величины разделен на n одинаковых частей – интервалов квантования. При изменении измеряемой величины от $X_{\min}$ до $X_{\max}$ шаг квантования определяется

$$\Delta U = q = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^n - 1} \approx \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^n}.$$

Погрешность квантования как случайной величины определяется

$$D_q = \frac{q^2}{12}, \sigma_q = \sqrt{D_q} = \frac{q}{2\sqrt{3}}.$$

Для доверительной вероятности $P = 0,9973$ максимальная абсолютная погрешность квантования

$$\varepsilon_{\max\text{кв}} = 3\sigma_q = \frac{3q}{2\sqrt{3}} \approx q.$$

Таким образом, погрешность квантования равна шагу квантования.

Иногда на практике выбирают погрешность квантования равной половине шага квантования, т. е.

$$\varepsilon_{\max\text{кв}} = \frac{U_{\max}}{2^{n+1}} = \frac{q}{2}.$$

Приведенная погрешность определяется

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \frac{\varepsilon_{\max\text{кв}}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot 100\%.$$

Динамическая погрешность. Процесс преобразования занимает какое-то время, и поэтому если на вход АЦП подана изменяющаяся во времени величина $x(t)$, то результат преобразования будет неопределенным в интервале преобразования (дискретизации) ΔT . Эта неопределенность находит свое численное выражение в динамической погрешности [40, 41].

Динамическая погрешностью – разность между зафиксированным на выходе АЦП значением выходной величины $x_{\text{вых}}(t_i) \sim N_{\text{вых}}$ и её истинным значением $x(t_i)$ в рассматриваемый момент времени t_i без учета погрешности одного отсчета, рассмотренного выше

$$\Delta_{\text{дин}}(t_i) = X_{\text{вых}}(t_i) - X(t_i).$$

Различают два вида динамической погрешности АЦП:

1. погрешность, обусловленную инерционностью элементов, участвующих в передаче сигнала от входа к выходу АЦП. Эта погрешность проявляется обычно в виде переходных процессов и определяется их длительностью;

2. динамическую погрешность, вызванную изменением входной величины в процессе преобразования. Эта погрешность зависит от скорости изменения входного сигнала, а точнее от спектральных свойств входного сигнала.

Очевидно, что динамическая погрешность не превысит допустимого значения, если время преобразования текущего значения квантованной по уровню функции $x(t)$ в код удовлетворяет условию

$$t_{\text{пр}} < \Delta T.$$

Ранее принималось, что абсолютная погрешность квантования отсчета не превышает шага квантования q . Это означает, что изменение $x(t)$ за время $t_{\text{пр}}$ не должно быть больше, чем q . Тогда

$$t_{\text{прmin}} = \frac{q}{|X'_{\text{max}}(t)|}.$$

Таким образом,

$$t_{\text{прmin}} \leq \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{|X'_{\text{max}}(t)| 2^n}.$$

Заметим, что это грубая оценка, так как не учитывает статистических характеристик сигнала и ряда других весьма существенных факторов [40, 41].

Для нахождения максимального значения производной случайной стационарной функции применяют неравенство Бернштейна С.Н.

$$X_{\text{max}}^k(t) \leq \omega_c^k |X_{\text{max}}(t)|,$$

где $X_{\max}^k(t)$ – максимальное значение k -ой производной функции $x(t)$;
 $\omega_c = 2\pi f_c$ – высшая частотная граница спектра (частота среза).

Таким образом

$$t_{\text{нрmin}} \leq \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\omega_c |X_{\max}(t)| 2^n} = \frac{q}{\omega_c |X_{\max}(t)|}.$$

Во многих случаях скорость изменения функции $x(t)$ целесообразно оценивать частотой эквивалентной синусоидальной функции

$$x_s(t) = X_{\max} \sin \omega_s(t).$$

Тогда частота преобразования определяется

$$f_{\text{пр}} \geq \frac{200\pi f_s}{\gamma_x}, \quad f_s \leq \frac{\gamma_x f_{\text{пр}}}{200\pi},$$

где приведенная погрешность γ_x определяется

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{X_{\max}}$$

и подставляется в формулы в %.

Заметим, что эти формулы справедливы для случая восстановления сигнала ступенчатой аппроксимацией.

Пример.

1. При $f_{\text{пр}} = 10$ изм/сек и $\gamma_x = 1$ % получим $f_s = 0,016$ Гц.
 2. При $f_{\text{пр}} = 2\pi 10^6$ изм/сек и $\gamma_x = 1$ % получим $f_s = 10$ кГц,
- а при $\gamma_x = 0,1$ % получим $f_s = 1$ кГц.

При восстановлении кривой процесса методом линейной интерполяции Лагранжа интервал дискретизации определяется

$$\Delta T \leq \sqrt{\frac{8X_{\max}\gamma_x}{x''(t)}}.$$

В частном случае для синусоидальной функции

$$\Delta T \leq \frac{T}{2\pi} \sqrt{8\gamma_x}.$$

Отсюда количество отсчетов для восстановления

$$m = \frac{T}{\Delta T} \geq \frac{\pi}{\sqrt{2\gamma_x}}.$$

Пример:

$\gamma_x, \%$	0,1	1	10	20
m	70	22	7	5

При использовании полиномов степени $n > 2$ в общем случае

$$\Delta T^{(n)} \leq \sqrt[n+1]{\lambda(n) \frac{X_{\max} \gamma_x}{M_{n+1}}},$$

где $M_{n+1} = \max |x^{(n+1)}(t)|$ – максимальное значение $(n+1)$ -ой производной; $\lambda(n)$ – коэффициент, зависящий от n .

Если известна максимальная частота $f_{\max}$, то

$$\Delta T^{(n)} \leq \frac{1}{2\pi f_{\max}} \sqrt[n+1]{\lambda(n) \frac{X_{\max} \gamma_x}{|X_{\max}(t)|}}.$$

Есть рекомендации [33] по выбору частоты опроса датчиков. Принимают $f_{\text{опр}} = (3 \div 10) f_{\text{ср. вх.}}$. Минимальную частоту опроса выбирают в зависимости от крутизны спада АЧХ входного фильтра, например, при $n = 10$ $f_{\text{опр}} = 3 f_{\text{ср. вх.}}$; $n = 6$ $f_{\text{опр}} = 4 f_{\text{ср. вх.}}$; $n = 2$ $f_{\text{опр}} = 8 f_{\text{ср. вх.}}$.

Восстановление аналогового сигнала. Аналоговый сигнал на выходе схемы восстановления изменяется ступенчато вследствие дискретной обработки данных в МК или ЭВМ. Это вызывает появление гармоник в аналоговом сигнале на выходе, которых не было во входном сигнале. Для сглаживания ступенек в выходном сигнале (иначе – подавления высших гармоник выходного сигнала на выходе схемы восстановления) включают ФНЧ. Частота среза его должна находиться между спектром входного сигнала и низкочастотной составляющей спектра выходной выборки. Как правило, достаточно знать высокочастотную составляющую входного сигнала, чтобы решить задачу синтеза выходного фильтра. Заметим, что фильтр должен выбираться с крутым спадом, т. е. порядком фильтра $n = 5 \dots 7$ [33]. Разработка таких фильтров (аналоговых и цифровых) в настоящее время не вызывает больших затруднений. Заметим, что многие современные системы программирования, например, MATLAB, LabVIEW предоставляют широкие возможности выбора, анализа и синтеза цифровых фильтров [42, 43].

8.4. Взаимодействие человека-оператора в системе человек-машина

Проблемы влияния особенностей человека на конструктивные параметры различных изделий, в том числе на ЭВА, рассматриваются в *эргономике* [9].

Эргономика (греч. *ergon* – работа и *nomos* – закон) – наука, изучающая особенности деятельности человека (или группы людей) в условиях производства и жизнедеятельности с целью оптимизации орудий, условий и процесса труда.

Требования, предъявляемые к человеко-машинным системам, регламентируются нормативными документами – законами (Закон Рос-

сийской Федерации «О сертификации продукции и услуг» и др.), Государственными и отраслевыми стандартами, санитарными нормами и правилами. Так, в СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видео-дисплейным терминалам, персональным ЭВМ и организации работы» изложены базовые требования, которые должен учитывать проектировщик при разработке современных вычислительных систем. В этом документе выделены следующие группы требований:

- общие требования к вычислительным системам;
- требования к помещениям для эксплуатации вычислительных систем;
- требования к микроклимату;
- требования к шуму и вибрации;
- требования к освещенности помещений и рабочих мест;
- требования к организации и оборудованию рабочих мест;
- требования к организации режима труда;
- требования к организации медицинского обслуживания.

Одним из основных направлений эргономического исследования является анализ психофизиологической сущности функциональной деятельности человека-оператора [9]. Заметим, что человек-оператор лишен возможности непосредственно наблюдать за управляемыми объектами и вынужден пользоваться информацией, поступающей к нему через УСОп (см. рис. 8.1).

Восприятие информации человеком-оператором осуществляется органами чувств, являющимися для него «входом». «Выходом» служат органы речи и двигательные реакции, которые также несут в себе определенное количество информации. Учитывая это, человек-оператор может быть представлен в виде сложной системы, предназначенной для приема, переработки и выдачи информации и охваченной обратными связями (рис. 8.7) [9].

В литературе [9] приводится следующая классификация систем типа «человек-машина»:

1. С простой машиной. Здесь преобразование информации совершается по элементарной линейной программе (передача от человека части реакций прямого замыкания). Обратная информация от предмета труда (объекта контроля) поступает почти полностью к человеку и он вносит коррективы в программу машины.

2. С репродуктивно-преобразующей машиной (обычные ЭВМ). Характерным является существенное, почти полное отчуждение человека от предмета труда и его преобразования. Если человеку понадобится включиться в рабочий процесс, он должен будет реконструиро-

вать как состояние предмета труда, так и процессы, которыми управляет машина.

3. С продуктивно-преобразующей машиной (самоорганизующиеся системы, суперЭВМ, нейрокомпьютеры и т. п.). Взаимодействие человека с такой машиной носит характер информационного обмена между относительно замкнутыми системами информации.

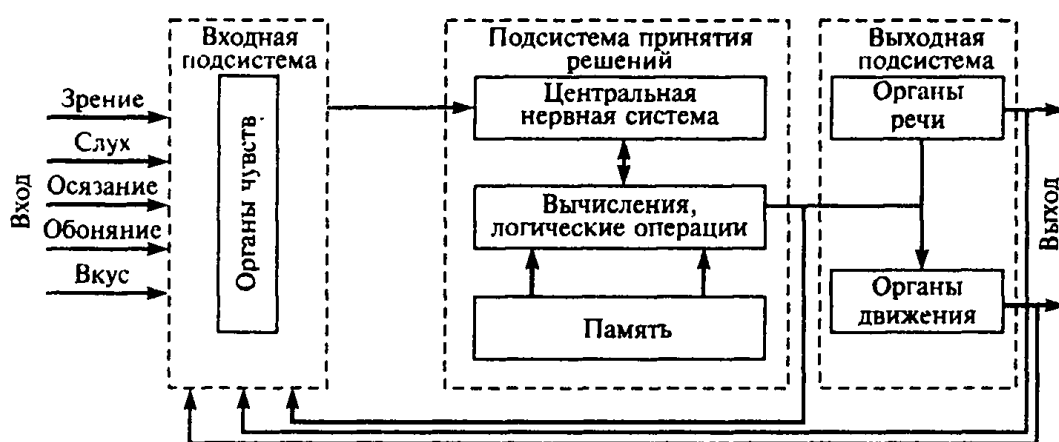


Рис. 8.7. Функциональная схема человека-оператора в управляющей системе

Каждый из блоков системы человек-машина характеризуется двумя основными параметрами: временем реакции τ_r и вероятностью получения правильного результата $P_{пр}$.

Сумма реакции человека-оператора складывается из времен реакции на каждом из этапов его функциональной деятельности. Общее время сенсомоторной реакции – время, затраченное на выполнение определенного вида реакции (движения или голосовой реакции) в ответ на внезапно появляющийся сигнал с максимально возможной для человека скоростью. Для упрощения расчетов принято, что время задержки в этом случае складывается из латентного периода реакции – времени от момента появления сигнала до начала ответного действия (табл. 8.1) и длительности моторного действия (табл. 8.2) [9].

Правомерность принятия конкретного значения $P_{пр}$ для каждого из блоков связана с тем, что, во-первых, информация, получаемая человеком, не всегда может быть исчерпывающей, во-вторых, она по-разному воспринимается людьми, в-третьих, целенаправленные действия человека не всегда выполняются безошибочно, и, в-четвертых, часто человеку-оператору приходится иметь дело не с реальными объектами, а с их моделями.

Таблица 8.1

Сравнительные характеристики анализаторов человека-оператора

Анализатор	Латентный период, с
Тактильный (прикосновение)	0,09...0,22
Болевой (укол)	0,03...0,2
Слуховой (звук)	0,12...0,18
Зрительный (свет)	0,15...0,22
Обонятельный (запах)	0,31...0,39
Температурный (тепло-холод)	0,28...1,6
Вестибулярный аппарат (вращение)	0,4...0,8
Вкусовой:	
горький	1,08
сладкий	0,45
кислый	0,54
солёный	0,31

Таблица 8.2

Характеристики времени и безошибочности действий человеком

Наименование действия	Математическое ожидание, с	Среднее квадратичное отклонение, с ²	Вероятность
Обнаружение и декодирование сигнала	1,63	0,70	0,9700...0,9999
Поиск и декодирование заданного сигнала	4,10	1,52	—
Поиск органов управления и осуществление заданного управляющего воздействия	5,50	2,04	0,9610...0,9850
Обнаружение сигнала и принятие решения	8,40	3,30	0,9380...0,9780
Выполнение управляющего воздействия, состоящего из нескольких действий	3,50	2,32	—
Прием информации и ее оценка:			
число воспринимаемых признаков 3—5, задержка во времени появления 10...12 с	26,40	11,50	0,8750...0,9950
число воспринимаемых признаков 5—6, задержка во времени появления 15...40 с	81,0	24,0	0,4470...0,7830
число воспринимаемых признаков 1—2, задержка во времени появления 10...12 с	20,50	8,76	0,8550...1,0000

Для получения количественных оценок функциональной деятельности человека-оператора используют группы методов эргодизайнерского проектирования и исследований, которые можно разделить на

аналитические и проектировочные [9]. Первые направлены на выявление структуры деятельности, её особенностей, а вторые – на разработку мероприятий, обеспечивающих выполнение требований «функционального комфорта». В свою очередь, аналитические методы делятся на эмпирические и экспериментальные. Последние предполагают активное воздействие на реальную деятельность.

Среди эмпирических методов выделяют:

- анализ результатов деятельности и документации;
- непосредственное наблюдение;
- опосредованное наблюдение (регистрация наблюдений на кино-, фото-, аудио-, видео- и других носителях);
- самонаблюдение (исследование функциональной деятельности на основе собственного опыта);
- хронометраж;
- опросные методы (чаще всего психофизиологические).

Среди экспериментальных методов выделяют исследования:

- на основе факторных моделей;
- на основе регрессионных моделей;
- на моделях, базирующихся на основе теории Хаоса.

Все эти методы направлены на получение количественных оценок функциональной деятельности человека-оператора.

Взаимодействие человека-оператора с управляющей системой осуществляется поэтапно (см. рис. 8.7).

На *первом* этапе (восприятие информации) человек-оператор доступными ему анализаторами проводит обнаружение объекта восприятия, выделение в нем отдельных признаков, ознакомление с выделенными признаками и распознавание объекта восприятия.

Важным параметром, характеризующим способность человека-оператора воспринимать поступающую информацию, является возможная скорость переработки информации (бит/с). Максимальная пропускная способность человека по восприятию информации не превышает 40 бит/с, а номинальная пропускная способность составляет 2...6 бит/с (для сравнения, средняя пропускная способность телеканала 30 кбит/с, а сетевого, например, АТМ, несколько Гбит/с) [9].

На *втором* этапе (оценка информации и принятие решений) время анализа и принятия решений складывается из целого ряда субъективных характеристик: личностные характеристики умственных возможностей человека-оператора, параметры памяти, его опыт и навыки, которые трудно поддаются количественным оценкам.

На *третьем* этапе (реакция на информацию) определяющей составляющей во времени реакции является длительность моторного действия, которая труднее, чем латентный период поддается измерению, так как зависит от многих случайных факторов (места нахождения человека-оператора в момент приема информации, его позы, степени усталости и т. п., формы пульта управления, расположения органов управления, уровня образования и опыта работы человека-оператора и т. д.). Большинство данных параметров носит субъективный характер. Их трудно оценить численно, поэтому длительность моторного действия определяется статистически на моделях или макетах тех или иных устройств с участием человека [9].

9. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭВМ

Под **надежностью** изделия (элемента, узла, устройства, системы) понимается свойство последнего сохранять свое качество при определенных условиях эксплуатации в течение заданного промежутка времени, т. е. надежность – качество, развернутое во времени. Количественно надежность характеризуется рядом интервальных, интегральных и точечных показателей [10, 33, 44].

Невосстанавливаемые изделия – изделия, поведение которых существенно лишь до первого отказа, – характеризуются следующими количественными показателями надежности: интенсивностью отказов $\lambda(t)$; частотой отказов $f(t)$; вероятностью безотказной работы $P(t)$; вероятностью отказа $Q(t)$; наработкой на отказ T_0 .

Восстанавливаемые изделия – изделия, эксплуатация которых допускает их многократный ремонт, – характеризуется следующими количественными показателями надежности: параметрами потока отказов $\omega(t)$ и потока восстановлений $\mu(t)$; функцией готовности $K_r(t)$; коэффициентом готовности K_g ; средним временем работы между двумя отказами $t_{ср}$; средним временем восстановления $t_{в}$.

Случай, когда ЭВМ или ее часть вышли из строя, и дальнейшая работа невозможна без ремонта – называется **отказом**.

9.1. Показатели надежности ЭВМ

Теория надежности различает 3 характерных признака отказов, которые могут быть присущи аппаратуре и проявляются без всякого воздействия со стороны людей [44].

1. Приработные отказы. Эти отказы происходят в течение раннего периода эксплуатации и в большинстве случаев вызваны недостатком технологии производства и дефектами при изготовлении элементов вычислительных систем. Такие отказы могут быть исключены процессом отбраковки, приработки и технологического тестирования готового изделия.

2. Дефектные или постепенные отказы. Это отказы, возникающие из-за износа отдельных параметров или частей аппаратуры. Они характеризуются постепенным изменением параметров изделия или элементов. Вначале отказы могут проявляться как временные сбои. Однако, по мере того, как износ возрастает, временные сбои превращаются в серьезные отказы аппаратуры. Эти отказы являются признаком старения ЭВМ. Они частично могут быть устранены при правильной эксплуата-

ции, хорошей профилактике и своевременной замене изношенных элементов аппаратуры.

3. Внезапные или катастрофические отказы. Эти отказы не могут быть устранены ни при отладке аппаратуры, ни правильным обслуживанием, ни профилактикой. Внезапные отказы возникают случайно, никто не может их предсказать, однако, они подчиняются определенным законам вероятности. Так что частота внезапных отказов в течение достаточно большого периода времени становится примерно постоянной. Это происходит в любой аппаратуре. Примером случайных отказов является обрыв или замыкание цепей. Такой отказ приводит, обычно, к тому, что на выходе устанавливается постоянно либо 0, либо 1. При возникновении случайных отказов необходимо заменять элементы, в которых они произошли. Для этого вычислительная система должна быть ремонтпригодной и позволять быстро проводить профилактические работы в полевых условиях.

В отдельную группу можно выделить перемежающиеся отказы или *сбои*. Под сбоем подразумевается кратковременное нарушение нормальной работы ЭВМ, при котором один или несколько ее элементов, выполняющие одну или несколько смежных операций, дают случайный результат. После сбоя вычислительная система может нормально функционировать в течение длительного времени.

Причиной возникновения сбоев могут быть электромагнитные наводки, механические воздействия и др. Часто сбой не приводит к выходу из строя комплекса, а только изменяют ход работы программного обеспечения из-за неверного выполнения одной или нескольких команд, что может привести к катастрофическим последствиям. Отличие сбоев от отказов в том, что при обнаружении последствий от сбоя, необходимо восстанавливать не аппаратуру, а информацию, искаженную сбоем.

Введенное понятие «отказ» позволяет рассмотреть основные эксплуатационные свойства ЭВМ: безотказность, ремонтоспособность, долговечность, сохраняемость [10].

Безотказность – свойство ЭВМ непрерывно сохранять работоспособность в заданных режимах и условиях эксплуатации без вынужденных простоев. Это свойство характеризует функционирование системы до первого отказа и используется при оценке надежности ЭВМ одноразового применения.

Ремонтоспособность – свойство ЭВМ, заключающееся в приспособлении к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического осмотра и ремонтов.

Долговечность – свойство ЭВМ сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять эксплуатационные показатели в течение заданного срока хранения и после него. Это свойство характеризует надежность ЭВМ в режиме хранения.

Надежность как сочетание свойств безотказности, ремонтоспособности, долговечности и сохраняемости и сами эти свойства количественно характеризуются различными функциями и числовыми параметрами.

К количественным показателям надежности невосстанавливаемых изделий относятся интервальные и точечные показатели [33].

Интервальные показатели надежности – вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$. Определяются как вероятности событий

$$P(t) = P\{\tau > t\}, Q(t) = P\{\tau \leq t\}$$

соответственно, где τ – случайный момент времени, в который происходит отказ. При этом

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

Точечный (локальный) показатель надежности – интенсивность отказов $\lambda(t)$ – определяется как вероятность невосстанавливаемого отказа изделия в единицу времени после некоторого момента времени при условии, что до этого момента времени отказ не возникал, т. е.

$$\lambda(t) = Q(t, t + \Delta t) / \Delta t.$$

Связь между вероятности безотказной работы и интенсивностью отказа

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right].$$

Часто дают другие определения [44]:

Интенсивность отказов – это частота, с которой происходят отказы.

Вероятность безотказной работы – вероятное или ожидаемое число устройств, которое будет безотказно функционировать в течение заданного периода времени:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_0}},$$

где T_0 – наработка на отказ.

Эта формула справедлива для всех устройств, которые прошли приработку, но не испытывают влияние износа. Следовательно, время t не может превышать периода нормальной эксплуатации устройств.

График, показывающий вероятность безотказной работы в зависимости от времени нормальной эксплуатации, приведен ниже (рис. 9.1):

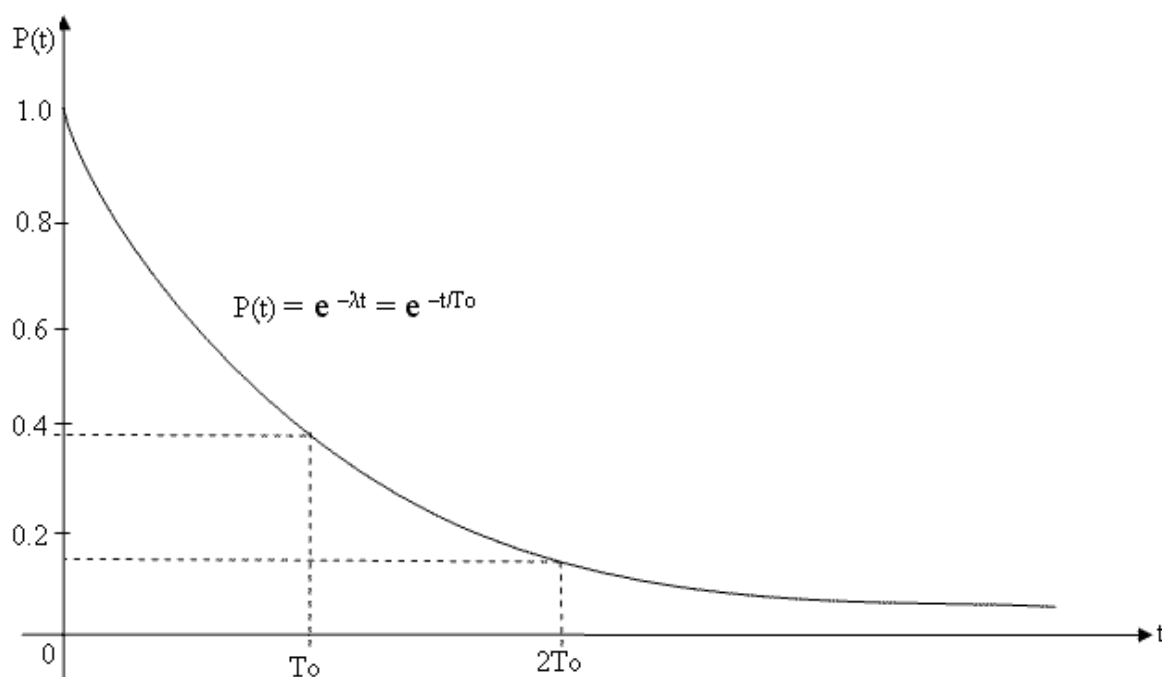


Рис. 9.1. Временное изменение вероятности $P(t)$

Средняя наработка на отказ – это отношение общего отработанного времени к общему числу отказов. В течение периода нормальной эксплуатации, когда интенсивность отказов примерно постоянна, средняя наработка на отказ представляет собой величину обратную интенсивности отказов:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}.$$

Заметим, что интенсивность отказов λ – один из наиболее удобных количественных показателей надежности изделий электроники: интегральных схем, радиоэлектронных изделий (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и т. п.). Изменение интенсивности отказов во времени большинства изделий электронной техники («кривая жизни») имеет существенно нелинейный характер (рис. 9.2). Однако на большом по времени участке работы интенсивность отказов изделия обычно мало изменяется и принимается в практических расчетах постоянной.

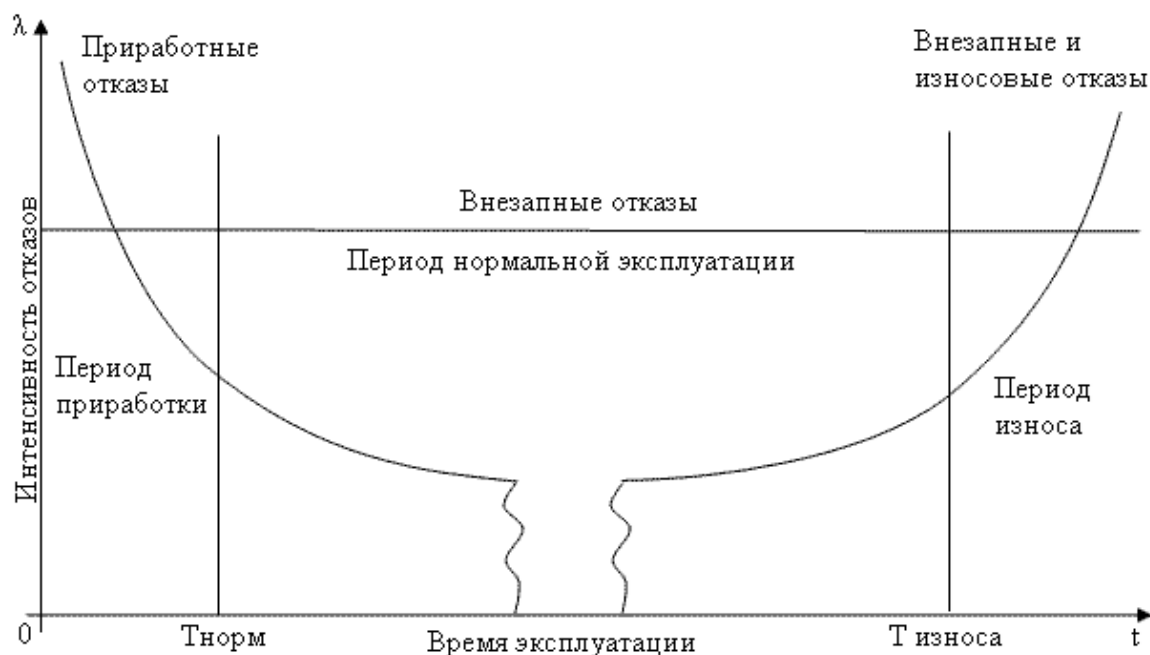


Рис. 9.2. Зависимость интенсивности отказов изделий от времени эксплуатации

Следует помнить, что $\lambda(t)$, оставаясь постоянной во времени на основном участке работы, существенно зависит от условий эксплуатации изделия (климатических, механических и радиационных воздействий, электрической нагрузки и т.п.), т. е.

$$\lambda(t) = \lambda_0 \prod_{i=1}^n a_i,$$

где λ_0 – интенсивность отказов изделия при номинальных (лабораторных) условиях эксплуатации; a_i – поправочный коэффициент i -го эксплуатационного фактора.

При проектировании и создании нового изделия нельзя определить значение интенсивности отказов. Последнее можно определить путем сбора статистических данных, полученных при испытании на надежность этого или аналогичных изделий [44].

Вероятность безотказной работы в течение любого момента времени испытаний выражается формулой:

$$P(t) = N_{и}/N_o = N_{и}/(N_{и}+N_{от}),$$

где $N_{и}$ – количество исправных элементов; N_o – общее количество элементов в системе; $N_{от}$ – количество отказавших элементов в системе.

Интенсивность отказов определяется формулой:

$$\lambda = N_{от}/(N_o \cdot t),$$

где t – общее время испытаний.

При измерении интенсивности отказов необходимо поддерживать постоянное число элементов, участвующих в испытании, путем замены отказавших элементов новыми.

Таким образом, для получения данных о количественных характеристиках надежности аппаратуры, необходимо изготовить специальный образец аппаратуры для испытаний на надежность. Испытания на надежность должны проводиться в условиях, соответствующих реальным условиям эксплуатации оборудования по внешним воздействиям, периодичности включения и изменения параметров питания.

9.2. Методы повышения надежности ЭВМ

Обеспечение надежности системы охватывает все стадии проектирования, производства и эксплуатации системы. Совокупность мероприятий, направленных на повышение надежности системы, оформляются в виде программы обеспечения надежности, в которой предусматриваются необходимые мероприятия, гарантирующие надежность технических и программных средств [44].

На стадии технического предложения и эскизного проекта оценивается надежность базовой структуры вычислительной системы. Вычисленные показатели сравниваются с требуемыми и определяется способ повышения надежности системы.

На этом этапе используются следующие методы повышения надежности:

1. Выбор элементов с номинальными параметрами работы (частота, напряжение, температура и т. д.) выше, чем предполагают режимы эксплуатации в реальных изделиях, для снижения интенсивности отказов. Обычно, используют элементы с двукратным запасом по рабочим параметрам.

2. Уменьшение рабочей температуры элементов аппаратуры за счет теплоотвода, мощной системы охлаждения, корректного размещения, обеспечивающего свободный обдув и отсутствие дополнительных источников тепла (сильно греющихся элементов аппаратуры и др.).

3. Разработка структуры ЭВМ с учетом резервирования отдельных ее элементов, целых ЭВМ, или программное резервирование (повтор решения отдельных задач, использование корректирующих кодов, перераспределение нагрузки и т. д.).

4. Обеспечение достаточной ремонтпригодности. Ремонтпригодность позволяет снижать затраты времени и средств на восстановление работоспособности системы. Для повышения ремонтпригодности существует множество способов, реализуемых на всех стадиях проектиро-

вания, производства и эксплуатации системы: встраивание в систему эффективных средств контроля и диагностики, унификация конструкций и рациональная их компоновка и др.

На этапе производства и эксплуатации также есть ряд методов, повышающих надежность ЭВМ:

1. Тщательный отбор и тестирование деталей особо важных элементов вычислительной системы.

2. Корректная техническая эксплуатация и обслуживание. Техническая эксплуатация или техническое обслуживание – обеспечение работоспособности системы путем создания требуемых условий эксплуатации (режим электропитания, температурный и др.) и проведения профилактических и ремонтно-восстановительных работ.

Основной показатель качества технического обслуживания – коэффициент готовности системы (компонентов), характеризующий долю времени, в течение которого система (компоненты) работоспособна(ы). Увеличение коэффициента готовности системы достигается путем сокращения простоев оборудования из-за профилактических и ремонтно-восстановительных работ.

На эффективность технического обслуживания наиболее существенно влияют следующие факторы:

а) условия эксплуатации системы (стабильность электропитания, температура, чистота среды и др.);

б) надежность и ремонтпригодность системы, степень совершенства средств контроля и диагностики;

в) режим обслуживания и квалификация обслуживающего персонала;

г) полнота данных о сбоях и отказах технических средств.

Для повышения эффективности технического обслуживания в системах предусматриваются средства накопления данных об ошибках, сбоях и отказах. Данные накапливаются путем регистрации состояния системы в момент ошибки, обнаруживаемой встроенными средствами контроля или программами. Регистрация данных производится операционной системой в специальном системном журнале – области накопителя на жестких дисках. Данные из системного журнала периодически или при необходимости выводятся на печать и используются обслуживающим персоналом для выявления источников ошибок, сбоев и отказов с целью проведения профилактических и ремонтно-восстановительных работ.

Серьезное влияние на качество технического обслуживания оказывает стоимость эксплуатационных и восстановительных работ. Использование универсального, серийно выпускаемого, модульного оборудо-

вания значительно снижает стоимость ремонтных работ и уменьшает количество аппаратуры, хранимой в запасе на случай выхода из строя одного из элементов вычислительной системы. Универсальность алгоритмов, позволяющая запускать их в любом из модулей системы, также способствует значительной экономии средств и времени при эксплуатации системы.

9.3. Контроль исправности аппаратуры

Надежность и живучесть вычислительных систем тесно связана с контролем исправности аппаратуры. Контроль функционирования ЭВМ предполагает получение исчерпывающей информации об их состоянии и может быть как программным, так и аппаратным [44].

Программный контроль предполагает включение в исходные коды программного обеспечения дополнительных функций, имеющих математические или логические связи с основными программами. Сравнение результатов работы функций программного контроля с результатами работы всех задач вычислительной системы в целом или отдельных этапов решения задач позволяет с определенной вероятностью судить об исправности аппаратуры и достоверности результата работы.

Аппаратный контроль предполагает введение в состав ЭВМ дополнительных элементов, предназначенных для обнаружения ошибок в результатах каждой операции проверяемой этими элементами. Аппаратный контроль приводит к значительному увеличению объема аппаратуры и потребляемой мощности. В то же время резко сокращается по сравнению с программным контролем время проверки исправности аппаратуры. Это объясняется тем, что операции проверки аппаратного контроля возможно полностью совместить по времени с операциями основного программного обеспечения.

На практике часто используют смешенные методы обнаружения и исправления ошибок. При этом аппаратный контроль служит для обнаружения неисправности, а задача исправления этих ошибок ложится на специальное программное обеспечение. Такой метод обладает достоинствами как аппаратного, так и программного контроля.

9.4. Резервирование оборудования

Резервирование – один из самых распространенных и кардинальных способов повышения надежности и живучести вычислительных систем. Однако, за резервирование приходится расплачиваться значительным увеличением габаритов, массы и потребляемой мощности. Также при этом усложняется проверка аппаратуры и ее обслуживание, а коли-

чество отказов увеличивается из-за увеличения количества аппаратуры. Резервирование уменьшает полезную нагрузку на аппаратуру и увеличивает ее себестоимость.

Основным параметром резервирования является кратность резервирования. Это отношение числа резервных устройств к числу рабочих (основных) устройств. Кратность резервирования ограничена жесткими пределами в отношении массы, габаритов и потребляемой мощности ЭВМ [44].

Классификация методов резервирования [10]. При расчете надежности сложного изделия (узла, устройства, системы) полезно составить расчетную надежность схему (рис. 9.3).

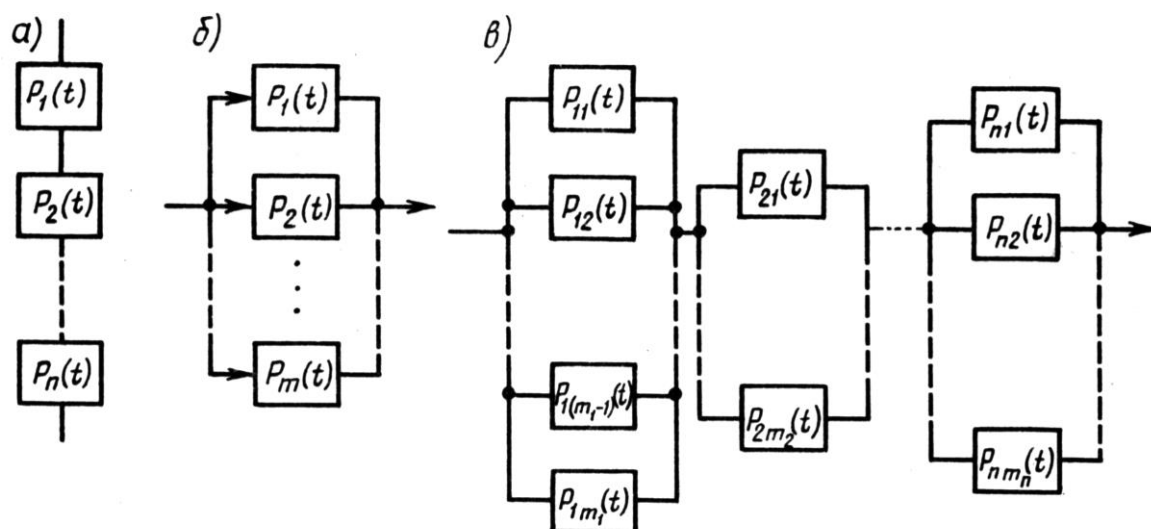


Рис. 9.3. Условное изображение надежности схем:
а – последовательного, б – параллельного; в – параллельно-последовательного соединений изделий

Если изделие состоит из n элементов и отказ изделия в целом наступает при отказе любого одного из его элементов, то говорят об *основном (последовательном) соединении* этих элементов [33]. Условное изображение расчетной надежности схемы для этого случая приведено на рис. 9.3, а.

Пусть каждый i элемент характеризуется в общем случае интенсивностью отказов $\lambda_i(t)$ и вероятностью безотказной работы $P_i(t)$.

Тогда для экспоненциального закона вероятности безотказной работы отдельных элементов, т. е. при $\lambda_i(t) = \text{const}$, вероятность безотказной работы изделия в целом

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \exp(-\lambda_{\Sigma} t)$$

и наработка на отказ

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}},$$

где $\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$.

Если изделие состоит из n элементов и отказ изделия в целом наступает лишь в случае, когда откажут все n входящих в него элементов, то говорят о *параллельном соединении* этих элементов, расчетная надежность схемы которого приведена на рис. 9.3, б. В этом случае вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)],$$

а наработка на отказ и интенсивность отказов изделия вычисляются по

следующим формулам $T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt$, $\lambda(t) = Q(t, t + \Delta t) / \Delta t$.

Для равнонадежных элементов и экспоненциального распределения наработки до отказа среднее время наработки на отказ составит

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \dots + \frac{1}{n\lambda}.$$

В общем случае при смешанном параллельно-последовательном соединении элементов (рис. 9.3, в) следует найти вероятность безотказной работы для каждой из цепочек параллельно включенных элементов, а затем для всей схемы.

Для схемы, приведенной на рис. 9.3, в, результирующая вероятность безотказной работы

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{m_i} [1 - P_{ij}(t)] \right\}.$$

Если надежность схемы изделия содержит параллельное соединение, т. е. если в изделии повышение надежности обеспечивается использованием функционально избыточных элементов, то в изделии имеет место **резерв** [33].

Различают общий и отдельный резерв [44].

Общий резерв – резерв, при котором функционально избыточные элементы предусматриваются на случай отказа изделия в целом. Резервирование ЭВМ в целом – это общее резервирование. В этом случае параллельно работают основная и резервные ЭВМ.

Раздельный (поэлементный) резерв – резерв, при котором функционально избыточные элементы предусматриваются на случай отказа отдельных элементов или групп элементов изделия.

При раздельном резервировании ЭВМ разбивается на отдельные подсистемы, каждая из которых или некоторые из них резервируются отдельно. При использовании раздельного резервирования можно выделить несколько уровней резервирования:

1. Резервирование на уровне деталей.
2. Резервирование на уровне элементов.
3. Резервирование на уровне устройств.

В настоящее время наиболее распространенным раздельным резервированием является резервирование на уровне устройств (ОЗУ, процессор, жесткие диски и т. д.), так как современные ЭВМ имеют модульное построение, а резервирование на уровне модулей значительно повышает ремонтпригодность.

Общий и раздельный резерв в зависимости от того, в каком режиме (включенном или выключенном) используются резервные элементы до момента начала их функционирования вместо отказавших основных элементов, подразделяют на *нагруженный* (горячий) и *ненагруженный* (холодный) резерв.

В случае нагруженного (горячего) резерва резервные элементы находятся в том же рабочем режиме, что и основные.

В случае ненагруженного (холодного) резерва резервные элементы до момента их использования вместо основных элементов практически не несут нагрузок, находятся в выключенном состоянии.

Программное резервирование. Часто нет возможности увеличить надежность вычислительной системы путем ввода резервных элементов, так как могут накладываться жесткие ограничения на габариты, массу, потребляемую мощность и другие параметры аппаратуры. В этом случае прибегают к программным методам повышения надежности и живучести вычислительных систем [44].

Эти методы можно поделить на три группы:

1. Методы с временной избыточностью.
2. Методы с программной избыточностью.
3. Методы с информационной избыточностью.

К первой группе методов относится многократное решение задач на одном и том же оборудовании и сравнение полученных результатов. При этом корректным считается тот результат, который совпал большее число раз. Такой метод позволяет фиксировать и исправлять сбои, вызванные, например, наводкой в аппаратуре или другими внешними воздействиями.

Если ошибка будет носить стабильный характер, то необходимо прибегать к иным методам. Например, периодически запускать эталонные задачи и сравнивать полученный результат с предполагаемым. Этот метод относится к программной избыточности.

К программной избыточности так же можно отнести выполнение одних и тех же функций на разных модулях вычислительной системы с одними и теми же исходными данными и сравнение полученных результатов. Либо решение задачи разными способами на разных вычислительных системах и выбора правильного на основе мажоритарной логики.

Информационная избыточность – это увеличение количества информации с целью повышения надежности и достоверности передачи или хранения данных (проверка на четность, контрольная сумма, и др.)

Информационную избыточность можно поделить на два типа методов:

1. Методы обнаружения ошибок.
2. Методы коррекции ошибок.

Программные методы повышения надежности и живучести могут быть достаточно эффективными, и во многих случаях позволяют достичь заданной надежности, не прибегая к увеличению объема аппаратуры и потребляемой мощности. Однако, наиболее эффективным является совмещение программных и аппаратных методов повышения надежности, что обычно и применяют на практике.

Существуют следующие практические рекомендации по построению надежных ЭВМ [33]:

введение структурной избыточности путем построения узлов, устройств и вычислительных систем с изменяющейся архитектурой при возникновении отказов отдельных изделий;

ремонт отказавших изделий без нарушения функционирования ЭВМ в целом;

создание бессбойного математического обеспечения.

10. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭВМ

Надежность ЭВМ весьма чувствительна к рабочей температуре ее элементов, в частности интенсивность отказов ИМС увеличивается вдвое при изменении температуры последних на каждые 18 °С. Как отмечалось, основные трудности по обеспечению требуемого теплового режима элементов ЭВМ связаны с отводом теплоты.

10.1. Физические явления в распространении тепловой энергии

В процессе распространения тепловой энергии участвуют три физических явления: излучение, теплопроводность, конвекция [33].

Передача теплоты излучением происходит в виде электромагнитных волн главным образом в диапазоне длин волн 0,3–10 мкм.

Мощность теплового потока $P_{из}$, излучаемого телом с поверхности излучения $S_{из}$, оценивают по закону Стефана-Больцмана:

$$P_{из} = \varepsilon C_0 S_{из} [(0,01T_1)^4 - (0,01T_2)^4],$$

где ε – степень черноты поверхности излучения (значения ε для некоторых материалов, применяемых при конструировании, приведены в табл. 10.1); $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $S_{из}$ – поверхность излучения; T_1 и T_2 – температуры поверхности тела и окружающей среды соответственно.

Таблица 10.1

Значения ε для некоторых материалов

Материал	Температура, °С	Степень черноты поверхности излучения ε
Алюминий полированный	50—500	0,04—0,06
Дюралюминий Д-16	50—350	0,37—0,41
Лак черный матовый	40—100	0,96—0,98
Краски эмалевые	20—100	0,92
Краска защитно-зеленая	20	0,9

Передача теплоты теплопроводностью обусловливается, как известно, обменом энергией между молекулами вещества и диффузией электронов. Оба эти явления имеют место при разнице температур в различных точках конструкции. Количество теплоты Q , проходящей через однородное тело в единицу времени, связано законом Фурье с градиентов температур dT/dx по формуле:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda S_{\text{конд}} \frac{dT}{dx},$$

где $S_{\text{конд}}$ – поверхность поперечного сечения тела, нормального к направлению теплового потока; λ – теплопроводность материала (табл. 10.2)

Для стационарных процессов, когда $dQ/dt = P_{\text{конд}} = \text{const}$, получим

$$P_{\text{конд}} = \lambda S_{\text{конд}} \frac{T_1 - T_2}{b},$$

где b – толщина материала между точками с температурой T_1 и T_2 .

Таблица 10.2

Значения теплопроводности для некоторых материалов

Материал	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)
Серебро	416
Медь	390
Золото	297
Бериллиевая керамика	220
Алюминий А0, А5, А7	210
Алюминий АЛ-6	196
Алюминиевый сплав АМД	188
Олово	67
Сталь низкоуглеродистая	46
Оксид алюминия	27,5
Керамика «Поликор»	22
Ковар	18
Сталь нержавеющая 12Х18Н10Т	14
Керамика М-7	9,7
Керамика 22ХС	8,0
Ситалл	1,5
Паста КИТ-8	0,8
Кремний	84
Стекло С48-2, С52-1	1,2
Клей ВК-9	0,8
Слюда	0,58
Текстолит	0,33
Стеклотекстолит	0,231
Полиимидная пленка ПМ-1	0,16
Эпоксидная смола	0,1
Полихлорвиниловая пленка	0,11
Воздух в малых зазорах	0,05
Пенопласт	0,0575

Явление конвекции состоит в переносе теплоты перемещающимися частицами вещества (жидкости или газа).

Поток теплоты в единицу времени, отводимый конвекцией $P_{\text{конв}}$ от нагретого тела, пропорционален теплоемкости вещества окружающей среды c , расходу этого вещества W и средней разности температур между нагретым телом T_1 и окружающей средой T_2 :

$$P_{\text{конв}} = c W (T_1 - T_2).$$

10.2. Способы охлаждения конструкции ЭВМ

На практике в конструкциях ЭВМ распространены естественное воздушное и принудительное воздушное охлаждения. В связи с ростом удельной мощности, рассеиваемой в боках ЭВМ, применяются и такие виды конвективного охлаждения, как естественное испарительное и принудительное жидкостное охлаждения.

Теплопроводность конструкции повышается за счет применения:

- 1) медных или алюминиевых теплопроводящих шин, на которые непосредственно устанавливаются корпуса ИС;
- 2) металлических (алюминиевых, титановых) рамок в ячейках;
- 3) металлических плат (сталь, покрытая эмалью, платы из инвара, анодированный алюминий);
- 4) многослойных керамических плат, изготовленных по толсто пленочной технологии;
- 5) тепловых разъемов и установочных клиньев для ячеек;
- 6) теплопроводящих паст, клеев.

Интенсивность теплообмена при естественном воздушном охлаждении увеличивается при:

- 1) оптимальном расположении элементов;
- 2) перфорации кожуха;
- 3) применении тепловых экранов;
- 4) оребрении отдельных поверхностей;
- 5) использовании теплопроводящих шин;
- 6) соответствующей окраске.

При принудительном воздушном охлаждении широко распространены следующие способы:

- 1) перемешивание воздуха внутри блока;
- 2) наружный обдув;
- 3) продувка.

На рис. 10.1 приведены возможные варианты охлаждения конструкции ЭВМ [10].

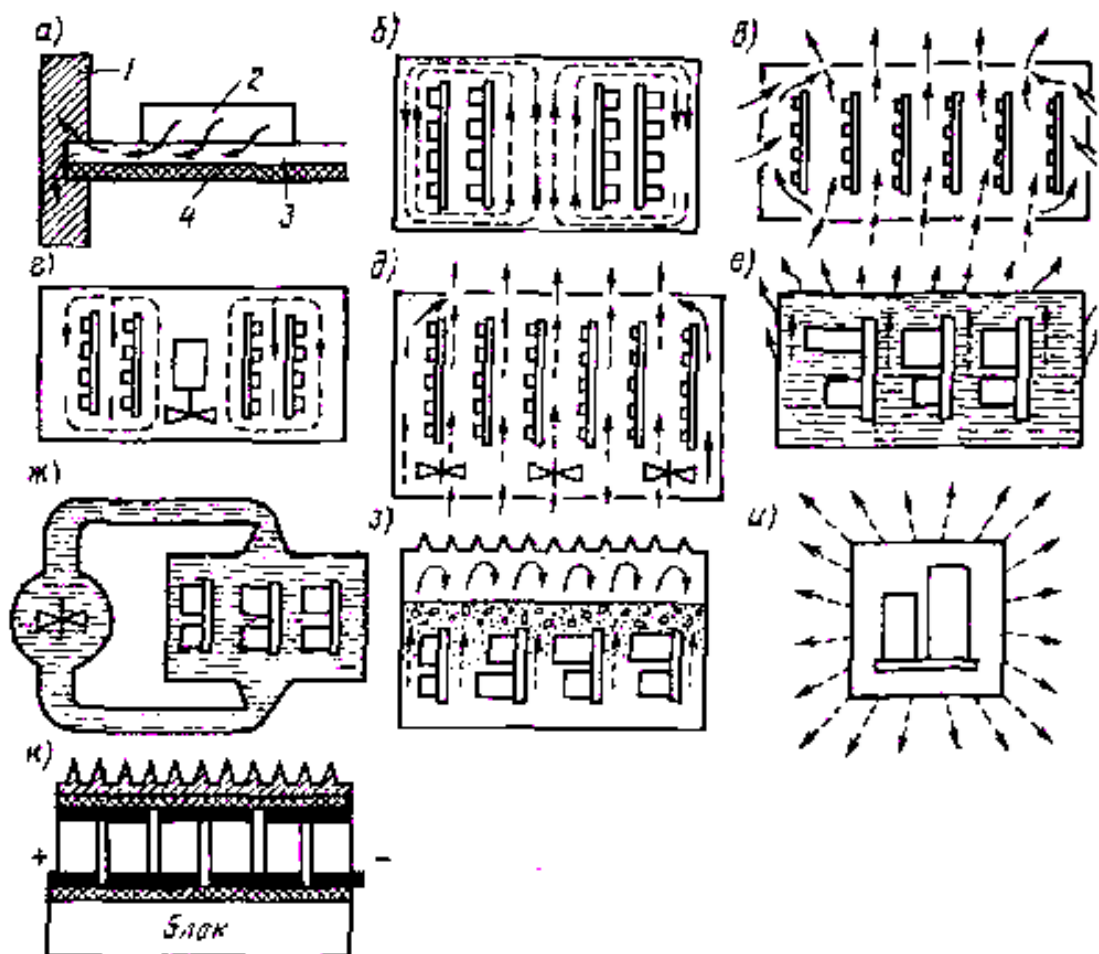


Рис. 10.1. Способы отвода теплоты в микроэлектронной аппаратуре: а – охлаждение теплопроводностью; б – естественное воздушное в герметизированном корпусе; в – естественное в негерметизированном корпусе; г, д – принудительное воздушное в герметизированном и негерметизированном корпусе; е – естественное жидкостное; ж – принудительное жидкостное; з – испарительное; и – излучением; к – основанное на эффекте Пельтье; 1 – стенка прибора; 2 – интегральная схема; 3 – теплоотвод; 4 – печатная плата

Для стационарной электронной вычислительной аппаратуры используются в основном способы охлаждения теплопроводностью, воздушное естественное и принудительное, а также принудительное воздушное с дополнительным охлаждением жидкостью в трубопроводах [10].

11. ПРОИЗВОДСТВО СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Производство СВТ – это сложный и дорогостоящий процесс, включающий в себя решение проблем конструкторско-технологического обеспечения. Освоение нового изделия в промышленности и наладка его серийного производства требует поставки нового оборудования, освоение новых технологий, технологической оснастки, материалов, комплектующих элементов, т. е. большого объема организационно – технических работ.

Для выпуска готового изделия необходимо иметь на предприятии весь замкнутый цикл производственного процесса, который в основном состоит из определенной последовательности технологических процессов. Реализация этих процессов зависит от их организации, оснащенности и квалифицированных кадров.

Для понимания сущности производственных процессов при изготовлении изделий, в данном случае средств вычислительной техники, необходимо иметь общее представление о типах производства, о технологических процессах, о технологичности конструкции и т. п. [2].

11.1. Разделение технологических процессов на операции

Сущность технологических и производственных процессов отражается в следующих понятиях [2].

Производственный процесс – совокупность действий, в результате которых поступающие на завод материалы и полуфабрикаты (заготовки) превращаются в готовые изделия.

Производственный процесс – это широкое понятие. Он включает в себя не только основные технологические процессы, непосредственно связанные с изготовлением деталей и сборкой, но и все необходимые вспомогательные, например, подготовку производства, транспортировку, контроль и хранение материалов, ремонт оборудования, изготовление технологической оснастки.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, непосредственно связанная с изменением физического, химического состояния материала, размеров, формы, внешнего вида и взаимного расположения элементов при изготовлении и сборке изделия. Технологический процесс – это жесткий алгоритм. В нем ничего нельзя менять без эксперимента и контроля.

Различают два основных этапа технологического процесса: изготовление деталей и сборку.

Технологический процесс изготовления деталей состоит из операций получения заготовок и последующей их обработки.

Под *операцией* понимают завершенную часть технологического процесса, которая выполняется на одном рабочем месте одним или группой рабочих над определенной деталью или сборочной единицей (совокупностью деталей, сборочных единиц). Примеры отдельных операций: сверление отверстия в детали; нарезание зубьев зубчатого колеса; штамповка пластин магнитопровода; пропитка трансформатора; нанесение покрытия и т. д.

Проектирование технологических процессов изготовления деталей и сборки начинают: 1) с изучения рабочих чертежей и технологических условий; 2) определения последовательности выполнения операций; 3) выбора оборудования, оснастки; 4) расчета технологических режимов и нормирования и т. п.

При разбивке технологического процесса на операции возможны два пути: *концентрация* (укрупнение), т. е. соединение нескольких простых операций в одну сложную, и *дифференциация*, т. е. раздробление операции на несколько простых. В последнем случае требуется большое число рабочих мест, на каждом из которых выполняется простая операция.

Для производства ЭВМ характерно применение как принципа дифференциации, так и принципа концентрации операций. Последнее направление обычно имеет место на участках окончательной сборки.

Правильность построения технологического процесса гарантирует *типизация технологических процессов* (идею которой предложил проф. А.П. Соколовский). О типизации было изложено ранее.

11.2. Типы производства и их характерные особенности

Построение технологического процесса и степень его детализации зависит от типа производства [2].

Для производства главным показателем является объем и качество. В зависимости от объема выпускаемой продукции различают три типа производства: единичное, серийное, массовое.

Единичным называется производство, при котором процесс изготовления одного или нескольких изделий вовсе не повторяется или повторяется через неопределенные промежутки времени.

Такое производство характеризуется применением универсального оборудования и приспособлений, использованием нормализованного

(стандартного) рабочего места, универсального измерительного инструмента и расположением оборудования группами по типам станков.

Серийным называется производство, при котором процесс изготовления изделий ведется партиями или сериями, регулярно повторяющимися через определенные промежутки времени. Для серийного производства характерна периодичность как отдельных операций, так и всего технологического процесса изготовления изделий, т. е. цикличность производства.

В зависимости от номенклатуры выпускаемых изделий и программы выпуска применяется как универсальное, так и специализированное оборудование, а в отдельных случаях и специальное, а также применяется специальный рабочий и измерительный инструмент.

Массовым называется производство, при котором изготовление изделий ведется таким образом, что на одних и тех же рабочих местах выполняются одни и те же постоянно повторяющиеся операции. Для массового производства характерно применение специализированного и специального оборудования с автоматическим циклом работы, расставленного в соответствии с технологическим процессом, что обеспечивает непрерывность подачи деталей на сборку и возможность применения высокопроизводительных приспособлений, специального и нормализованного инструмента и т. д. При массовом производстве осуществляется принцип взаимозаменяемости.

На этапах изготовления деталей и комплектующей элементной базы (ИМС, РЭК) производство можно рассматривать как массовое, или крупносерийное, а на этапах окончательной сборки изделия (универсальной ЭВМ) – как единичное, или мелкосерийное.

11.3. Технологичность конструкции

Технологичность конструкции является одной из важнейших характеристик изделия [2].

Под *технологичной* понимают такую конструкцию, которая, отвечая всем эксплуатационным требованиям, обеспечивает изготовление изделия в данных конкретных условиях с наименьшими затратами времени, труда и материалов при использовании наиболее прогрессивных, экономически оправдываемых методов производства.

Требования, предъявляемые к технологичности конструкции, меняются в зависимости от масштабов производства (деталь,

технологичная при серийном производстве, может оказаться нетехнологичной при массовом производстве).

В качестве основных показателей технологичности можно принять: коэффициенты преемственности; повторяемости; нормализации; применения и использования материалов и др.

Рассмотрим эти показатели.

1. Коэффициент преемственности K_D определяет наличие в новой конструкции деталей и узлов, применявшихся в ранее созданных конструкциях:

$$K_D = N_0 / (N - N_K),$$

где N_0 – число заимствованных изделий, поставляемых и нормализованных деталей в данной конструкции; N – общее число деталей; N_K – общее число нормализованных крепежных деталей.

Очевидно, что K_D должен увеличиваться.

2. Коэффициент повторяемости K_Y устанавливает степень унификации детали в данной конструкции и выражает среднее число деталей, приходящихся на одно наименование:

$$K_Y = N / N_H,$$

где, N_H – число наименований деталей в изделии.

3. Коэффициент нормализации K_C устанавливает степень применяемости в данной конструкции стандартных и нормализованных деталей:

$$K_C = N_C / (N - N_K),$$

где N_C – число стандартных и нормализованных деталей.

4. Коэффициент применения материалов K_M устанавливает степень многообразия применяемых в конструкции типоразмеров и марок материалов:

$$K_M = N / N_M,$$

где N_M – общее число, применяемых в конструкции типоразмеров и марок материалов.

5. Коэффициент использования материалов $K_{им}$ выражает отношение массы деталей Q_D к массе заготовок Q_3 :

$$K_{им} = Q_D / Q_3.$$

Технологичная конструкция должна обеспечивать независимость сборки и разборки отдельных частей без дополнительной обработки, простоту выполнения электрического монтажа, сборки и разборки.

12. САПР ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Проектирование печатных плат, печатных узлов и блоков в настоящее время производится в системах автоматизированного проектирования электронной аппаратуры [2].

В широком смысле под САПР понимают организационно-техническую систему, предназначенную для проектирования электронной аппаратуры. В узком смысле САПР – это пакет прикладных программ, в котором выполняется проектирование изделий.

На мировом рынке в настоящее время выявилось преимущественное положение трех ведущих производителей САПР электронной аппаратуры: *Mentor Graphics*, *Cadence*, *Zuken*. В совокупности они занимают около 70% мирового рынка (рис. 12.1) [37].

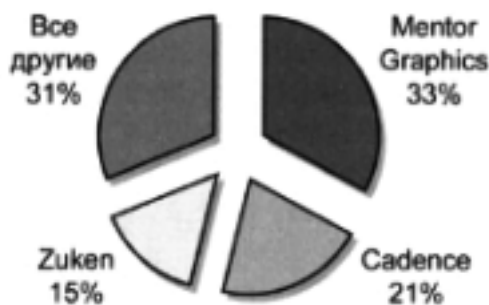


Рис. 12.1. Распределение мирового рынка САПР ЭА

В России наиболее популярными САПР являются P-CAD и Altium Designer.

Современные САПР электронной аппаратуры обладают широким набором возможностей, главные из которых рассмотрены ниже [2].

Библиотеки компонентов. Все САПР электронной аппаратуры оперируют компонентами, информация о которых хранится в специальных библиотеках. Для каждого компонента в библиотеке могут содержаться следующие данные:

- УГО компонента (*symbol*);
- посадочное место (*pattern*, *footprint*);
- модель для функционально-логического моделирования;
- модель для расчета искажений сигнала на ПП (*IBIS*-модель);
- трехмерная геометрическая модель.

Для работы с библиотеками предназначен отдельный модуль или программа (рис. 12.2). В ней пользователь имеет возможность создавать

новые компоненты, редактировать символы и посадочные места, подключать модели, и т. д. Современные САПР поставляются с большим набором библиотек, которые можно обновлять.

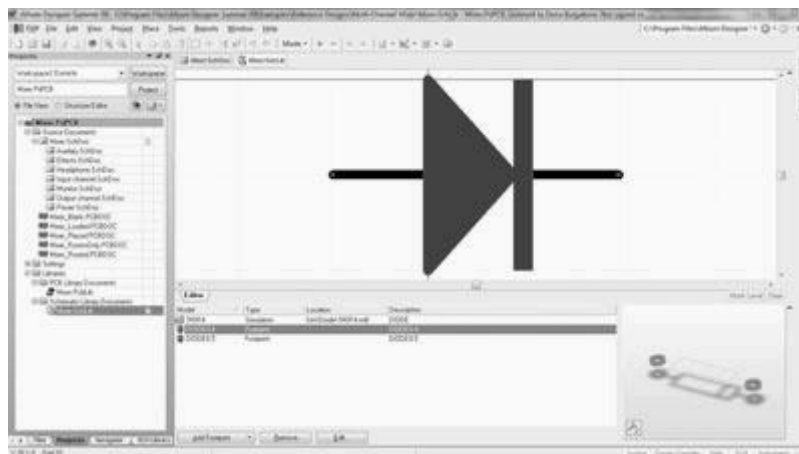


Рис. 12.2. Редактор библиотек Altium Designer

Создание принципиальных схем. Редакторы принципиальных схем в САПР электронной аппаратуры обладают следующими возможностями:

- поддержка координатной сетки;
- размещение на схеме УГО компонентов;
- соединение элементов линиями связи;
- создание шин (жгутов);
- присвоение линиям связи любых уникальных имен;
- рисование простых графических примитивов;
- размещение на схеме таблиц и текста;
- оформление схемы по стандартам.

Современные редакторы принципиальных схем поддерживают многолистовые проекты с иерархической структурой (рис. 12.3).

Редактирование печатных плат. В каждой САПР электронной аппаратуры присутствует отдельный модуль, позволяющий разработчику производить ручную компоновку и трассировку ПП (рис. 12.4, 12.5). Эти модули называются редакторами печатных плат.

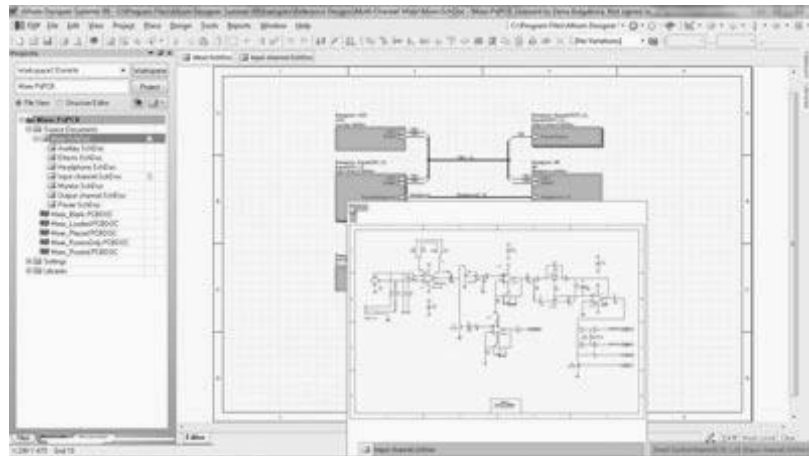


Рис. 12.3. Редактор принципиальных схем Altium Designer

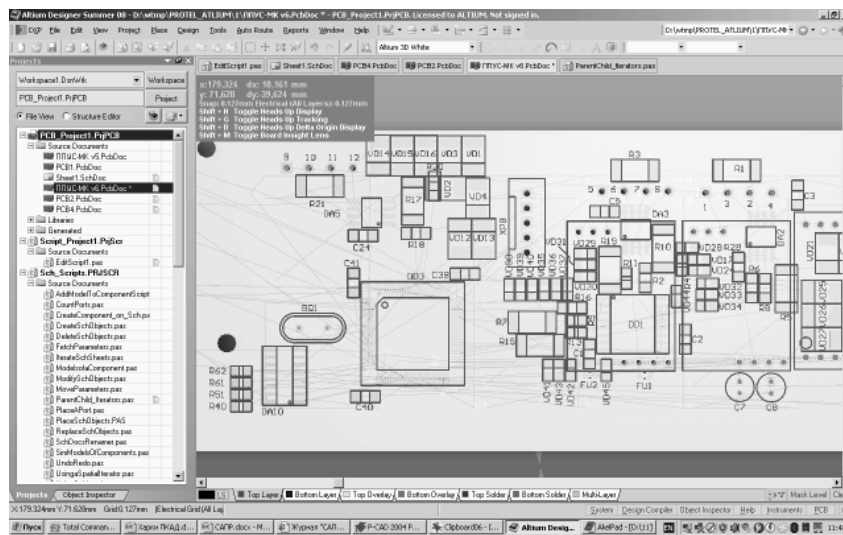


Рис. 12.4. Редактор печатных плат Altium Designer



Рис. 12.5. Редактирование правил в Altium Designer

Их основные возможности:

- поддержка координатной сетки (в том числе нерегулярной);
- рисование контура платы любой формы;
- размещение на плате посадочных мест компонентов;
- задание широкого набора правил проектирования, соблюдение которых может проверяться как в реальном времени, так и при запуске специальных процедур проверки (рис. 12.5);
- трассировка одиночных проводников и шин;
- трассировка дифференциальных пар с контролем длин;
- размещение на плате участков сплошной металлизации;
- создание на плате базовых и монтажных отверстий, а также вырезов;
- размещение на плате таблиц и текста;
- оформление чертежей ПП по стандартам.

Автоматическая компоновка и трассировка ПП. Многие САПР позволяют производить полностью автоматическую компоновку и трассировку ПП по заданной разработчиком программе. В процессе размещения и трассировки САПР учитывает все заданные технологические и функциональные требования.

Схемотехническое моделирование. Данная возможность позволяет проверить правильность разработки принципиальной схемы. Современные САПР поддерживают как логическое (цифровое) моделирование (в том числе с участием ПЛИС), так и аналоговое моделирование (рис. 12.6).

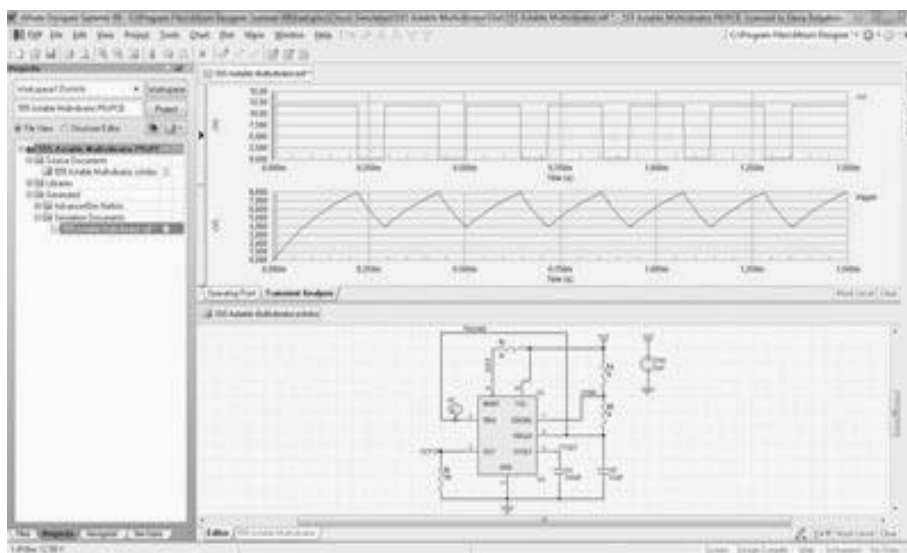


Рис. 12.6. Схемотехническое моделирование в Altium Designer

Для моделирования работы схемы нужно иметь модели всех элементов, которые в нее входят. Пользователь может изменять параметры сигналов на входе, а также просматривать форму сигнала в любой точке схемы.

Анализ целостности сигналов. ПП в цифровых устройствах могут сильно исказить форму цифрового сигнала. Для обнаружения этих искажений применяется моделирование прохождения сигнала по проводникам ПП с использованием *IBIS*-моделей. Импеданс проводников, отражения и возможные перекрестные помехи могут быть уточнены на заключительных этапах разработки, при контроле топологии.

3D-моделирование. В некоторых САПР (например, *Altium Designer*) существует возможность просмотра трехмерного вида проектируемой платы. Разработчик может вывести на монитор реальный вид платы с компонентами (рис. 12.7), оценить ее сопряжение с механическими деталями конструкции и внести необходимые изменения.

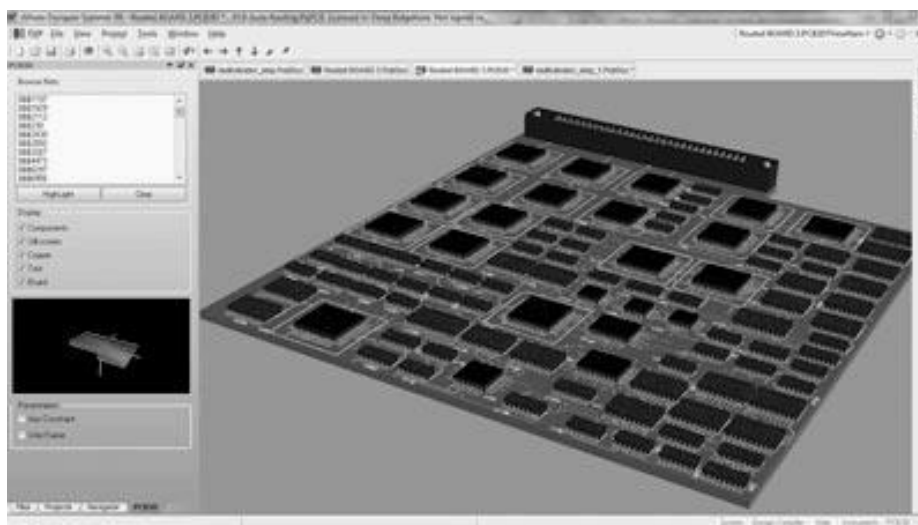


Рис. 12.7. Просмотр трехмерного изображения печатного узла
в *Altium Designer*

Технологическая подготовка. Часто в состав САПР электронной аппаратуры входят САМ-программы, предназначенные для подготовки проекта к производству. Здесь имеется возможность технологического анализа топологии и автоматического устранения большинства ошибок. Также САМ-программы позволяют выпускать управляющие файлы для аппаратуры электрического контроля и монтажа компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ненашев А.П. Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры / А.П. Ненашев, Л.Д. Коледов. – М.: Радио и связь, 1981. – 304 с.
2. Иванов И.В. Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ: учеб. пособие / И.В. Иванов. – Томск: Изд. ТПУ, 2011. – 192 с.
3. Преснухин Л.Н. Конструирование электронных вычислительных машин и систем / Л.Н. Преснухин, В.А. Шахнов. – М.: Высш. шк., 1986. – 512 с.
4. Махлин Е. Взаимодействие инженера-схемотехника и инженера-конструктора // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – №3. – С. 8–10.
5. Проскуряков А.В. Экономика и организация разработок, освоение и производство микроэлектроники / А.В. Проскуряков, Н.К. Моисеева, Ю.П. Анискин; под ред. Л.А. Коледова. – М.: Высш. шк., 1978. – 160 с.
6. Опыт внедрения Единой системы технологической подготовки производства. Сб. статей. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 140 с.
7. Баранов С.А. Автоматизация проектирования цифровых устройств / С.А. Баранов, С.А. Майоров, Ю.П. Сахаров, В.А. Селютин. – Л.: Судостроение, 1979. – 264 с.
8. Иевлев В.И. Конструирование и технология электронных средств: учеб. пособие / В.И. Иевлев. 2-е издание стереотипное. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 217 с.
9. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / под ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
10. Ивченко В.Г. Конструирование и технология ЭВМ: конспект лекций в 2-х частях / В.Г. Ивченко. – Таганрог: ТГРУ, 2001. – 96 с.
11. Саймон Г. Наука об искусственном / Г. Саймон. – М.: Мир, 1975. – 108 с.
12. Компоновка и конструкции микроэлектронной аппаратуры / Под ред. Б.Ф. Высоцкого, В.Б. Пестрякова, О.А. Петлина. – М.: Радиосвязь, 1989. – 208 с.
13. Проектирование цифровых вычислительных машин: учеб. пособие / под ред. С.А. Майорова. – М.: Высш. шк., 1978. – 344 с.

14. Романов Ф.И. Конструкционные системы микро- и персональных ЭВМ: практ. пособие / Ф.И.Романов, В.А.Шахнов. – М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.
15. Бородин С.М. Общие вопросы проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие / С.М. Бородин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 103 с.
16. Коледов Л.А. Технологии и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л.А. Коледов. – СПб.: Лань, 2008. – 400 с.
17. Ефимов И.Е. Микроэлектроника: физические и технологические основы, надежность / И.Е. Ефимов, И.Я. Козыр, Ю.И. Годунов. – М.: Высш. шк., 1986. – 463 с.
18. Аваев Н.А. Основы микроэлектроники: учеб. пособие / Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, В.Т. Фролкин. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
19. Тупик В.А. Технология и организация производства радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Тупик. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 144 с.
20. Медведев А.М. Технология производства печатных плат / А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 360 с.
21. Крылов В.П. Технологии и подготовка производства печатных плат: учеб. пособие / В.П. Крылов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 64 с.
22. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат / Е.В. Пирогова. – М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2005. – 562 с.
23. Скубилин М.Д. Конспект лекций по курсу «Технология и автоматизация производства электронной аппаратуры» / М.Д. Скубилин, А.В. Письменов. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 345 с.
24. Вотинцев А., Зеленюк И. Технология поверхностного монтажа step-by-step. Ч.1. // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 1. – С. 46–51.
25. Вотинцев А., Зеленюк И. Технология поверхностного монтажа step-by-step. Ч.2. // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 42–47.
26. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования / под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Сов. радио, 1980. – 480 с.
27. Савельев А.Я. Конструирование ЭВМ и систем. Учебник для вузов / А.Я. Савельев, В.А. Овчинников. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
28. Кутявина С.К. Конструирование производства ЭВМ: учеб. пособие / С.К. Кутявина. – Томск: Изд-во ТПИ, 1978. – 93 с.

29. Овчинников В.А. Конструирование и спецтехнология ЭВМ. – Режим доступа: <http://viu6.wwwcom.ru/constr/konstr.tar.gz>
30. Лебеденко Е. Компьютер Space Shuttle. – Режим доступа: <http://old.computerra.ru/print/623132/>
31. Бердичевский М. Конструктивы Евромеханики во встраиваемых системах // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 4. – С. 52–59.
32. Система ЕВРОМЕХАНИКА. – Режим доступа: http://www.antel.info/index.php?option=com_content&view=article&id=13:euromechanika-01&catid=25:euromechanics&Itemid=17.
33. Микропроцессоры: в 3-х кн. Кн. 2 Средства сопряжения. Контролирующие и информационно-управляющие системы: уч. для вузов / под. ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Высш. школа, 1986. – 383 с.
34. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Г. Отт. – М.: Мир, 1979. – 318 с.333
35. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 3-х томах. Т. 2 Линейные и нелинейные цепи / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Изд-во «Питер», 2003 – 572 с.
36. Зернов Н.В. Теория радиотехнических цепей / Н.В. Зернов, В.Г. Карпов. – М.: Энергия, 1965. – 892 с.
37. Кечиев Л.Н. Проектирования печатных плат для быстродействующей цифровой аппаратуры / Л.Н. Кечиев. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
38. Агеев Ю.М. Автоматизированные системы управления непрерывными технологическими процессами: учеб. пособие / Ю.М. Агеев, В.И. Коновалов, Г.Ф. Мазурек, В.Н. Скороспешкин. – Томск: Изд-во ТПИ, 1987. – 95 с.
39. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы / М.П. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 438 с.
40. Гитис Э.И. Аналого-цифровые преобразователи: уч. пособие для вузов / Э.И. Гитис, Е.А. Пискулов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
41. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы: учеб. для вузов / П.П. Орнатский. – Киев: Вищ. шк., 1986. – 504 с.
42. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов – Изд-во «СОЛОН-Пресс», 2004. – 768 с.
43. Федосов В.П. Цифровая обработка сигналов в *LabVIEW* / В.П. Федосов, А.К. Нестеренко. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 456 с.
44. Вычислительные системы и сети. Надежность ВС. – Режим доступа: http://all-ht.ru/inf/systems/p_0_1.html.

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУИРОВАНИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ	4
1.1. Основные понятия и определения	5
1.2. Этапы создания ЭВМ	6
1.3. Проблемы заключительного этапа проектирования ЭВМ	7
1.4. Подготовка предприятия к освоению нового изделия	9
1.5. Отработка изделия в опытном производстве	12
1.6. Технологическая подготовка производства	13
1.7. Организационная подготовка производства	15
1.8. Промышленное освоение изделия	17
2. ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВТ	20
2.1. Этапы проектирования ЭВМ	21
2.2. Документация	26
2.2.1. Схемная документация	27
2.2.2. Правила выполнения электрических схем	29
2.3. Модульный принцип конструирования СВТ	32
2.4. Иерархическое построение конструкции ЭВМ	34
2.4.1. Связь конструкторской и функциональной иерархии	34
2.4.2. Краткая характеристика уровней конструкций ЭВМ	36
2.5. Факторы, влияющие на выбор конструкторского решения	39
2.6. Требования, предъявляемые к конструкции ЭВМ	41
2.7. Показатели качества конструкции ЭВМ	44
3. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К КОНСТРУКТОРСКИМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ЗАДАЧАМ	46
3.1. Конструкционные системы ЭВМ	46
3.1.1. Типизация, унификация, стандарты	48
3.1.2. Метод базовых несущих конструкций	50
3.2. Влияние стандартизации на принятие конструкторско- технологических решений	51
4. КОНСТРУКТИВНЫЕ МОДУЛИ ПЕРВОГО УРОВНЯ	54
4.1. Интегральные микросхемы	54
4.2. Материалы для микросхем	59
4.3. Технология изготовления полупроводниковых микросхем	60
4.4. Корпуса микросхем	62
4.5. Проектирование микросхем	67
5. КОНСТРУКТИВНЫЕ МОДУЛИ ВТОРОГО УРОВНЯ	70
5.1. Основные понятия и определения	71
5.2. Материалы для печатных плат	72
5.3. Типы печатных плат	74
5.4. Нанесение защитных покрытий	76
5.4.1. Фоторезисты	76
5.4.2. Паяльная маска	78
5.5. Операции химической обработки	79

5.6. Методы изготовления ОСПП и ДСПП.....	81
5.7. Методы изготовления МСПП.....	84
5.8. Контроль печатных плат.....	86
5.9. Сборка печатных узлов	90
5.9.1. Комплектация устанавливаемых на ПП элементов	90
5.9.2. Подготовка элементов к монтажу.....	91
5.9.3. Установка компонентов на плату	92
5.9.4. Пайка элементов на печатной плате	93
5.10. Проектирование печатных плат	97
6. ТРЕТИЙ И ЧЕТВЕРТЫЙ МОДУЛИ КОНСТРУКЦИИ ЭВМ.....	104
6.1. Элементы верхних уровней конструкции ЭВМ.....	104
6.2. Компоновка внутренняя и внешняя.....	110
6.3. Примеры конструкций ЭВМ	112
6.3.1 Конструктивная иерархия ЭВМ фирмы <i>IBM</i>	112
6.3.2 Устройство компьютера <i>Space Shuttle</i>	118
6.3.3. Система Евромеханика.....	119
7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ЭВМ.....	122
7.1. Помехи в сигнальных линиях связи.....	124
7.2. Помехи в «коротких» линиях связях.....	124
7.3. Перекрестная помеха	129
7.4. Помехи в электрически длинных линиях связи	132
7.5. Помехи по цепям питания и методы их уменьшения	138
7.5.1. Применение развязывающих конденсаторов	139
7.5.2. Уменьшение общих участков протекания токов	141
7.5.3. Использование металлического листа.....	142
7.5.4. Использование сплошных металлических прокладок	143
7.6. Электромагнитная совместимость	143
7.6.1. Аналоговые фильтры.....	144
7.6.2. Применение экранов в ЭВМ	147
8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭВМ С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ.....	151
8.1. Устройства сопряжения с объектом	151
8.2. Подсистемы аналогового и цифрового ввода-вывода	152
8.3. Выбор АЦП.....	158
8.4. Взаимодействие человека-оператора в системе человек-машина ..	161
9. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭВМ	167
9.1. Показатели надежности ЭВМ	167
9.2. Методы повышения надежности ЭВМ.....	172
9.3. Контроль исправности аппаратуры	174
9.4. Резервирование оборудования.....	174
10. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭВМ.....	179
10.1. Физические явления в распространении тепловой энергии	179
10.2. Способы охлаждения конструкции ЭВМ.....	181
11. ПРОИЗВОДСТВО СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ.....	183
11.1. Разделение технологических процессов на операции	183

11.2. Типы производства и их характерные особенности.....	184
11.3. Технологичность конструкции.....	185
12. САПР ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ.....	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	192
УКАЗАТЕЛЬ СОКРАЩЕНИЙ	198

УКАЗАТЕЛЬ СОКРАЩЕНИЙ

АЗУ – аналоговое запоминающее устройство
АМ – аналоговый мультиплексор
АФ – аналоговые фильтры
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
БУ – буферное устройство
ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи
ГПП – гибкая печатная плата
ГСИ – государственная система обеспечения единства измерений
Д – датчик
ДД – дискретный датчик
ДСПП – двухсторонняя печатная плата
ЕСКД – единая система конструкторской документации
ЕСКК – единая система классификации и кодирования технико-экономической информации
ЕСПД – единая система программной документации
ЕСТД – единая система технологической документации
ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства
ЗФ – заграждающий фильтр
ИМ – исполнительный механизм
ИМС – интегральная микросхема
ИСЗ – искусственный спутник Земли
ИУ – исполнительное устройство
ИФ – избирательный фильтр
К – каналы
КД – конструкторская документация
КПП – конструкторская подготовка производства
КС – конструкционная система
МДП – металл-диэлектрик-полупроводник
МК – микроконтроллер
МП – местная память
МСПП – многослойная печатная плата
НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НИР – научно-исследовательская работа
НП – нормализующий преобразователь
ОБ – объект
ОКР – опытно-конструкторская работа
ООП – отработка в опытном производстве

ОП – оперативная память
ОПП – организационная подготовка производства
ОСПП – односторонняя печатная плата
ПВв – подсистема ввода
ПВыв – подсистема вывода
ПОС – промышленное освоение
ПП – печатная плата
Пр – процессор
ПФ – полосовой фильтр
РК – развязывающий конденсатор
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
РЭК – радиоэлектронные компоненты
САПР – система автоматизированного проектирования
СВТ – средства вычислительной техники
СОНТ – создание и освоение новой техники
СУ – согласующее устройство
ТЗ – техническое задание
ТП – техническая подготовка
ТПП – технологическая подготовка производства
ТХП – технологический процесс
ТФС – техническая функциональная система
ТХМ – толстослойная химическая металлизация
ТЭЗ – типовый элемент замены
У – управление
УВВ – устройство ввода-вывода
УВХ – устройство выборки-хранения
УГО – условное графическое обозначение
УСО – устройство сопряжения с объектом
УСОп – устройство связи с оператором
Ф – фильтр
ФВЧ – фильтр верхних частот
ФНЧ – фильтр нижних частот
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь
ЦМ – цифровой мультиплексор
ЭВА – электронная вычислительная аппаратура
ЭМП – электромагнитная помеха
ЭМС – электромагнитная совместимость

Учебное издание

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

Учебное пособие

Автор-составитель
КИМ Валерий Львович

Корректурa И.О. Фамилия
Компьютерная верстка И.О. Фамилия
Дизайн обложки И.О. Фамилия

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 00.00.2013. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. . Уч.-изд.л. .
Заказ 000-13. Тираж 100 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет



Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университе-
та сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN
ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru