

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
для студентов специальности 1-40 02 01
«Вычислительные машины, системы и сети»

Составление и общая редакция
Т.В. Молодечкиной

Новополоцк 2005

УДК 004.3 (075.8)
ББК 32.973 я 73
К 65

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Л.М. Лыньков, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой защиты
информатизации УО «БГУИР»;
В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектроники УО «ПГУ»

Рекомендован к изданию методической комиссией
радиотехнического факультета

К 65 Конструирование и технология производства ЭВМ: Учеб.-метод. комплекс
для студ. спец. 1-40 02 01 «Вычислительные машины, системы и сети» / Сост. и
общ. ред. Т.В. Молодечкиной. – Новополоцк: ПГУ, 2005. – 236 с.

ISBN 985-418-378-5

Комплекс разработан в соответствии с учебным планом, типовой программой
курса. Содержит рабочую программу курса, цели дисциплины и пути их достижения,
опорный конспект лекций, указания к выполнению лабораторных работ (изданы от-
дельной методичкой), требования к знаниям и умениям студентов, рекомендуемую ли-
тературу.

Представлены материалы для текущего контроля качества знаний студентов,
описание рейтингового контроля в процессе изучения дисциплины.

Предназначен для студентов, магистрантов, аспирантов радиотехнических спе-
циальностей, преподавателей вузов и средних учебных заведений, инженерно-
технических работников.

УДК 004.3(075.8)
ББК 32.973 я 73

ISBN 985-418-378-5

© УО «ПГУ», 2005
© Молодечкина Т.В., сост., 2005

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
Рабочая программа	7
Опорный конспект лекций	11
Введение	12
БЛОК 1. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭВМ	14
Тема 1.1. Выбор стратегии и методов конструирования электронно-вычислительных машин	14
1.1.1. Виды работ при проектировании ЭВМ	14
1.1.2. Этапы проектирования ЭВМ	16
1.1.3. Методы конструирования	20
1.1.4. Общие принципы и основные задачи конструкторского проектирования ЭВМ и систем	23
1.1.5. Конструкция ЭВМ как иерархичная структура	26
1.1.6. Конструктивно-технологические и эксплуатационные требования к конструкции современных ЭВМ	29
Вопросы для самопроверки по теме 1.1	30
Тема 1.2. Основы конструирования ЭВМ	31
1.2.1. Влияние внешних факторов на работоспособность ЭВМ	31
1.2.2. Климатическое исполнение изделий ЭВМ	34
1.2.3. Требования, предъявляемые к техническим средствам ЭВМ	35
1.2.4. Показатели качества конструкций ЭВМ	35
1.2.5. Модульный принцип создания технических средств ЭВМ	38
Вопросы для самопроверки по теме 1.2	41
Тема 1.3. Методы и средства конструирования	41
1.3.1. Техническая документация на изделия ЭВМ	41
1.3.2. Конструкторская документация. Комплектность конструкторских документов	43
1.3.3. Схема как конструкторский документ	46
1.3.4. Правила выполнения схемы электрической принципиальной	48
1.3.5. Эксплуатационные и ремонтные документы	52
1.3.6. Методы конструирования штампованных деталей	53
1.3.7. Методика конструирования прессованных и литых деталей	58
1.3.8. Методы конструирования механических соединений	60
Вопросы для самопроверки по теме 1.3	63
Тема 1.4. Конструирование ЭВМ с учетом внешних факторов	64
1.4.1. Тепловой баланс и тепловой режим изделий ЭВМ	64
1.4.2. Виды теплообмена в конструкциях ЭВМ	65
1.4.3. Системы охлаждения и способы обеспечения нормального теплового режима конструкций ЭВМ	70
1.4.4. Виды механических воздействий	74
1.4.5. Реакция ЭВМ и их элементов на механические воздействия	75
1.4.6. Способы виброзащиты конструкций ЭВМ	77
1.4.7. Движение радиоэлектронного блока на амортизаторах при воздействии вибраций	78
1.4.8. Оценка виброзащищенности радиоаппаратуры	81
1.4.9. Определение собственных частот колебаний печатных плат	85
1.4.10. Причины возникновения помех в ЭВМ	86

1.4.11. Помехи при соединении элементов ЭВМ	87
1.4.12. Методы снижения паразитных связей	89
1.4.13. Методы защиты от помех	93
1.4.14. Способы защиты конструкций ЭВМ от агрессивной внешней среды.	
Покрытия.....	96
1.4.15. Защита герметизацией.....	98
Вопросы для самопроверки по теме 1.4	99
БЛОК 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ .	101
Тема 2.1. Основы методологии автоматизированного проектирования	101
2.1.1. Необходимость применения и сущность САПР	101
2.1.2. Классификация и архитектура САПР	103
2.1.3. Основные требования и принципы создания САПР	105
2.1.4. Определение и состав математического обеспечения САПР.....	106
2.1.5. Методы повышения эффективности МО САПР.....	107
2.1.6. Формальное описание коммутационных схем.	
Основные модели представления коммутационной схемы в памяти ЭВМ.....	109
2.1.7. Математическая модель монтажного пространства.....	111
2.1.8. Компоновка типовых элементов конструкции	112
2.1.9. Алгоритмы размещения	115
2.1.10. Алгоритмы и модели трассировки	118
2.1.11. Трассировка проводных соединений	121
2.1.12. Трассировка печатных соединений.....	122
Вопросы для самопроверки по теме 2.1	126
Тема 2.2. Применение пакетов САПР при проектировании ЭВМ	127
2.2.1. Назначение и возможности системы автоматизированного проектирования AutoCAD	127
2.2.2. Трехмерное моделирование в системе AutoCAD.....	129
2.2.3. Назначение, возможности, структура PCAD	130
2.2.4. Состав и структура системы PCAD	133
Вопросы для самопроверки по теме 2.2	138
БЛОК 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ	139
Тема 3.1. Содержание и порядок технологического проектирования	139
3.1.1. Системный подход к технологии.	
Иерархические уровни производства ЭВМ.....	139
3.1.2. Конструкторские и технологические службы НИИ и предприятий.....	140
3.1.3. Технологичность элементов и деталей ЭВМ.....	142
3.1.4. Автоматизация производства ЭВМ.	
Гибкие производственные системы	144
3.1.5. Технологическая документация	147
Вопросы для самопроверки по теме 3.1	148
Тема 3.2. Материалы и методы формообразования деталей ЭВМ	149
3.2.1. Материалы, применяемые в производстве ЭВМ.....	149
3.2.2. Классификация методов формообразования деталей	154
3.2.3. Формообразование литьем.....	156
3.2.4. Обработка давлением	156
3.2.5. Методы изготовления деталей из пластмасс	158
3.2.6. Получение деталей из порошков.....	160
3.2.7. Электрофизические и электрохимические методы обработки	161

3.2.8. Электроэрозионная обработка материалов	162
3.2.9. Электронно-лучевые методы обработки	163
3.2.10. Лазерная обработка материалов	164
3.2.11. Ультразвуковая обработка	165
3.2.12. Основы плазменной технологии	166
Вопросы для самопроверки по теме 3.2	167
Тема 3.3. Проектирование и технология печатного монтажа	168
3.3.1. Общие понятия, классификационные признаки и основные конструкторско-технологические разновидности печатных плат	168
3.3.2. Методы изготовления ПП	172
3.3.3. Материалы для изготовления ПП	174
3.3.4. Формирование рисунка схемы	176
3.3.5. Методы коммутации	179
3.3.6. Типовые процессы изготовления печатных плат	181
3.3.7. Контроль качества и диагностика плат	183
Вопросы для самопроверки по теме 3.3	185
Тема 3.4. Базовые технологические процессы изготовления интегральных микросхем	186
3.4.1. Классификация интегральных микросхем	186
3.4.2. Особенности создания конструкций интегральных микросхем и их технологии	187
3.4.3. Конструктивно-технологические особенности элементов полупроводниковых интегральных микросхем	188
3.4.4. Технология создания конфигурации элементов ИМС	192
3.4.5. Технология тонкопленочных гибридных интегральных микросхем и микросборок	195
3.4.6. Технология толстопленочных интегральных схем	197
3.4.7. Пластины полупроводниковых интегральных микросхем и методы создания электронно-дырочных структур	199
3.4.8. Методы электрической изоляции элементов полупроводниковых ИС	202
3.4.9. Сборочные процессы в технологии интегральных микросхем	204
3.4.10. Основные направления функциональной микроэлектроники	206
Вопросы для самопроверки по теме 3.4	209
Тема 3.5. Базовые технологические процессы изготовления интегральных микросхем	211
3.5.1. Понятие о технологическом процессе и его содержание	211
3.5.2. Понятие о типах производства	214
3.5.3. Технологическая подготовка производства	215
3.5.4. Технология изготовления конструктивных модулей на основе печатных плат	217
3.5.5. Особенности технологии поверхностного монтажа	221
3.5.6. Технология сборки блоков и внутриблочного монтажа	224
3.5.7. Технология общей сборки ЭВМ	225
Вопросы для самопроверки по теме 3.5	230
Заключение	231
Рейтинговый Контроль	232
Литература	234

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предметом изучения дисциплины «Конструирование и технология производства ЭВМ» являются:

– конструкции электронно-вычислительных машин различного назначения и конструктивно-технологического исполнения, разрабатываемые с применением систем автоматизированного проектирования и предназначенные для работы в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов;

– технология и этапы разработки конструкций электронно-вычислительных машин;

– средства автоматизированного проектирования при помощи различных инструментальных средств – пакетов прикладных программ.

Дисциплина «Конструирование и технология производства ЭВМ» *ориентирована* на то, чтобы в результате ее освоения:

– сформировать у студентов профессиональные навыки деятельности специалиста на основе фундаментальных знаний в области конструирования и технологии производства ЭВМ;

– обеспечить устойчивые навыки для профессиональной деятельности по направлению информационной и вычислительной техники;

– освоить современные пакеты прикладного программного обеспечения для конструкторско-технологического проектирования электронно-вычислительных машин.

Дисциплина предусматривает изучение конструкторского проектирования и технологии производства ЭВМ с применением средств автоматизированного проектирования.

Для изучения дисциплины «Конструирование и технология производства ЭВМ» предлагается модульная система. Весь материал разбит на три тематических блока, причем каждый блок в своем составе содержит определенное количество учебных тем и лабораторных занятий. Каждая тема рассчитана на определенное число учебных часов лекционных занятий.

В заключении каждой темы имеется набор вопросов, на которые необходимо ответить после изучения материала. Если студент уверен, что обладает достаточными знаниями, умениями и навыками, то необходимо пройти собеседование у преподавателя или выполнить выходной тест. При неудачном выполнении выходного теста студенту потребуется вновь изучить данный блок полностью.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Форма обучения	Дневное обучение	Заочное обучение
Курс	3	–
Семестр	5	–
Лекции, ч	36	8
Экзамен (семестр)	5	9
Лабораторные занятия, ч	18	8
Контрольные работы (семестр)	–	9

Цели дисциплины и пути их достижения

Цели преподавания дисциплины:

– изучение методологии и основных этапов разработки электронно-вычислительных машин с применением средств автоматизированного проектирования с учетом требований технического задания, совместимости с объектом установки, окружающей средой, а также ограничений, обусловленных системо-схемотехническими методами реализации, производства, экономической эффективности и другими показателями;

– изучение методов проектирования и управления оптимальными технологическими процессами с применением ЭВМ и микропроцессорных систем, обеспечивающих интенсификацию и эффективность производства, качество изготавливаемой продукции;

– изучение средств автоматизации, в том числе гибких производственных систем, подготовка студентов к использованию современных информационных технологий как инструмента для решения на высоком уровне инженерных задач;

– ознакомление студентов с перспективными направлениями, системами и пакетами прикладных программ, применяемыми в практике конструирования и технологии производства ЭВМ;

– изучение и получение навыков в работе с современными пакетами систем автоматизированного проектирования (САПР).

Поставленные цели достигаются путем изучения и усвоения:

– основных научно-технических проблем конструирования и технологии производства ЭВМ, этапов конструкторского проектирования и методов оптимизации конструкторско-технологических решений;

– основных физических процессов, определяющих функционирование ЭВМ (тепловых, механических, электромагнитных), а также основных принципов построения ЭВМ различных классов и конструктивных уровней;

- использования в процессе конструирования и технологии производства ЭВМ математических моделей и методов оптимизации;
- методологии и организации автоматизированного конструкторского проектирования при системном подходе к выполнению разработок, иерархическим принципам в конструировании и технологии, комплексной микроминиатюризации;
- правильного оформления конструкторской технологической документации в соответствии с ЕСКД и ЕСТД.

Требования к знаниям и умениям студентов

В результате освоения курса «Конструирование и технология производства ЭВМ» студент *должен знать*:

- место конструирования и технологии в общем процессе проектирования ЭВМ;
- основные задачи автоматизации конструкторского проектирования, методы и алгоритмы их решения;
- структуру и принципы построения систем автоматизированного проектирования (САПР) ЭВМ;
- виды и состав конструкторской и технологической документации;
- основы проектирования базовых несущих конструкций (БНК) ЭВМ, конструирования БИС и СБИС, базовых матричных кристаллов и ЭВМ различных классов на их основе;
- материалы, применяемые в производстве ЭВМ и методы их обработки.

Уметь характеризовать:

- цели и общие принципы конструирования и технологии изготовления ЭВМ;
- тенденции развития конструкций ЭВМ и проблемы, которые возникают перед разработчиками;
- методы компоновки, замещения и соединения электронных блоков ЭВМ;
- технические средства САПР;
- технологические процессы производства ЭВМ.

Уметь анализировать:

- цели и задачи, решаемые конструктором на различных этапах разработки и производства ЭВМ, современные методы их решения;
- принципы построения и возможности систем автоматизированного конструкторского проектирования;

- пути микроминиатюризации элементов ЭВМ;
- технологию интегральных микросхем, печатных плат, сборочных работ и испытаний ЭВМ.

Приобрести навыки:

- проектирования узлов и блоков ЭВМ с помощью САПР;
- моделирования изделий ЭВМ и процессов их создания;
- составления технологических процессов изготовления деталей, сборки и монтажа ЭВМ с помощью САПР.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Наименование тем лекционных занятий:

№ темы	Название темы	Количество часов	
		обучение	
		дневное	заочное
	ВВЕДЕНИЕ	1	
Блок 1. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭВМ			
1.1	Выбор стратегии и методов конструирования электронно-вычислительных машин	1	
1.2	Основы конструирования ЭВМ	2	
1.3	Методы и средства конструирования	4	
1.4	Конструирование ЭВМ с учетом внешних воздействий	4	2
Блок 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ			
2.1	Основы методологии автоматизированного проектирования	4	
2.2	Применение пакетов САПР при проектировании ЭВМ	4	2
Блок 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ			
3.1	Содержание и порядок технологического проектирования	1	
3.2	Материалы и методы формообразования деталей ЭВМ	3	2
3.3	Проектирование и технология печатного монтажа	4	
3.4	Базовые технологические процессы изготовления интегральных микросхем	4	2
3.5	Сборочные процессы в технологии ЭВМ	3	
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	1	

2. Лабораторные занятия, их содержание и объем в часах:

№ Л. р.	Наименование лабораторной работы	Объем в часах	
		Обучение	
		дневное	заочное
1	Изучение конструктивно-технологических особенностей жгутового монтажа	4	
2	Изучение технологии изготовления и электрических характеристик керамических термисторов	4	4
3	Исследование экранирующих свойств конструкционных материалов	4	
4	Разработка печатных плат в системе PCAD 2001	6	4

Учебная дисциплина «Конструирование и технология производства ЭВМ» занимает ведущее место среди других дисциплин в процессе подготовки инженеров-системотехников в области информационной и вычислительной техники. Она базируется на таких дисциплинах как: «Высшая математика», «Теория вероятности и математической статистики», «Начертательная геометрия и инженерная графика», «Системотехника», «Электротехника», «Электронные приборы», «Архитектура персональных ЭВМ», «Структурная и функциональная организация ЭВМ» и др.

ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Электронные вычислительные машины претерпели существенные изменения за прошедшие годы. Современные ЭВМ более надежны и устойчивы в эксплуатации; расширились области их применения. Вычислительные машины превратились в системы, обеспечивающие работу многих разнообразных пользователей. Все это достигнуто на основе глубоких изменений, происшедших в процессе проектирования самих ЭВМ. Разработчик современных машин кроме глубокого знания логики и электроники должен иметь хорошо развитое пространственное воображение, владеть методами математического анализа и синтеза сложных систем, которые подвергаются разнообразным внешним воздействиям. Технико-экономические, функциональные и другие возможности ЭВМ (систем) в значительной степени определяются конструкцией.

Конструкция ЭВМ (систем) – совокупность электрически и механически связанных элементов, в которой реализуется электрическая схема машины (системы). Исходные данные для конструктора – принципиальная электрическая схема ЭВМ и техническое задание на разработку конструкции. Конструктор должен определить форму, материалы, размеры конструктивных узлов, способы механического и электрического соединения, обеспечения помехоустойчивости, теплового режима, защиты от внешних воздействий. Большое число разнообразных требований, предъявляемых к конструкции ЭВМ, приводит к необходимости исследования нескольких вариантов конструкции (без ее изготовления), их сравнительной оценки и выбора наиболее рационального варианта. Конструкция ЭВМ состоит из типовых сборочных единиц разных уровней иерархии. Для повышения эффективности конструкторского проектирования используются методы формального описания рангового состава конструкции и типовых сборочных единиц, оценки соответствия типовых конструкций предъявляемым к ним требованиям. Несмотря на то, что конструктору в работе помогают системы автоматизированного проектирования, конструирование в известном смысле остается процессом проб и ошибок. Степень приближения конструкции к совершенному образцу определяется опытом и умением, широтой и глубиной научного и технического кругозора конструктора.

Конструкторское проектирование характеризуется значительной трудоемкостью. Вместе с тем трассировка, расчеты надежности, тепловых режимов и другие выполняются с применением ЭВМ. С применением

ЭВМ изготавливается и всевозможная конструкторская документация. Одновременно меняются функции конструктора-разработчика типовых конструкций. Он должен уметь выбирать готовые решения из множества возможных вариантов, которые представляются на экране дисплея. При этом разработчик руководствуется действующими стандартами, нормативами и руководящими материалами. Все эти данные закладываются в базы данных и базы знаний, которыми оперирует ЭВМ, используемая как в системах автоматизированного проектирования, так и в системах автоматизированного производства.

Технологичность конструкции в значительной степени определяется принятыми разработчиком решениями. Конструктор должен хорошо разбираться в вопросах производства ЭВМ и участвовать в разработке технологии изготовления всех устройств, составляющих машину. Конструкции ЭВМ разрабатывают с учетом требований схемотехники, технологии, монтажа и наладки. Это позволяет учитывать схемотехнические требования, получать конструкцию с высокими технологическими характеристиками и рациональным монтажом, обеспечить удобство наладки и эксплуатации.

БЛОК 1. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭВМ

Тема 1.1. Выбор стратегии и методов конструирования электронно-вычислительных машин

1.1.1. Виды работ при проектировании ЭВМ

Высокая сложность конструкций ЭВМ приводит к тому, что создание новой ЭВМ обусловлено сильно взаимосвязанными и многофакторными длительными процессами. При проектировании и производстве изделий ЭВМ необходимо учитывать различные особенности конструкций и выполнять работы различного вида. Поэтому процесс создания новых ЭВМ идет в несколько стадий.

Обычно различают следующие виды проектирования ЭВМ, определяемые составом выполняемых работ:

- структурное,
- функциональное,
- схемотехническое,
- конструкторское.

Данные виды проектирования обычно и выполняются в указанной последовательности.

При *структурном* проектировании на основании технического задания разрабатывается структурная схема, определяющая основные структурные части ЭВМ (устройства, блоки и т. п.), их назначение и взаимосвязи. Выбираются системы команд, диагностики и контроля, решаются вопросы обмена информацией между ЭВМ и внешними устройствами и абонентами.

При *функциональном* проектировании разрабатываются подробные функциональные схемы устройств проектируемой ЭВМ, которые разъясняют определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях или устройствах в целом и детализируют обмен информацией между ними.

В структурном и функциональном проектировании принимает участие сравнительно немного специалистов, но высшей квалификации. Большая часть решаемых ими задач оказывает огромное влияние на разработку и главные показатели будущей ЭВМ.

При *схемотехническом* (логическом) проектировании разрабатываются подробные принципиальные схемы устройств, ориентированные на определенные системы элементов. Схемотехническое проектирование

ЭВМ характеризуется большой трудоемкостью и, следовательно, требует большого количества разработчиков. Основные задачи схемотехнического проектирования хорошо формализуются и позволяют использовать машинные методы решения (автоматизация проектирования).

При *конструкторском* проектировании (конструировании) выбирается структура пространственных, энергетических и временных взаимосвязей частей конструкции, связей с окружающей средой и объектами, определяются материалы и виды обработки; устанавливаются количественные нормы (для связей, материалов и обработок), по которым можно изготовить изделие, соответствующее заданным требованиям.

Возможности формального математического описания некоторых конструкторских задач и унификация их постановки позволяют избавить разработчиков от значительного объема «нетворческой» работы при проектировании ЭВМ с помощью самих же ЭВМ. Благодаря широкому использованию ЭВМ при конструировании можно говорить об автоматизации конструкторского проектирования или конструирования, т. е. об автоматизированном конструкторском синтезе устройств ЭВМ с выпуском необходимой конструкторской документации. Для получения эффективных результатов функции конструкторов и ЭВМ необходимо рационально разграничить, что во многом достигается использованием диалогового режима работы. Инженеру-конструктору-технологу, как правило, остаются такие виды деятельности: принятие решений и инженерное творчество; осмысление целей, проблем и содержание проекта; постановка задач проектирования; выбор критериев оценок при решении задач; выбор наилучшего решения и т. п.

Основными задачами конструирования изделий ЭВМ, легко решаемыми автоматизированным способом, являются: оптимальное проектирование топологии и фотошаблонов ИМС, микросборок и печатных плат; проектирование проводного монтажа; компоновка (размещение) различных модулей низшего иерархического уровня в модули высшего иерархического уровня (например, ИМС на печатные узлы, ячейки в панели и т. д.); выпуск графической и текстовой конструкторской документации.

Автоматизация процесса конструирования ЭВМ даёт возможность не только сокращать трудоёмкость и сроки разработки конструкций ЭВМ, повышать производительность труда инженеров в проектных организациях, но и улучшать качество и технологический уровень изделий ЭВМ, снижать стоимость разработки.

1.1.2. Этапы проектирования ЭВМ

Конструирование – это один из основных видов процесса проектирования ЭВМ, заключающийся в физическом воплощении принятых схемотехнических решений. От успешного решения задач конструирования зависят такие характеристики ЭВМ, как быстродействие, надежность, объем, масса, технологичность, удобство эксплуатации. Качество разработанной конструкции определяется степенью соответствия ее техническим требованиям. Неудачные конструкторские решения могут привести, например, к невозможности обеспечения работоспособности ЭВМ из-за несоблюдения теплового режима или к значительному снижению быстродействия.

Конструктор принимает участие в выполнении всех этапов процесса проектирования ЭВМ. Стадии разработки конструкторской документации на изделия всех отраслей промышленности и этапы выполнения работ регламентирует ГОСТ 2.103-68. Работы, выполняемые на этих этапах, подразделяются на научно-исследовательскую (НИР) и опытно-конструкторскую (ОКР).

При проведении НИР выявляется принципиальная возможность создания ЭВМ, прорабатываются теоретические и экспериментальные части разработки. В частности, осуществляется выбор и формулировка целей проектирования, обосновываются исходные данные, определяются принципы построения ЭВМ. Основной целью НИР является выяснение принципиальной возможности реализации выбранных принципов и решений. Объем конструкторской работы при выполнении НИР, как правило, не слишком велик, так как в этот период ведется исследование и разработка лишь принципиально новых конструкций отдельных составных частей изделия.

Этапы проведения НИР:

- предплановый патентный поиск;
- разработка и согласование с заказчиком технического задания, государственная регистрация НИР;
- подготовительный этап – выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных технических решений на основные части НИР;
- основной этап – теоретические и экспериментальные исследования, обработка результатов, составление и оформление документов;
- заключительный этап – обобщение результатов и оценка выполненной НИР;
- приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

Если НИР завершается отрицательным результатом, то это свидетельствует либо о неперспективности данной разработки, либо о том, что постановка ее на современном уровне развития науки и техники преждевременна.

Примечание. Если разработка новой ЭВМ не связана с принципиально новыми техническими решениями, а базируется на достигнутых ранее итогах, то НИР вообще может не проводиться.

По завершении НИР составляется отчет, содержащий рекомендации (или не рекомендации) на проведение ОКР и составляется техническое задание.

Этапы проведения ОКР:

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

Техническое задание. Требования к техническому заданию (ТЗ) устанавливает ГОСТ 15.001-73. Техническое задание – это документ, в котором указывается: основное назначение, технические и тактико-технические характеристики, показатели качества, в том числе надежности, технико-экономические требования, необходимые стадии разработки конструкторской документации и ее состав, состав ЭВМ или системы.

В общих технических требованиях задаются условия эксплуатации, хранения и транспортировки, в частных – основные структурные, программные и другие технические характеристики (форма и точность представления информации, скорость ее преобразования, объем и быстродействие запоминающих устройств, максимальная потребляемая мощность и т. п.). В конструктивных требованиях указываются масса, габариты, требования к элементной базе, модульности и технологичности конструкций, к типоразмерам, уровню унификации, эргономике и технической эстетике, технике безопасности и т. д.

На основе общего технического задания могут составляться ТЗ на отдельные устройства, в которых уточняются соответствующие характеристики.

Техническое предложение. Совокупность конструкторских документов, содержащих технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия, является техническим предложением. Обоснование делается по результатам анализа ТЗ и вариантов

возможных решений, сравнительной оценки этих решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов. Техническое предложение разрабатывается по ГОСТ 2.118-73, если это предусмотрено ТЗ, при этом могут определяться дополнительные или уточненные требования к изделию на основе необходимой конструкторской проработки вариантов изделия.

Эскизный проект. Комплект конструкторских документов, содержащий принципиальные конструктивные решения и дающий общие представления об устройстве и принципе работы изделия, составляет эскизный проект. Основание для разработки эскизного проекта – ТЗ или протокол рассмотрения технического предложения. Требования к эскизному проекту устанавливает ГОСТ 2.119-73.

Технический проект. Совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, представляет собой технический проект. Объем работ на стадии технического проектирования определяет ГОСТ 2.120-73. Технический проект разрабатывают, если это предусмотрено предшествующими стадиями. После завершения каждой стадии разработки составляется перечень работ, которые необходимо выполнить на следующем этапе.

При разработке технического предложения и эскизного проекта подготавливают варианты изделия, которые сравнивают по показателям качества, и выбирают оптимальный. На стадии эскизного проектирования принимают принципиальные конструктивные и схемные решения изделия, определяют не установленные ранее технико-экономические показатели, выявляют новые изделия и материалы, которые должны быть разработаны другими предприятиями, прорабатывают вопросы технологии изготовления. На этапе технического проектирования проводится детальная проработка схемных и конструкторских решений (на уровне чертежей на все важные узлы, блоки, устройства), отрабатывается система математического обеспечения; разрабатывается технология изготовления составных частей ЭВМ и средства автоматизации ее проектирования и изготовления; выполняются пространственные компоновочные эскизы и макеты, позволяющие оценить паразитные связи, тепловые режимы, удобство монтажа, ремонта, эксплуатации и защиту от внешних воздействий; изготавливаются узлы и блоки, которые проходят необходимые контрольные испытания, проверяются: технологичность, уровень унификации и стандартизации, комплексной миниатюризации.

На всех стадиях разработки изделие проверяют на патентную чистоту и конкурентоспособность, оценивают его соответствие требованиям эргономики, технической эстетики, техники безопасности и производственной санитарии, оформляются заявки на изобретения. На каждой из стадий возможно изготовление макетов, если это необходимо для сравнительной оценки, проверки принципов работы изделий, а также принятых конструктивных и схемных решений.

После выполнения каждого из рассмотренных этапов копии документов комплектуют по ГОСТ 2.106-68 в техническое предложение, эскизный или технический проект и представляют заказчику на рассмотрение, согласование и утверждение (документам присваивают соответственно литеры «П», «Э» и «Т»). В комплект включают документы в соответствии с ГОСТ 2.102-68, предусмотренные предшествующими стадиями разработки.

Разработка рабочей документации. Рабочую документацию разрабатывают по ГОСТ 2.103-68 для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии), установочных серий и установившегося серийного или массового производства. По результатам изготовления и заводских испытаний опытного образца корректируют конструкторские документы, им присваивают литеру «О». После проведения государственных, межведомственных, приемочных и других испытаний конструкторские документы можно вновь корректировать с присвоением им литеры «О», при последующих изготовлениях и испытаниях – соответственно литер «О₂», «О₃» и т. д.

По рабочей документации установочных серий изготавливают и испытывают *установочную серию*. Конструкторские документы корректируют по результатам изготовления, испытания и оснащения технологического процесса ведущих составных частей изделия, им присваивают литеру «А».

По рабочей документации установившегося серийного или массового производства изготавливают и испытывают *головную* (контрольную) серию, после чего можно корректировать конструкторские документы. После окончательной отработки и проверки в производстве изделий по зафиксированному и полностью оснащеному технологическому процессу конструкторским документам присваивают литеру «Б».

При разработке конструкции элементов, узлов и устройств можно выделить две основные самостоятельные задачи: *проектирование сборочных единиц* как средств механического и электрического объединения входящих в них деталей и *схемно-топологическое конструирование*. Задачи схемно-топологического конструирования – определение схемного содержания конструктивных узлов, размещение их в монтажном пространстве, разработка связей между ними – решаются после разработки функциональных

схем. Однако использование в современных ЭВМ однотипных и унифицированных элементов (типовых конструкций) позволяет совмещать проектирование функциональных и принципиальных схем с разработкой конструкции. Например, разработку конструкции блока или рамы можно выполнять одновременно с разработкой электрических функциональных и принципиальных схем. Решения задач схемно-топологического конструирования могут вносить коррективы в функциональные и принципиальные схемы.

1.1.3. Методы конструирования

Исходными данными для конструирования являются техническое задание (ТЗ) и схема электрическая принципиальная. Конструирование может быть реализовано различными методами.

Существующие методы конструирования подразделяются на три группы (рис. 1.1):

- по видам связей между элементами;
- по способу выявления и организации структуры связей между элементами;
- по степени автоматизации выявления структуры связей между элементами.

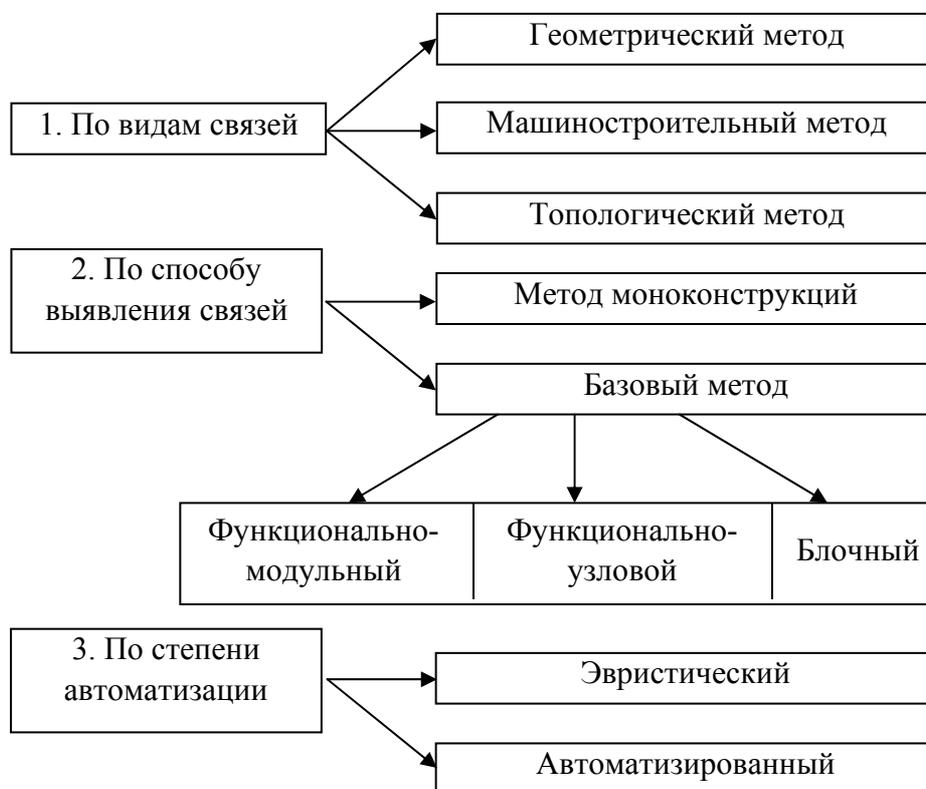


Рис. 1.1. Методы конструирования

Выбор методов зависит от назначения ЭВМ, ее функций, преобладающего вида связей, уровня унификации, автоматизации.

Геометрический метод. В основу метода положена структура геометрических и кинематических связей между деталями, представляющих собой систему опорных точек, число и размещение которых зависит от заданных степеней свободы и геометрических свойств твердого тела. Метод применим при проектировании неподвижного соединения деталей для исключения внутреннего напряжения.

Метод является основным, когда от конструктора нужна высокая точность взаимного перемещения деталей или длительное и точное сохранение определенных параметров, зависящих от расположения деталей. Отличительная черта метода: характер взаимосвязи двух деталей не зависит от погрешностей их изготовления. Данный метод позволяет обеспечить взаимозаменяемость деталей в массовом производстве.

Машиностроительный метод. В основу метода заложена структура геометрических и кинематических связей между деталями, представляющими собой систему опорных поверхностей, число и размещение которых выбирается исходя из минимизации массы и допустимой прочности конструкции. Метод применим для конструкции с большими величинами деформации. Для уменьшения этих деформаций и снижения массы вводят дополнительные опорные точки и поверхности. Точность взаимного расположения при изменении элементов конструкции обеспечивается высокой точностью изготовления.

Метод нашел применение при конструировании несущих конструкций, кинематических звеньев функциональных устройств, неподвижных соединений (болты, винты, скобы и пр.).

Топологический метод. Применяется когда связность элементов может быть сопоставлена с графом (граф – графическое выражение структуры связи между элементами электрической схемы и элементами конструкции). В основу его положена структура физических связей между ЭРЭ, т. е. представление конструктивного вида электрической схемы и ее геометрической топологической связности, независимо от ее функционального содержания. Отличительными чертами метода являются:

- сопоставление связности элементов электрической схемы и деталей конструкции на основе теории графов;
- изоморфизм графов – возможность получить множество преобразований графов, среди которых можно найти решение, непохожее на прототип;

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

Метод моноконструкций. Основан на минимизации числа связей в конструкции, применяется для создания ЭВМ на основе оригинальной несущей конструкции (каркаса, шасси) в виде моноузла (моноблока с оригинальными элементами).

Методу присущи следующие недостатки:

- длительность процесса конструирования и внедрения;
- низкая надежность и ремонтпригодность;
- сложность внесения изменений;
- значительная стоимость разработки.

Базовый метод конструирования. В основу метода положено деление ЭВМ на конструктивно и схемозаконченные части. Разновидности метода (функционально-узловой, функционально-модульный, функционально-блочный) основываются на принципах агрегатирования, функциональной и размерной взаимозаменяемости, схемной и конструкторской унификации.

Базовый метод сейчас является основным. На этапе разработки он позволяет вести работу над многими узлами и блоками одновременно. На этапе производства сокращает сроки освоения серийного производства изделий. При эксплуатации повышает эксплуатационную надежность ЭВМ, облегчает обслуживание, улучшает ремонтпригодность.

Метод автоматизированного конструирования. Основан на использовании ЭВМ для решения задач компоновки, трассировки, вычерчивания чертежей и выпуска конструкторской документации.

Для решения однотипных задач есть алгоритмы, которые отличает точность, малое время выполнения, достаточный объем машинной памяти.

Для автоматизированного метода конструирования необходим высокий уровень схемной и конструкторской унификации, так как повторяющиеся элементы схемы и детали упрощают разработку программ для ЭВМ.

Эвристический метод (или метод мозговой атаки) основан на возможности получения новых идей в результате творческого сотрудничества отдельных членов организованной группы. Реализация метода осуществляется в виде беседы, когда каждый участник свободно выдвигает предложения, а критика запрещена. Этот метод наиболее эффективен на начальных этапах конструирования, когда структура задачи еще не определилась.

1.1.4. Общие принципы и основные задачи конструкторского проектирования ЭВМ и систем

В процессе развития электронной вычислительной техники сформировались два основных принципа конструирования:

- одноуровневый,
- многоуровневый.

Выбор принципа конструирования определяется возможностями технологии обеспечить необходимый уровень интеграции аппаратуры и экономическими факторами (стоимостью проектирования, изготовления и эксплуатации).

Одноуровневый принцип конструирования. Он заключается в том, что вся принципиальная электрическая схема ЭВМ реализуется на одной плате, в идеале на одной подложке (машина – плата). Выход из строя одного элемента приводит к отказу всей машины. Работоспособность ЭВМ можно обеспечить введением аппаратурной и информационной избыточности. В настоящее время этот принцип применим для конструирования ЭВМ невысокой сложности при их крупносерийном или массовом производстве. Основные достоинства этого принципа: обеспечение максимальной надежности (отсутствие или минимальное количество внешних соединений) и минимальная потеря быстродействия из-за задержек сигналов в линиях связи. С развитием технологии, усовершенствованием методов проектирования и увеличением потребности народного хозяйства в средствах вычислительной техники этот принцип будет находить более широкое применение.

Многоуровневый принцип конструирования. Конструкция ЭВМ состоит из типовых сборочных единиц, разбитых на несколько уровней. Под типовой сборочной единицей или типовой конструкцией понимается любой узел ЭВМ, который по конструктивному оформлению и технологии производства является самостоятельным и имеет стандартные средства электрического и механического сопряжения.

Уменьшать стоимость и увеличить надежность любых изделий можно лишь при их массовом или крупносерийном производстве. Крупносерийное производство создает условия для использования прецизионного автоматизированного оборудования высокой производительности; прогрессивных технологических процессов обработки деталей, сборки и электрического монтажа; эффективных методов входного контроля изделий, поступающих со стороны, контроля и испытаний изделий на завершающей стадии производства.

Производство ЭВМ высшего и среднего классов – мелкосерийно. Однако это не характеризует производство узлов и деталей, входящих в состав этих машин, как мелкосерийное. Определяющие факторы в оценке серийности производства узлов и деталей конструкции ЭВМ – это конструктивно-технологические особенности ЭВМ, достигнутый уровень унификации узлов и деталей и специализации их производства. Многоуровневый принцип конструирования ЭВМ позволяет организовать производство типовых конструкций по независимым циклам, т. е. обеспечивает специализацию их производства.

Унификация конструктивных модулей идет по двум направлениям: конструктивно-технологическому и схемному. Построение конструкции ЭВМ из типовых сборочных единиц обеспечивает высокую конструктивно-технологическую унификацию и стандартизацию узлов и деталей проектируемой ЭВМ (размеры, методы обеспечения теплового режима и защиты от внешних воздействий, способы выполнения электрических и механических соединений, технология изготовления и технологическое оборудование, стендовая контрольно-испытательная аппаратура). Параметры восстановления работоспособности ЭВМ в значительной степени зависят от ремонтпригодности конструкций.

Высокая ремонтпригодность конструкции при многоуровневом принципе обеспечивается наличием в ее составе сменной единицы – типового элемента замены (ТЭЗ).

Объективная тенденция развития элементной базы – это повышение уровня интеграции, что приводит к снижению уровня схемной, т. е. функционально-логической унификации. Снижение уровня схемной унификации ведет к увеличению стоимости и сроков проектирования и изготовления аппаратуры, расширяет номенклатуру ТЭЗ, что повышает стоимость эксплуатации, снижает ремонтпригодность аппаратуры. Поэтому используют функционально-узловой метод конструирования ЭВМ, который заключается в разбиении общей электрической схемы машины на функционально-законченные части разной степени сложности с учетом требований по обеспечению высокого уровня схемной унификации и оформлению их в виде типовых сборочных единиц. Разбиение схемы ЭВМ на функционально-законченные части обеспечивает независимость электрической проверки схем типовых конструкций, создает предпосылки для построения достаточно простой системы контроля работы машины и локализации отказов, упрощает стендовую контрольно-испытательную аппаратуру.

Таким образом, многоуровневый принцип в сочетании с функционально-узловым методом конструирования позволяет:

- сократить сроки и снизить стоимость проектирования, производства и эксплуатации, изготавливать типовые конструкции по независимым циклам;
- достичь высокой степени унификации и стандартизации узлов и деталей проектируемой ЭВМ;
- автоматизировать и механизировать процессы изготовления и сборки деталей, контроля и ремонта типовых элементов замены.

При разработке проекта новой машины главная задача состоит в создании конструкции, обеспечивающей параметры ЭВМ, записанные в ТЗ, с учетом возможности изготовления этой конструкции в определенных производственных условиях, в возможно короткие сроки и при минимальных затратах.

Наиболее существенными, с точки зрения конструктора, тенденциями в развитии ЭВМ являются:

- рост сложности аппаратуры и плотности ее компоновки;
- повышение быстродействия элементной базы и уровня ее интеграции;
- снижение относительных габаритов активных элементов и энергетического уровня информационных сигналов;
- увеличение выделяемой удельной мощности активных элементов и потерь быстродействия из-за задержек сигналов в линиях межэлементных связей.

Поэтому конструирование должно обеспечивать: заданное быстродействие (габариты ЭВМ влияют на скорость ее работы); уровни помех меньше допустимых; требуемую или максимальную надежность при минимальной или заданной стоимости; тепловые режимы конструкции; способность конструкции противостоять внешним воздействиям.

Исходными данными для конструктора служат электрические схемы ЭВМ (функциональные или принципиальные) и техническое задание. Этап конструирования заключается в разбиении схемы ЭВМ на узлы разных уровней сложности и оформлении их в виде сборочных единиц. При проектировании конструктивных узлов как средств механического и электрического объединения входящих элементов можно выделить следующие задачи: выбор пространственной геометрии и компоновочной схемы; определение геометрических размеров типовых сборочных единиц; разработка деталей и сборочных единиц в целом.

При решении этих задач прорабатываются вопросы минимизации потерь, быстродействия из-за конечной скорости распространения сигналов, обеспечения помехоустойчивости, надежности и механической прочности; определяются способы отвода тепловой энергии, метода защиты от внешних воздействий (механических, климатических, различного рода излучений), монтажная область конструктивного узла. Под монтажной областью понимается метрическое пространство, в котором размещаются конструктивные элементы, входящие в данный узел, и осуществляется их межконтактное соединение. Для монтажной области рассчитываются ее геометрические размеры, координаты мест расположения конструктивных модулей и полей их контактов. Задача определения содержания конструктивных узлов называется схемной компоновкой. Она заключается в определении оптимального количественного состава конструктивных модулей и распределении схемы по ним.

Цель задачи схемной компоновки – обеспечить высокую ремонтпригодность машины, унифицировать функциональные узлы в пределах одной или нескольких моделей ЭВМ, определить наименьшую сменную единицу – ТЭЗ. От повторяемости ТЭЗ зависит уровень схемной унификации, ремонтпригодность машины, стоимость разработки, производства и эксплуатации. Типовой элемент замены оформляется в виде легкоъемной сборочной единицы, его схемное содержание должно быть по возможности логически законченным и обеспечивать независимость электрической проверки. При формировании системы ТЭЗ должны учитываться следующие требования: высокий коэффициент повторяемости ТЭЗ или минимальное количество их типов; минимальное число внешних выводов ТЭЗ (причем, эти требования противоречивы).

Конструирование узла завершается разработкой его топологии: в монтажной области конструктивного узла размещаются элементы и связи между ними. При этом должны быть учтены вопросы быстродействия, помехоустойчивости, теплового режима, надежности и особенности конкретной технологии производства конструктивных модулей.

1.1.5. Конструкция ЭВМ как иерархичная структура

Конструктивное деление ЭВМ обладает иерархией, подобной иерархии функционального деления. Однако конструктивная иерархия определяется по принципу конструктивной законченности и в общем случае может не совпадать с функциональной. Конструктивная иерархия современных ЭВМ может быть представлена в виде пяти уровней. Модуль опреде-

ленного уровня состоит из целого числа типовых конструкций предыдущего уровня и является конструктивно законченным. Геометрические размеры типовых конструкций должны обеспечивать принцип входимости модуля низшего уровня в модуль следующего ранга.

Нулевой уровень иерархии составляют исходные схмотехнические компоненты (микросхемы различной степени интеграции и электрорадиоэлементы), для которых характерна конструктивная и техническая неделимость. Современные схмотехнические компоненты разрабатываются в виде элементов единых размерно-параметрических рядов в отношении номиналов, допусков, мощностей рассеивания и геометрических размеров корпусов радиоэлементов и микросхем, что обеспечивает высокий уровень их унификации и стандартизации.

Первый уровень иерархии. Типовые конструкции этого уровня иерархии – ячейки, которые конструктивно объединяют на одной или нескольких печатных платах исходные схмотехнические компоненты и содержат от десятков до сотен микросхем.

Второй уровень иерархии. Ко второму уровню относится кассета, в которой на рамочной несущей конструкции объединяются две (или более) ячейки – субблоки. Кассету, как правило, используют для обеспечения функциональной законченности реализованной в ней схемы.

Третий уровень иерархии. Типовую конструкцию этого уровня (блок, панель, шасси) выполняют в виде сварного или сборного каркаса, в котором осуществляется механическое крепление и электрическое соединение ячеек или кассет.

Четвертый и пятый уровни иерархии. Модули этих уровней иерархии – рама и стойка – представляют собой сварной или сборный каркас для конструктивного объединения панелей, блоков или непосредственно типовых конструкций первого уровня (субблоков, ячеек) в зависимости от варианта конструктивной иерархии, выбранного для данной ЭВМ.

В универсальных ЭВМ в качестве ТЭЗ используется типовая конструкция первого уровня. В специализированных ЭВМ, в связи со специфическими требованиями к надежности, ТЭЗ является типовая конструкция более высокого уровня (кассета или блок).

Большое количество разнообразных требований, предъявляемых к конструкции, приводит к необходимости исследования нескольких вариантов ее исполнения. Иерархический принцип построения конструкции позволяет вести проектирование типовых конструкций по каждому уровню иерархии независимо, оптимизируя типовые конструкции текущего ранга по своим частным критериям качества на том основании, что при переходе к более высокому рангу влияние отклонений, допущенных на предыду-

щих, от оптимального решения резко снижается. Но так как параметры типовых конструкций текущего уровня зависят от результатов, полученных на предыдущих, задачу конструирования ЭВМ в целом необходимо решать с учетом взаимных связей всех типовых конструкций различных уровней.

Задачи определения схемного содержания типовой конструкции и оформления ее в виде сборочной единицы в значительной степени самостоятельны, но между ними существует определенная связь. Например, полученный при схемной компоновке оптимальный состав модуля может оказаться технически нереализуемым из-за невозможности выполнения трассировки на заданном геометрическом поле, по которому определялись характеристики варианта при компоновке. Изменение геометрического поля потребует возврата к задаче компоновки для оценки оптимальности варианта. Следовательно, поиск оптимального варианта типовой конструкции текущего ранга – это итерационный процесс.

Конструкция ЭВМ должна удовлетворять требованиям ТЗ и определенным технико-экономическим параметрам. В связи с этим эффективность конструкции ЭВМ является многомерным вектором в пространстве обобщенных показателей качества. Иерархический принцип построения конструкции ЭВМ приводит к тому, что выбор оптимального модуля данного уровня подчинен конструкциям следующего, более высокого уровня. Поэтому возникает задача распределения количественных значений показателей качества на типовые конструкции всех уровней иерархии, исходя из заданных значений этих показателей на ЭВМ в целом. Задача нормировки показателей обычно решается с помощью аппарата теории исследования операций. Определение оптимальных значений показателей качества типовых конструкций происходит сверху вниз по иерархической лестнице, а оптимальных параметров типовых конструкций – снизу вверх методом последовательного приближения.

Таким образом, основные свойства конструкции ЭВМ как n -уровневой иерархической системы следующие:

- возможность поиска в каждом уровне иерархии оптимального варианта типовой конструкции по своим локальным критериям качества;
- существование глобального критерия для всей системы в целом, который должен учитывать основные показатели ЭВМ, зависящие от конструкции;
- возможность итерационного поиска оптимального варианта типовых конструкций внутри рангов и между ними;

- осуществление связи между уровнями иерархии путем передачи обобщенной информации (функционалов, обобщенных показателей), а между подсистемами одного уровня – через информационные потоки о параметрах типовых конструкций.

1.1.6. Конструктивно-технологические и эксплуатационные требования к конструкции современных ЭВМ

Для обеспечения требуемых технических характеристик ЭВМ необходимо выполнять ряд требований.

К конструктивно-технологическим требованиям относятся:

- обеспечение возможности отдельного производства и контроля типовых конструкций;
- стремление к минимальной номенклатуре принятых изделий, крепежных деталей и материалов, которые должны быть, как правило, отечественного производства и соответствовать требованиям ГОСТа и нормалей;
- обеспечение серийного производства элементов типовых конструкций;
- использование прогрессивных методов изготовления типовых конструкций и высокая степень готовности их к внедрению в серийное производство;
- оформление одной из типовых конструкций (субблока, кассеты или блока) в виде легкоъемной сборочной единицы;
- обеспечение быстрой замены неисправных узлов и деталей;
- предусмотрение мер защиты от разрушающего воздействия внешней среды (покрытие, пропитка, герметизация и т. п.);
- предотвращение неправильной установки и включения типовых конструкций;
- обеспечение минимальных габаритов и массы;
- соответствие состава комплекта конструкторской документации условиям приема и сдачи заказчику.

К эксплуатационным требованиям относятся:

- возможность обслуживания всех устройств машины персоналом соответствующей квалификации;
- удобный доступ ко всем частям машины, требующим регулировки или замены в процессе эксплуатации;

- предусмотрение различных мер обнаружения и сигнализации аварийных режимов работы;
- наличие специальных элементов для фиксации типовых конструкций в положении, удобном для осмотра и проверки, контрольных точек для подсоединения измерительной аппаратуры при настройке и контроле работы машины, аппаратуры, обеспечивающей профилактический контроль и наладку типовых конструкций;
- возможность установки типовых конструкций для контроля и ремонта на рабочем столе без повреждения схмотехнических компонентов и монтажа последних с применением при необходимости вспомогательной технологической оснастки.

Вопросы для самопроверки по теме 1.1

1. Перечислите виды работ при проектировании ЭВМ.
2. Перечислите работы, выполняемые при структурном проектировании.
3. Перечислите работы, выполняемые при функциональном проектировании.
4. Перечислите работы, выполняемые при схмотехническом проектировании.
5. Перечислите работы, выполняемые при конструкторском проектировании.
6. Перечислите задачи конструирования изделий ЭВМ, решаемые автоматизированным способом.
7. Дайте определение процесса конструирования ЭВМ.
8. Перечислите основные этапы выполнения НИР.
9. Какие результаты выполнения НИР могут быть и о чем они свидетельствуют?
10. Перечислите основные этапы выполнения ОКР.
11. Раскройте содержание отдельных этапов ОКР (техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочее проектирование).
12. Чем определяется выбор метода конструирования?
13. Дайте классификацию методов конструирования.

14. Перечислите отличительные особенности и применение основных методов конструирования.

15. Чем определяется выбор принципа конструирования (одноуровневый, многоуровневый)?

16. Перечислите особенности и достоинства одноуровневого принципа конструирования.

17. Перечислите возможности, которые обеспечивает многоуровневый принцип конструирования.

18. Назовите основные тенденции в развитии ЭВМ.

19. Перечислите основные задачи, решаемые при конструировании ЭВМ.

20. Перечислите уровни конструктивной иерархии ЭВМ.

21. Перечислите основные свойства конструкции ЭВМ как n-уровневой иерархической системы.

22. Перечислите конструктивно-технологические требования к конструкции ЭВМ.

23. Перечислите эксплуатационные требования к конструкции ЭВМ.

Тема 1.2. Основы конструирования ЭВМ

1.2.1. Влияние внешних факторов на работоспособность ЭВМ

Условия эксплуатации ЭВМ имеют различную физико-химическую природу и изменяются в весьма широких пределах. Факторы, воздействующие на работоспособность ЭВМ, разделяют на:

- климатические,
- механические,
- радиационные.

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 окружающей атмосфере; наличие солнечного облучения, грибковых образований (плесени), микроорганизмов, насекомых и грызунов; наличие 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.

Нормальными климатическими условиями эксплуатации технических средств ЭВМ считается: температура окружающего воздуха (293 ± 5) К, относительная влажность (60 ± 15) %, атмосферное давление от 84 до 107 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.). Допустимый перегрев воздуха внутри изделий не должен превышать более чем на 20 К верхнее значение температуры воздуха, поступающего для охлаждения.

Рассмотрим, какое влияние оказывают внешние факторы на работоспособность ЭВМ. *Изменение температуры* влияет на параметры ИМС и ЭРЭ: при определенных граничных значениях температуры (плюсовом и минусовом) работоспособность ЭВМ может быть нарушена. Кроме того, повышение рабочей температуры снижает их надежность. Колебания температуры могут привести в механических узлах конструкций к изменению типа посадок, вызвать ослабление крепления, температурные напряжения. Воздействие низких температур ухудшает прочностные характеристики материалов, эластичность упругих элементов.

Понижение атмосферного давления отрицательно влияет на условия теплоотвода в конструкциях ЭВМ, что связано со многими нарушениями нормального функционирования ЭВМ, к которым приводит рост температуры. *Повышенная влажность* может вызвать коррозию деталей и несущих конструкций, которой особенно способствуют наличие активных веществ в атмосфере, солнечная радиация, пыль и песок. Снижается сопротивление изоляции между гальванически не связанными цепями, вследствие чего также нарушается работоспособность ЭВМ.

Воздействие большинства механических и некоторых климатических факторов (тепловые удары, пыль, песок, насекомые и др.) может привести к механическим нарушениям отдельных ЭРЭ и деталей, резьбовых соединений, т. е., к нарушению работоспособности аппаратуры.

Обычно по устойчивости к внешним воздействующим факторам технические средства ЭВМ делятся на группы или категории. По устойчивости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации технические средства стационарных ЭВМ общего назначения (например, изделия Единой системы ЭВМ) подразделяют на группы в соответствии с данными, указанными в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметры воздействующих климатических факторов
для групп стационарных ЭВМ общего назначения

Воздействующий климатический фактор	Группа эксплуатации ЭВМ	
	1	2
Температура окружающего воздуха, К	283...308	278...313
Относительная влажность окружающего воздуха при 303 К, %	40...80	40...95
Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.)	84...107 (630...800)	84...107 (630...800)

Технические средства вычислительной техники, предназначенные для создания систем автоматизированного управления, а также встраиваемые в машины, оборудование и приборы (например, изделия вычислительной техники Системы малых ЭВМ), обычно должны работать в более жестких условиях эксплуатации, чем стационарные конструкции. В связи с этим для них устанавливается большее число групп (категорий) по устойчивости к воздействию климатических факторов (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Параметры воздействующих климатических факторов для групп средств вычислительной техники, применяемых в автоматизированных системах управления, а также встраиваемых в машины, приборы и оборудование

Воздействующий климатический фактор		Группа эксплуатации ЭВМ				
		1	2	3	4	5
Температура окружающего воздуха, К:	рабочая	283...308	278...313	278...313	263...323	223...323
	предельная	—	—	—	—	213...333
Относительная влажность воздуха, %		40...80 при 298 К	40...80 при 298 К	40...95 при 303 К	до 95 при 308 К	до 95 при 308 К

Примечание. Для всех групп эксплуатации атмосферное давление в пределах 84...107 кПа (630...800 мм рт. ст.).

1.2.2. Климатическое исполнение изделий ЭВМ

Изделия вычислительной техники предназначены для эксплуатации на различных объектах, используемых в одном или нескольких макроклиматических районах. Воздействия в таких районах различны, поэтому климатическое исполнение изделий осуществляют в соответствии с ГОСТ 15150-69.

Различают десять основных климатических исполнений изделий:

- 1) У – для умеренного климата со среднегодовым максимумом и минимумом рабочих температур 313 и 228 К;
- 2) УХЛ – для умеренного и холодного климата, когда абсолютные минимумы температуры воздуха ниже 228 К;
- 3) ТВ – для влажного тропического климата, где сочетание температуры (равной или выше 293 К) и относительной влажности (равной или выше 80 %) наблюдается примерно 12 ч или более в сутки за непрерывный период (от 2 до 12 месяцев в году);
- 4) ТС – для районов сухого тропического климата, в которых средняя ежегодная абсолютная максимальная температура воздуха выше 313 К и которые не отнесены к макроклиматическому району с влажным тропическим климатом;
- 5) Т – как для сухого, так и для влажного тропического климата;
- 6) О – для любого климата (общеклиматическое);
- 7) М – для умеренно холодного климата (в районах морей, океанов или непосредственно на морском берегу, если эти районы расположены севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты);
- 8) ТМ – для тропического морского климата при нахождении изделия в морях и океанах между 30° северной широты и 30° южной широты;
- 9) ОМ – общеклиматическое морское исполнение для кораблей с неограниченным районом плавания;
- 10) В – всеклиматическое исполнение для суши и моря (кроме Антарктиды).

Применение климатического исполнения для технических средств ЭВМ дает возможность количественно оценить весь комплекс требований к конструкциям ЭВМ по устойчивости к внешним климатическим воздействиям. Изделия вычислительной техники различных климатических исполнений в зависимости от места размещения при эксплуатации в воздушной среде до высоты 4,3 км, под землей и водой изготавливают по *пяти категориям размещения*. Данные категории размещения не распространяются на летательные и космические аппараты.

1.2.3. Требования, предъявляемые к техническим средствам ЭВМ

ЭВМ создаются на базе конструкций с учетом предъявляемых к ним технических требований. От выполнения всего комплекса технических требований зависит качество конструкций. Технические требования принято делить на частные, относящиеся только к конкретной ЭВМ или ее составным частям, и общие.

Общие технические требования к ЭВМ и их техническим средствам определяются ГОСТ 16325-76, ГОСТ 21552-84, ГОСТ 20397-82 и др.

Общие технические требования подразделяются на несколько взаимосвязанных групп:

- 1) к функциональным характеристикам;
- 2) по устойчивости к внешним воздействующим факторам;
- 3) к радиопомехам;
- 4) к электропитанию, электрической прочности, сопротивлению изоляции и безопасности;
- 5) по обеспечению удобства эксплуатации;
- 6) по использованию комплектующих элементов;
- 7) к конструкции;
- 8) к маркировке, упаковке, транспортированию и хранению;
- 9) к патентной чистоте.

Кроме требований по устойчивости к климатическим воздействиям, к конструкции технических средств ЭВМ предъявляются требования по устойчивости к механическим, радиационным и др. воздействиям. Численные значения этих требований устанавливаются в стандартах либо в технических условиях на конкретные изделия ЭВМ. Например, нормирование факторов может быть произведено по ГОСТ 16962-71 с указанием степени жесткости. В связи с этим изделия ЭВМ в упакованном виде должны сохранять работоспособность и внешний вид после ударных нагрузок многократного действия с пиковым ударным ускорением не более 15g и при длительности ударного импульса 10...15 мс.

В зависимости от особенностей разрабатываемых изделий содержание и номенклатура групп требований могут уточняться.

1.2.4. Показатели качества конструкций ЭВМ

Важнейшим направлением при конструировании и производстве ЭВМ является обеспечение качества конструкций. Качество изделий ЭВМ – это не только результат производственного процесса. Оно формируется на всех этапах проектирования (в том числе и конструирования) и эксплуатации ЭВМ.

Показатели качества конструкций ЭВМ можно условно разделить на несколько групп. Основные из них:

- назначения,
- надежности,
- технологичности,
- стандартизации и унификации,
- эргономические,
- эстетические,
- патентно-правовые,
- экологические и показатели техники безопасности,
- транспортируемости,
- экономические.

Показатели *назначения* характеризуют полезный эффект от использования ЭВМ по назначению и область ее применения. Они показывают функциональные возможности, техническое совершенство и назначение ЭВМ, ее состав и структуру.

Показатели *надежности* характеризуют возможность ЭВМ выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в необходимых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Количественные значения показателей надежности технических средств ЭВМ устанавливаются для нормальных климатических условий эксплуатации в соответствии с табл. 1.3. Средний срок службы современных изделий ЭВМ должен быть не менее 10 лет.

Таблица 1.3

Ряды значений показателей надежности технических средств ЭВМ

Показатели надежности	
Наименование	Значение
Наработка на отказ, ч	100; 150; 200; 250; 300; 400; 500; 750; 1000; 2000; 3000; 5000
Среднее время восстановления, ч	0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50
Коэффициент технического использования	0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 0,99
Наработка на сбой	По технической документации на технические средства

Показатели *технологичности* характеризуют эффективность конструкторско-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении, эксплуатации и ремонте изделий ЭВМ.

Показатели *стандартизации и унификации* характеризуют степень использования в конкретной разработке ЭВМ стандартизованных деталей, узлов, блоков и других компонентов, а также уровень унификации составных частей конструкции ЭВМ.

Эргономические показатели характеризуют систему «человек – ЭВМ – среда». Для многих электронно-вычислительных изделий эти показатели могут быть одними из важнейших. В свою очередь эргономические показатели подразделяются на: гигиенические, антропометрические, физиологические и психологические.

Эстетические показатели характеризуют художественность, выразительность и оригинальность формы ЭВМ, гармоничность и целостность конструкции, соответствие формы и конструкции ЭВМ стилю, цветовое и декоративное решение ЭВМ и т. п.

Патентно-правовые показатели служат для оценки степени патентной чистоты и патентной защиты конструкций ЭВМ.

Экологические показатели и показатели *техники безопасности* характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при изготовлении и эксплуатации изделия (экологические показатели), а также особенности конструкций, обуславливающие при ее изготовлении и эксплуатации безопасность человека (показатели техники безопасности).

Показатели *транспортируемости* отражают приспособленность конструкций ЭВМ к транспортированию, к подготовительным и заключительным технологическим операциям, связанным с транспортированием.

Экономические показатели характеризуют затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке конструкций ЭВМ, на производство и эксплуатацию, на экономическую эффективность при эксплуатации ЭВМ. Это особый вид показателей, позволяющих оценивать технологичность и ремонтпригодность конструкций, уровень стандартизации, патентную чистоту и т. д.

Между показателями различных групп существуют взаимосвязи, которые необходимо учитывать при проектировании ЭВМ.

1.2.5. Модульный принцип создания технических средств ЭВМ

В конструкции ЭВМ объединяются элементы, составляющие ее электрическую принципиальную схему (*элементная база*) и конструктивные детали (*конструктивная база*). В результате композиции и декомпозиции конструкцию ЭВМ делят на ряд иерархических уровней, каждый из которых может иметь функциональную и конструктивную законченность.

Обычно при проектировании технических средств ЭВМ, принадлежащих какому-либо семейству, все механические конструкции (стойки, рамы, панели, ячейки и т. д.) создаются типовыми, в виде базовых многократно повторяющихся конструкций, которые обычно называются *конструктивными модулями*.

Таким образом, конструкция современной ЭВМ содержит некоторую иерархию типовых модулей, строящихся по принципу конструктивной законченности и снабжаемых элементами электрической и механической коммутации в модули следующего, более высокого уровня. На основе конструктивной модульности создается схемная (функциональная) модульность, т. е. полная принципиальная схема ЭВМ разделяется на подсистемы разной сложности, снабжаемые цепями входа-выхода для связи с подобными подсистемами. Количество уровней иерархии зависит от класса ЭВМ, используемой элементной базы, технологии изготовления и т. п.

Модульный (базовый) принцип конструирования (в различных его разновидностях), основывающийся на использовании агрегатирования, функциональной и размерной взаимозаменяемости, схемной и конструкторской унификации, является основным при построении и компоновке современных технических средств ЭВМ.

Главные достоинства модульного принципа построения конструкций технических средств (ТС) сводятся к следующему:

1) на этапе разработки возможна одновременная работа над модулями различных уровней, что сокращает сроки проектирования; упрощается отладка и сопряжение модулей, их конструирование, макетирование и испытание; сокращается объем оригинальной конструкторской документации, поскольку используются групповые базовые чертежи; обеспечивается простота модернизации как отдельных модулей, так и ЭВМ в целом, а также упрощение и ускорение внесения изменений в схемы, конструкции и документацию;

2) на этапе производства достигается параллелизм технологических процессов изготовления модулей в производстве, что сокращает сроки освоения серийного производства ЭВМ; упрощается сборка и монтаж ЭВМ в целом; повышается степень специализации производства; снижается стоимость изготовления технических средств благодаря возможности применения широкой механизации и автоматизации производства;

3) повышается эксплуатационная надежность технических средств ЭВМ, облегчается обслуживание благодаря свободе доступа к составным частям ЭВМ; улучшается ремонтпригодность аппаратуры.

При *компоновке* какого-либо изделия, содержащего конструктивные модули, решаются вопросы увязки взаимной ориентации модулей в ограниченном конструктивном объеме (пространстве) и способа их перемещения относительно друг друга при сборке и эксплуатации. Цель компоновки – оптимизация функциональных, эксплуатационных, конструктивно-технологических и эстетических показателей изделий ЭВМ.

При конструировании современных ЭВМ используется *геометрический* (модульный) метод компоновки. Геометрическая компоновка позволяет «сворачивать», «вытягивать» и «разносить» в пространстве принципиальные схемы отдельных конструктивных модулей в самых разнообразных вариантах и пропорциях, что удобно как при проектировании, так и при эксплуатации ЭВМ.

Применение модульного принципа при проектировании изделий ЭВМ позволяет унифицировать и стандартизировать системы базовых конструкций (конструкционные системы). *Система базовых конструкций ЭВМ* представляет собой совокупность типовых конструкций, находящихся в определенной соподчиненности на основе единого размерного модуля и оптимальной технологии производства.

В некоторых системах базовых конструкций стандартизации подлежат только несущие конструкции (конструктивы), предназначенные для размещения элементов ЭВМ и обеспечения их функционирования в реальных условиях производства. В ряде других систем базовых конструкций стандартизуются также вспомогательные изделия (принадлежности), например разъемные соединители, съемные крепежные и фиксирующие элементы и т. п.

Одними из основных принципов построения систем базовых конструкций являются принципы размерности и входимости.

В странах СНГ при проектировании радиоэлектронной и микроэлектронной аппаратуры применяется более десятка различных систем базовых

конструкций. При конструировании ЭВМ наиболее широко используются следующие системы базовых конструкций, строящиеся на основе размерно-параметрических рядов: ЕС ЭВМ, СМ ЭВМ, КАМАК, МС ЭВТ и некоторые другие (рис. 1.2). Данные системы предусматривают реализацию конструкций ЭВМ в следующих исполнениях: в напольном (ЕС ЭВМ); в напольном, настольном и встраиваемом (СМ ЭВМ, МС ЭВТ, КАМАК).

Использование определенных систем базовых конструкций дает при разработке ЭВМ большой технико-экономический эффект. Он заключается обычно в следующем:

- при разработке новых изделий используются проверенные типовые конструкции, исключая поиски возможных решений и ошибки;
- обеспечивается преемственность в производстве изделий;
- ускоряется подготовка производства и сокращаются расходы на нее;
- из-за наличия большого числа общих конструктивных элементов лучше условия ремонта и эксплуатации изделий;
- на основе базовых изделий легко создаются различные их модификации и т. д.

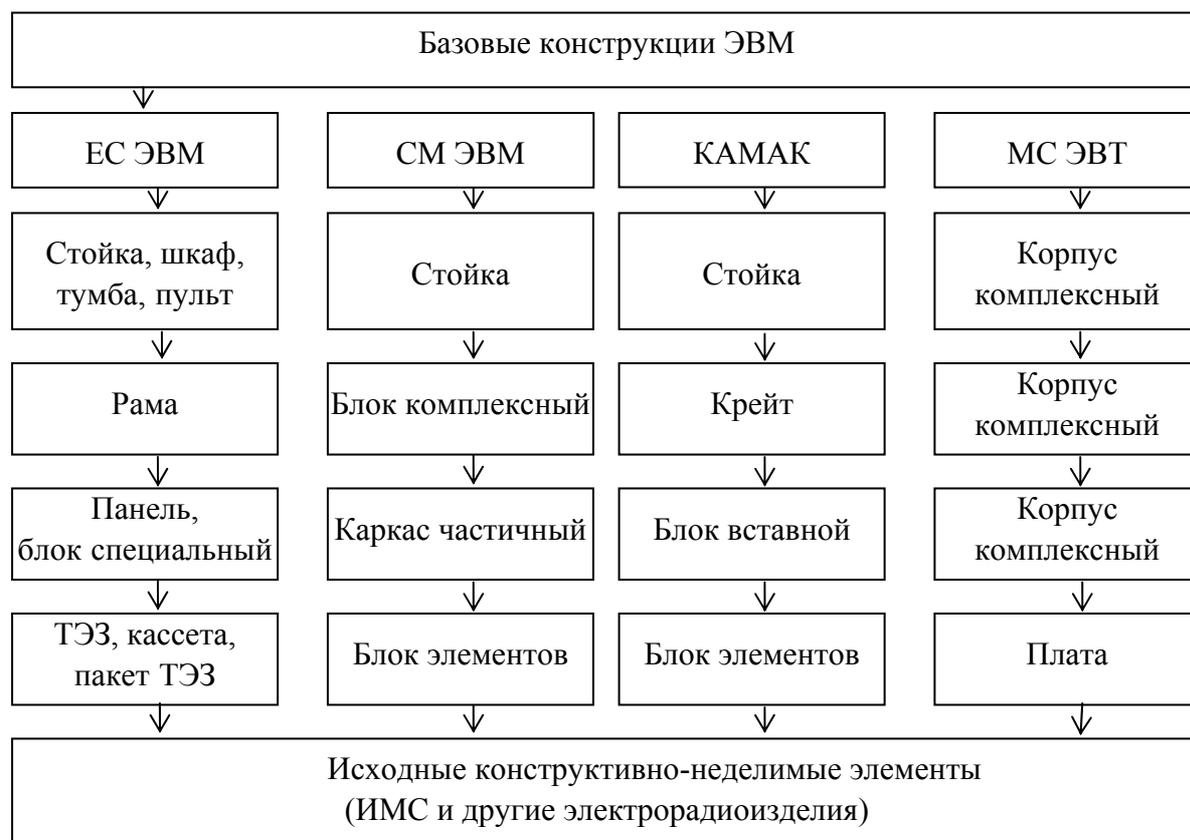


Рис. 1.2. Состав иерархических уровней модулей для основных систем базовых конструкций ЭВМ

Вопросы для самопроверки по теме 1.2

1. Перечислите климатические факторы, влияющие на работоспособность ЭВМ.
2. Перечислите механические факторы, влияющие на работоспособность ЭВМ.
3. Перечислите радиационные факторы, влияющие на работоспособность ЭВМ.
4. Назовите нормальные климатические условия эксплуатации технических средств ЭВМ.
5. Какое влияние оказывают внешние факторы на работоспособность ЭВМ?
6. Перечислите параметры климатических факторов, воздействующих на стационарные ЭВМ общего применения.
7. Перечислите параметры климатических факторов, воздействующих на средства вычислительной техники, применяемые в автоматизированных системах управления, встраиваемые в машины, приборы и оборудование.
8. Перечислите основные климатические исполнения изделий ЭВМ.
9. Перечислите группы общих технических требований к ЭВМ.
10. Перечислите группы показателей качества конструкций ЭВМ.
11. Раскройте сущность и достоинства модульного принципа построения конструкций технических средств ЭВМ.
12. Дайте определение системы базовых несущих конструкций ЭВМ.
13. Приведите состав иерархических уровней модулей для основных систем базовых конструкций ЭВМ.
14. Назовите преимущества использования системы базовых конструкций.

Тема 1.3. Методы и средства конструирования

1.3.1. Техническая документация на изделия ЭВМ

В процессе проектирования, производства, а также для обеспечения эксплуатации и ремонта ЭВМ выпускают различные технические документы. Всю эту документацию можно условно разделить на три основные группы:

- конструкторскую,
- технологическую,
- нормативно-техническую.

Конструкторская документация (КД) на ЭВМ – это совокупность документов, которые полностью и однозначно определяют все необходимые и достаточные данные для изготовления, наладки, приемки, эксплуатации и ремонта как ЭВМ в целом, так и всех ее составных частей.

Технологические документы в отдельности или в совокупности определяют технологический процесс изготовления (сборки), ремонта изделия и его составных частей, содержат необходимые и достаточные данные для организации производства.

Нормативно-технические документы обеспечивают: единство подхода к разработке, изготовлению и эксплуатации изделий ЭВМ; техническую, информационную и программную совместимость; необходимые качественные показатели изделий и удешевление последних; сокращения сроков проектирования и производства и т. п.

Группа нормативно-технических документов, используемая в пределах одной разработки, представляет собой комплекс взаимосвязанных стандартов различного уровня (государственных, отраслевых, предприятия) и руководящих материалов.

Основными объектами стандартизации в ЭВМ обычно являются:

- общие вопросы проектирования (терминология, технические требования, технические условия, методы испытаний и др.);
- элементная база;
- конструктивная и технологическая база и нормы проектирования;
- система сопряжения устройств и обеспечения единства их интерфейсов;
- показатели надежности ЭВМ и их составных частей, методы определения показателей;
- номенклатура и правила выполнения конструкторской документации;
- кодирование информации на носителях и устройствах передачи данных, в документации;
- системы математического обеспечения и программной документации.

Особую роль в группе нормативно-технических документов при конструировании и производстве ЭВМ играют государственные стандарты, входящие в Единую систему конструкторской документации (ЕСКД), Единую систему технологической документации (ЕСТД) и Единую систему программной документации (ЕСПД). Их основное назначение заключается в установлении во всех организациях и на всех предприятиях единых правил выполнения документации. Они дают возможность обмена документами между организациями и предприятиями без их переоформления,

обеспечивают стабильность комплектности, которая исключает повторную разработку и выпуск дополнительных документов.

ЕСКД представляет собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения конструкторских документов. В государственных стандартах ЕСКД изложены: основные положения; комплектность и формы конструкторских документов; правила выполнения и оформления чертежей, схем и текстовых документов; графические и буквенные условные обозначения; обозначения конструкторских документов; правила учета, хранения, обращения и изменения конструкторских документов.

ЕСТД представляет собой комплекс государственных стандартов и руководящих нормативных документов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформления и обращения технологических документов, применяемый при изготовлении и ремонте изделий (включая контроль, испытания и перемещение). В государственных стандартах ЕСТД изложены: единая система обозначения технологических документов; положения обеспечения единства оформления документов; положения обеспечения унификации последовательности размещения однородной информации в формах документации на различные виды работ.

Правила составления и оформления программных документов на ЭВМ устанавливаются *ЕСПД*.

Все отраслевые стандарты, стандарты предприятий, руководящие материалы строятся на основе действующих государственных стандартов и являются их развитием или ограничением. Они устанавливают единство схемотехнических и конструктивно-технологических решений и математического обеспечения ЭВМ и распространяются на схемную конструкторскую документацию, условные графические обозначения, специфические документы вычислительной техники, выполняемые как вручную, так и автоматизированным способом.

1.3.2. Конструкторская документация. **Комплектность конструкторских документов**

Выполнение КД на изделия ЭВМ имеет ряд *особенностей*, связанных как с особенностями ЭВМ, так и с методами выполнения документов:

- изделия ЭВМ работают на различных принципах: электронных, электромеханических, механических, что усложняет выполнение КД;

- при проектировании стационарных ЭВМ используется модульный принцип конструирования, т. е. применяется конкретная конструкционная система с модульной структурой. При этом все несущие конструкции (стойки, рамы, панели, типовые элементы замены и т. п.) создаются типовыми в виде базовых конструкций;

- особенности изделий ЭВМ и методов их проектирования (автоматизированное конструирование, использование САПР и т. п.) привели к созданию ряда специфичных КД. К ним относятся схемы алгоритмов, временные диаграммы, таблицы сигналов, таблицы проверки параметров и др.

В зависимости от способа выполнения и характера использования КД имеют различные наименования: *оригинал, подлинник, дубликат и копия.*

Графические и текстовые конструкторские документы подразделяются на виды согласно ГОСТ 2.102-68.

К *графическим* конструкторским документам относятся следующие виды чертежей:

- 1) чертеж детали, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;

- 2) сборочный чертеж, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки (изготовления) и контроля;

- 3) чертеж общего вида, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его составных частей и поясняющий принцип работы изделия;

- 4) теоретический чертеж, определяющий геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей;

- 5) габаритный чертеж, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;

- 6) электромонтажный чертеж, содержащий данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия;

- 7) монтажный чертеж, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия и данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения;

- 8) схема – документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними;

- 9) спецификация – документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта.

Кроме указанных выше, в состав конструкторской документации входят *текстовые* документы: различные ведомости (например, ведомо-

сти спецификаций, ссылочных документов, покупных изделий, разрешения применения покупных изделий, держателей подлинников и др.).

Важными документами, входящими в состав конструкторской документации, являются :

1) пояснительная записка – документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений;

2) технические условия – документ, содержащий требования (совокупность всех показателей, норм, правил и положений) к изделию, его изготовлению, контролю, приемке и поставке, которые нецелесообразно указывать в других конструкторских документах;

3) программа и методика испытаний – документ, содержащий технические данные, подлежащие проверке при испытании изделий, порядок и методы их контроля;

4) таблица – документ, содержащий в зависимости от его назначения соответствующие данные, сведенные в таблицу;

5) расчет – документ, содержащий расчеты параметров и величин (расчет размерных цепей, расчет на прочность и др.);

б) эксплуатационные документы – документы, предназначенные для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации;

7) ремонтные документы – документы, содержащие данные для проведения ремонтных работ на специализированных предприятиях;

8) инструкция – документ, содержащий указания и правила, используемые при изготовлении изделия (сборка, регулировка, контроль, приемка и т. п.).

Рассмотрим основные понятия, определяющие *комплектность КД*. Различают три варианта комплектности КД на изделие – ГОСТ 2.102-68:

- основной КД;
- основной комплект КД;
- полный комплект КД.

Основной КД в совокупности с поименованными в нем конструкторскими документами полностью определяет данное изделие и его состав. Для деталей основным КД является чертеж детали, а для сборочной единицы, комплексов и комплектов – спецификация.

Основной комплект КД изделия включает документы, относящиеся ко всему изделию в целом. В него не входят КД составных частей изделия.

Полный комплект КД изделия включает:

- 1) основной комплект КД на данное изделие;
- 2) основные комплекты КД всех составных частей, входящих в состав данного изделия;
- 3) основные комплекты КД всех составных частей, входящих в части, упомянутые в п. 2 и т. д.

При автоматизированном конструировании изделий ЭВМ основной комплект конструкторских документов, как правило, не изменяется. Однако для обеспечения автоматизированного изготовления и контроля изделий могут создаваться документы как в традиционном виде (на бумаге, кальке), так и в нетрадиционном – на магнитных носителях (перфоленте, магнитной ленте и т. п.).

1.3.3. Схема как конструкторский документ

Схема – это графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними. Схемы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, регулировки, эксплуатации изделий.

Схемы в зависимости от элементов и связей между ними подразделяются на следующие *виды* (обозначаемые буквами):

- Э – электрические;
- Г – гидравлические;
- П – пневматические;
- Х – газовые (кроме пневматических);
- К – кинематические;
- В – вакуумные;
- Л – оптические;
- Р – энергетические;
- С – комбинированные;
- Е – деления.

По основному назначению схем их подразделяют на следующие *типы* (обозначаемые цифрами):

- структурные – 1;
- функциональные – 2;
- принципиальные (полные) – 3;
- соединений (монтажные) – 4;

подключения – 5;
общие – 6;
расположения – 7;
объединенные – 0.

Наименование схемы определяется ее видом и типом. Например, схема электрическая принципиальная, схема электрическая структурная и т. д.

Код схемы состоит из буквы, определяющей вид схемы, и цифры, обозначающей тип схемы. Например, Э3 – схема электрическая принципиальная, Э1 – схема электрическая структурная и т. д.

Схемы выполняются без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных частей изделия не учитывается или учитывается приближенно.

Графическое обозначение элементов (устройств, функциональных групп) и соединяющие их линии связи следует располагать на схеме таким образом, чтобы обеспечить наилучшее представление о структуре изделия и взаимосвязи его составных частей.

Допускается условные графические обозначения элементов располагать в таком же порядке, как они расположены в изделии. Для повышения наглядности схем допускается изображать графические обозначения элементов или функциональных групп *разнесенным* способом (рис. 1.3), т. е. располагать их составные части в разных местах схемы. В этом случае на поле схемы можно указывать полные условные графические обозначения функциональных частей или таблицы, разъясняющие их расположение.

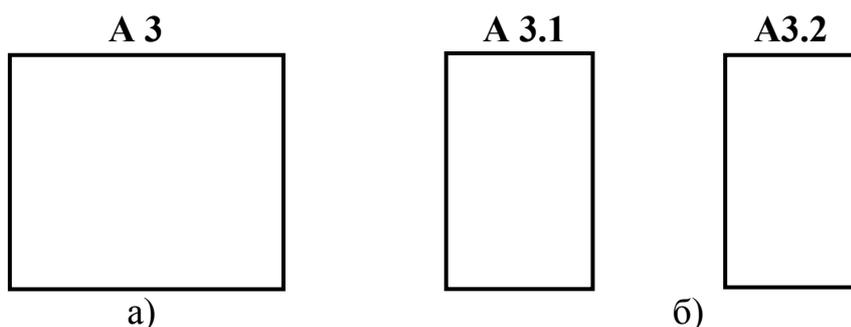


Рис. 1.3. Фрагмент построения схемы электрической принципиальной:
а – совмещенный способ устройства, б – разнесенный способ изображения устройства

Допускается выполнять схемы в пределах условного контура, упрощенно изображающего конструкцию изделия. Условные контуры при этом выполняются сплошными линиями, равными по толщине линиям связи.

Линии связи изображают в виде горизонтальных и вертикальных отрезков, имеющих минимальное количество изломов и взаимных пересечений.

Расстояние (просвет) между двумя соседними линиями графического обозначения должно быть не менее 1 мм. Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3 мм, между отдельными условными графическими обозначениями – не менее 2 мм.

Устройства, имеющие самостоятельную принципиальную схему, выполняют на схемах в виде фигуры сплошной линией, равной по толщине линиям связи.

Функциональную группу или устройство, не имеющее самостоятельной принципиальной схемы, выполняют на схемах в виде фигуры штрихпунктирной линией, равной по толщине линиям связи. Фигура, как правило, должна иметь прямоугольную форму. Допускается выделять части схемы фигурами непрямоугольной формы.

Если изделие содержит одинаковые устройства, имеющие самостоятельные принципиальные схемы, то каждое из них рассматривают как элемент схемы и изображают на схеме в виде прямоугольника или условного графического обозначения, присваивают ему позиционное обозначение и записывают в перечень элементов одной позицией.

1.3.4. Правила выполнения схемы электрической принципиальной

Схема электрическая принципиальная (ЭЗ) является наиболее полной электрической схемой изделия, на которой изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними и электрические элементы, которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

Электрические элементы на схеме изображают в виде условных графических обозначений, установленных стандартами ЕСКД. Элементы, используемые в изделии частично, допускается изображать не полностью, а только используемые части. Схемы выполняют для изделий, находящихся в отключенном положении.

Условные графические обозначения элементов и устройств выполняют совмещенным (составные части элементов или устройств изображают на схеме в непосредственной близости друг к другу) или разнесенным (составные части элементов и устройств или отдельные элементы устройств изображают на схеме в разных местах так, чтобы отдельные цепи изделия были изображены наиболее наглядно) способами

При изображении элементов *разнесенным* способом допускается на свободном поле схемы помещать условные графические обозначения

элементов, выполненные совмещенным способом. При этом элементы, используемые в изделии частично, изображают полностью с указанием использованных и неиспользованных частей (например, все контакты реле).

Выводы неиспользованных частей изображают короче, чем выводы использованных.

Схемы выполняют в многолинейном (рис. 1.4, а) или однолинейном (рис. 1.4, б) изображении.

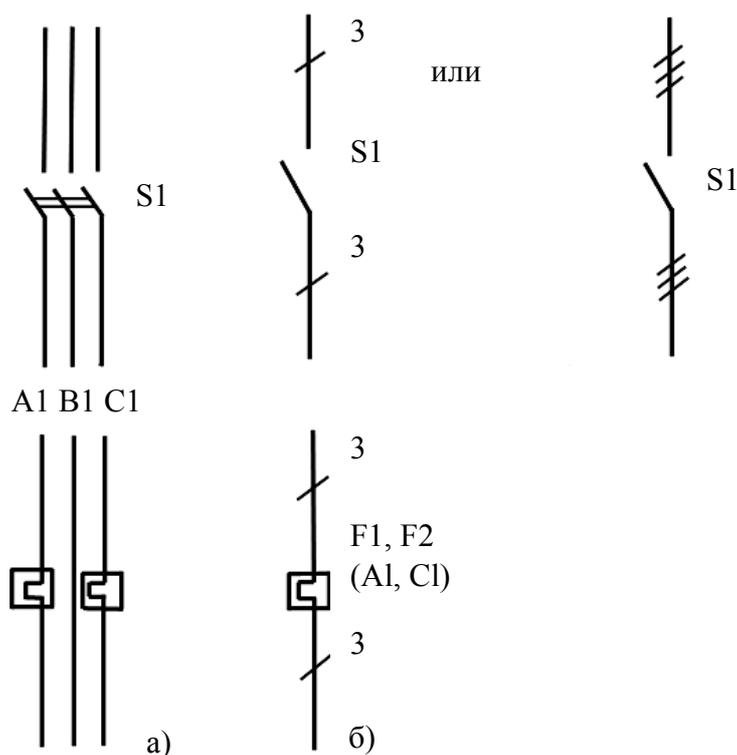


Рис. 1.4. Фрагмент схемы электрической принципиальной:
а – многолинейное изображение; б – однолинейное изображение

При *многолинейном* изображении каждую цепь изображают отдельной линией, а элементы, содержащиеся в этих цепях – отдельными условными графическими обозначениями на схеме, присваиваются условные буквенно-цифровые позиционные обозначения в соответствии с ГОСТ 2.710-81.

Позиционные обозначения элементам (устройствам) присваивают в пределах изделия.

Порядковые номера элементам (устройствам) следует присваивать, начиная с единицы, в пределах группы элементов (устройств), которым на схеме присвоено одинаковое буквенное позиционное обозначение (например: R1, R2, R3 и т. д.; C1, C2, C3 и т. д.). Порядковые номера должны быть присвоены в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме сверху вниз в направлении слева направо.

Буквы и цифры позиционного обозначения выполняют чертежным шрифтом одного размера. Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с установленными графическими обозначениями элементов и (или) устройств с правой стороны или над ними. На схеме изделия, в состав которого входят устройства, позиционные обозначения элементам присваивают в пределах каждого устройства, а при наличии нескольких одинаковых устройств – в пределах этих устройств по правилам, изложенным выше.

Если в состав изделия входят функциональные группы, то вначале присваивают позиционные обозначения элементам, не входящим в функциональные группы, а затем элементам, входящим в функциональные группы. Для одинаковых функциональных групп, например, $\neq A1$, $\neq A2$, позиционные обозначения элементов, присвоенные в одной из них, повторяют во всех последующих группах.

Обозначение устройства указывают сверху или справа от изображения. При разнесенном способе изображения позиционные обозначения проставляют около каждой составной части. При разнесенном способе изображения элементов, входящих в устройство или функциональную группу, в состав позиционных обозначений этих элементов должно входить соответственно позиционное обозначение данного устройства или функциональной группы, например, $= A3 - C5$ – конденсатор $C5$, входящий в устройство $A3$, или $\neq AT1 - C5$ – конденсатор, входящий в функциональную группу $\neq AT1$.

Допускается в отдельных случаях все сведения об элементах помещать около условных графических обозначений.

При условном присвоении обозначений выводам (контактам) на поле схемы помещают соответствующее пояснение.

При изображении элемента разнесенным способом поясняющую надпись помещают около одной составной части изделия или на поле схемы около изображения элемента, выполненного совмещенным способом.

На схеме изделия разрешается изображать отдельные элементы, не входящие в данное изделие, но необходимые для разъяснения принципа его работы. Графические обозначения этих элементов отделяют от основной схемы тонкой штрих-пунктирной линией с двумя точками.

На схеме рекомендуется указывать характеристики входных и выходных цепей изделия (частоту, напряжение, силу тока, сопротивление, индуктивность и т. п.), параметры, подлежащие измерению на контрольных контактах, гнездах и т. п.

Если невозможно указать характеристики или параметры входных и выходных цепей изделия, то рекомендуется указывать наименование цепей или контролируемых величин.

Если изделие заведомо предназначено для работы только в определенной установке, то на схеме допускается указывать адрес внешних соединений входных и выходных цепей данного изделия. Адрес должен обеспечивать однозначность присоединения. Например, если входной контакт изделия должен быть соединен с пятым контактом третьего соединителя устройства А, то адрес должен быть записан следующим образом: = А – ХЗ : 5. Допускается указывать адрес в общем виде, если будет обеспечена однозначность присоединения, например, «Прибор А».

Характеристики входных и выходных цепей изделия, адреса их внешних подключений рекомендуется записывать в таблицы, помещаемые взамен условных графических обозначений входных и выходных элементов-соединителей, плат и т. д. (рис. 1.5).

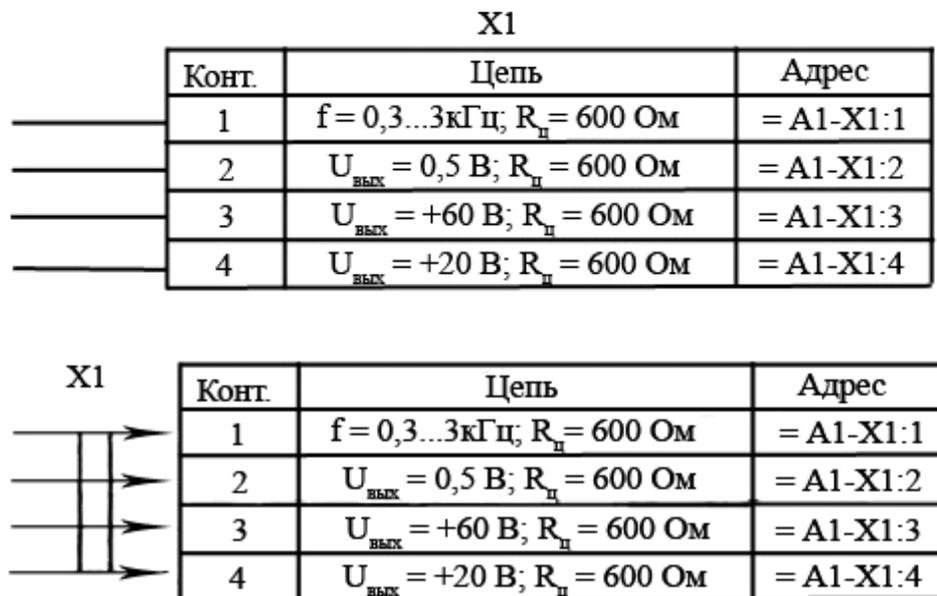


Рис. 1.5. Таблица адресов

Каждой таблице присваивают позиционное обозначение элемента, взамен которого она помещена. Над таблицей допускается указывать условное графическое обозначение контакта – гнезда или штыря. Таблицы допускается выполнять разнесенным способом. Порядок расположения контактов в таблице определяется удобством построения схемы. Допускается помещать таблицы с характеристиками цепей при наличии на схеме условных графических обозначений входных и выходных элементов – соединителей, плат и т. д.

Такие же таблицы помещают на линиях, изображающих входные и выходные цепи и не заканчивающихся на схеме соединителями, платами и т. д. В этом случае позиционные обозначения таблицам не присваиваются.

Допускается проставлять в графе «Конт.» несколько последовательных номеров контактов, в случае если они соединены между собой. Номера контактов отделяют друг от друга запятой.

При изображении на схеме многоконтактных соединений допускается применять условные графические обозначения, не показывающие отдельные контакты (ГОСТ 2.755-74).

Если таблицы помещены на поле схемы или на последующих листах, то им присваивают позиционные обозначения соединителей, к которым они составлены.

В графах таблиц указывают следующие данные:

- в графе «конт.» – номер контакта, соединителя. Номера контактов записывают в порядке возрастания;
- в графе «адрес» – обозначение цепи и (или) позиционное обозначение элементов, соединяемых с контактами;
- в графе «цепь» – характеристику цепи;
- в графе «адрес внешний» – адрес внешнего соединения.

Если в изделие входит несколько одинаковых устройств, то схему устройства помещают не в прямоугольник, а на свободном поле, с надписью по типу «Схема блока А1 – А4».

На поле схемы допускается помещать указания о марках, сечениях и расцветках соединительных проводов и кабелей, специальные указания к электрическому монтажу изделия.

При выполнении принципиальной схемы на нескольких листах должны соблюдаться следующие требования:

- нумерация позиционных обозначений элементов должна быть сквозной в пределах изделия (устройства);
- перечень элементов должен быть общим;
- при повторном изображении отдельных элементов на других листах схемы следует сохранять позиционные обозначения, присвоенные им на одном из листов схемы.

1.3.5. Эксплуатационные и ремонтные документы

Эксплуатационные документы составляют на изделия, для которых монтаж, использование, техническое обслуживание, транспортирование или хранение могут быть обеспечены при наличии сведений об устройстве, составе, технических параметрах, правилах эксплуатации и т. п. Если объ-

ем сведений, необходимых для обеспечения правильной эксплуатации, незначителен и их можно разместить в виде табличек и маркировок на самом изделии, то эксплуатационные документы не составляют. К числу эксплуатационных документов (ГОСТ 2.601-68) относят: формуляр (или паспорт), техническое описание, инструкцию по эксплуатации, инструкцию по монтажу и регулированию изделия на месте его установки, ведомость эксплуатационных документов.

Ремонтные документы (ГОСТ 2.602-68) выпускают только для среднего и капитального ремонта. Текущий ремонт производят по эксплуатационным документам на основе рабочей конструкторской документации, так же как изделия единичного и опытного производства. Средний и капитальный ремонт производят на специализированных предприятиях, поэтому ремонтные документы предназначены для этих случаев. Основным ремонтным документом является общее руководство по ремонту, составляемое для класса или группы однотипных изделий.

1.3.6. Методы конструирования штампованных деталей

При конструировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) широкое применение получили детали из листового материала. Они отличаются высокой прочностью и жесткостью при малом весе. Штамповка из листовых материалов обеспечивает малую трудоемкость и стоимость изготовления, высокую точность размеров.

На технологичность конструкции штампованных деталей оказывают влияние ограничения в формообразовании для выбранного материала, величина допуска на размеры и форму детали, требования к чистоте поверхности.

Для изготовления деталей из листа применяют разнообразные материалы: металлические (алюминиевые, магниевые и титановые сплавы, сплавы стали и латуни) и неметаллические (слоистые пластики, листовые термопласты). На штамповочные свойства металлов сильно влияет их химический состав и структура. Особенно это проявляется при изготовлении полых и сложных деталей, требующих большой пластической деформации.

Детали, изготавливаемые путем штамповки, в зависимости от формы могут быть условно разделены на плоские, изогнутые, полые и объемные.

Для изготовления штампованных деталей применяют две группы технологических операций:

- разделительные (отрезка, вырубка, пробивка, надрезка и др);
- формообразующие (гибка, выдавка, отбортовка, вытяжка, высадка и др.) – см. рис. 1.6 – 1.7.

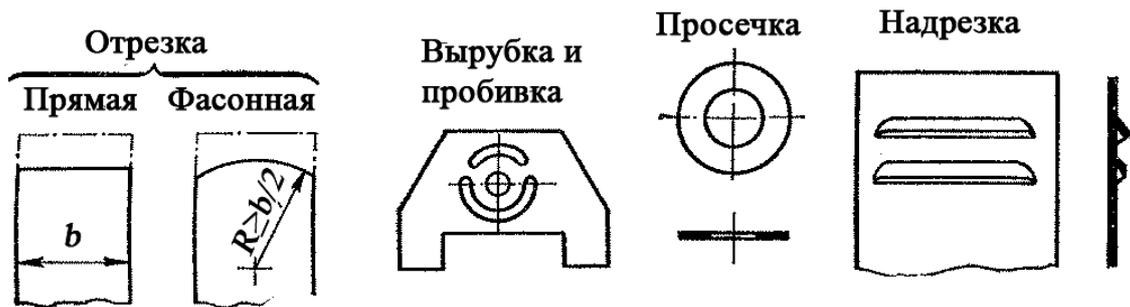


Рис. 1.6. Разделительные операции штамповки

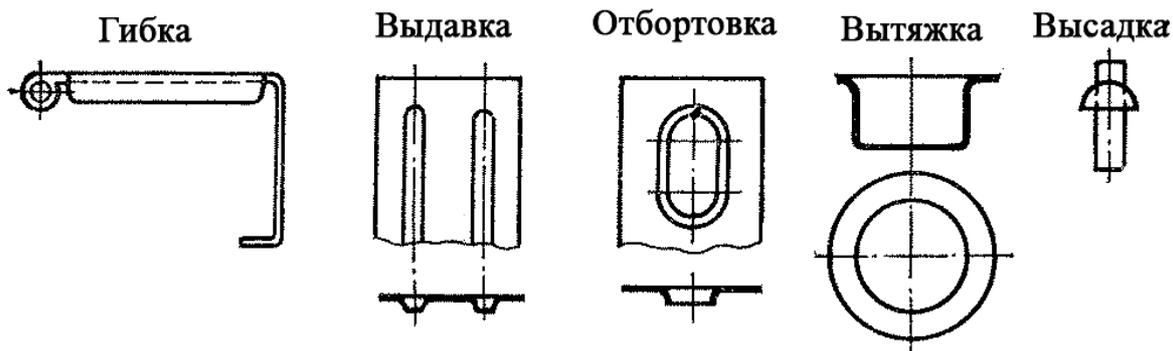


Рис. 1.7. Формообразующие операции штамповки

При конструировании деталей, получаемых путем вырубki и пробивки, необходимо обращать внимание на то, чтобы минимальные размеры по контуру находились в соответствии с толщиной листа. Обычно они в два и более раз превышают толщину листа.

Минимально допустимые размеры штампуемых отверстий различной формы зависят от марки материала и толщины листа (рис. 1.8). Минимальные расстояния между пробиваемыми отверстиями и между отверстиями и краем детали следует выбирать исходя из толщины материала (рис. 1.9).

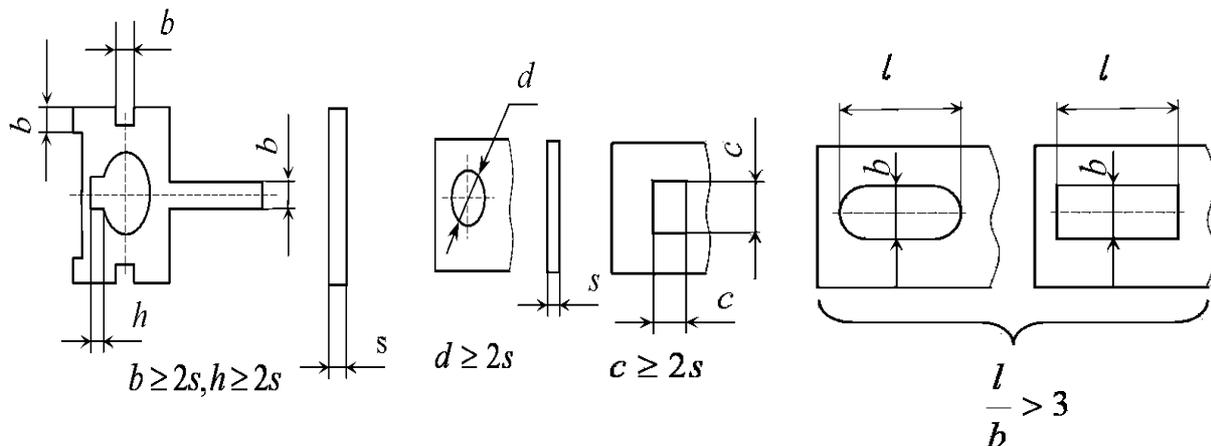


Рис. 1.8. Минимальные размеры элементов вырубаемого контура и отверстий в зависимости от толщины листа

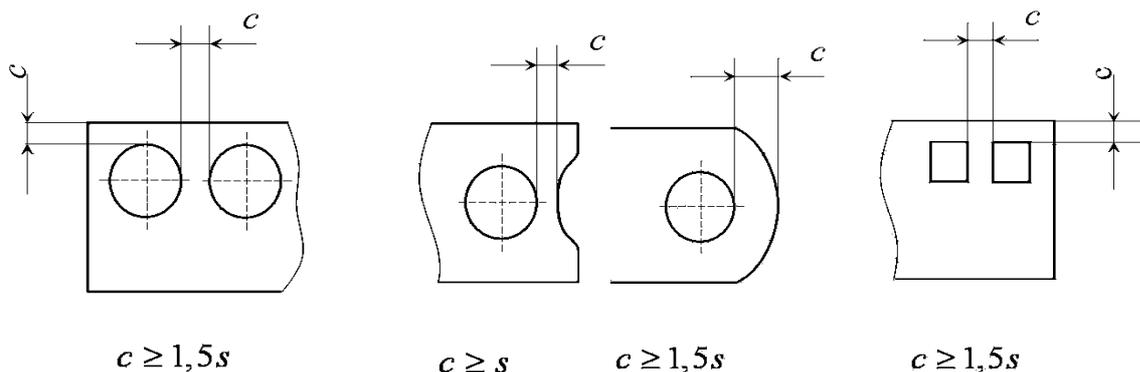


Рис.1.9. Минимальные размеры перемычек между отверстиями в зависимости от толщины листа при штамповке

Указанные соотношения являются предельными с точки зрения стоимости инструмента, поэтому по возможности целесообразно их применять увеличенными в 1,5 – 2 раза. Следует помнить, что невыполнение этого условия делает конструкцию менее технологичной, так как снижается стойкость штампа и увеличивает стоимость изготовления детали. Кроме того, возможны искажения формы.

Распространенными среди штампованных деталей, применяемых в конструкциях, являются детали, получаемые путем гибки (каркасы, скобы, хомутики и др.).

При гибки узких полос происходит искажение поперечного сечения детали. При гибки широких полос такого искажения не наблюдается. В месте изгиба возникает утонение материала, которое тем больше, чем меньше радиус изгиба. С уменьшением радиуса изгиба увеличиваются напряжения во внутренних и наружных волокнах, которые могут привести к трещинам. Минимальные радиусы изгиба зависят не только от толщины и марки материала, но и от его состояния при поставке, применяемого метода гибки, угла изгиба, положения линиигиба относительно направления проката листа и т. д.

Минимальный радиус гибки листового проката в холодном состоянии:

$$R = k_1 \cdot k_2 \cdot s, \quad (1.1)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от марки материала, его состояния и расположения линиигиба относительно направления проката;

k_2 – коэффициент, зависящий от угла гибки;

s – толщина листа, мм.

При гибке на ребро (рис. 1.10) минимальный радиус для алюминия, мягкой стали и латуни принимается $r_{\text{мин}} \geq 2,5 b$. При гибке труб с наружным диаметром до 20 мм минимальный радиус для алюминия и стали при-

нимается $r_{\text{мин}} \geq 1,5 D$, для титана – не менее трех диаметров. На величину минимального радиуса гибки трубы влияет отношение наружного диаметра к толщине стенки D/s . С увеличением отношения D/s минимальный радиус увеличивается.

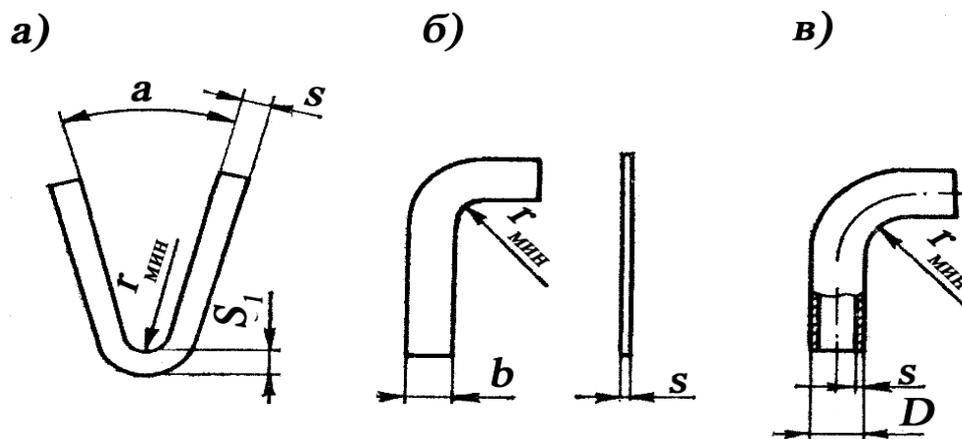


Рис. 1.10. Радиусы изгиба: а – при гибке листового материала по плоскости; б – на ребро; в – при гибке трубы

При конструировании РЭА широкое применение получили выдавки и отбортовки с целью придания деталям большей жесткости, увеличения поверхности теплообмена, для крепления, направления движения и т. д. Выдавки прямоугольной формы применяют как опорные площадки для крепления тяжелых узлов типа трансформаторов (рис. 1.11, а). Выдавки круглой формы (рис. 1.11, б), используют как опорные поверхности для крепления амортизаторов или для утопления головок винтов.

С целью придания тонкостенным листовым деталям (толщиной до 2 мм) типа кожухов, крышек и стенок дополнительной жесткости применяют ребра жесткости, или так называемые зиги (рис. 1.11, в).

Разбортованные отверстия применяют в тонколистовых деталях, предназначенных для вентиляции и снижения массы (рис. 1.12, а) с целью утопления головок винтов с потайной головкой (рис. 1.12, б) или для нарезки в них внутренней резьбы (рис. 1.12, в). Размеры отверстий D и d принимаются по размерам головок винтов с таким расчетом, чтобы последние не выступали над поверхностью детали. Разбортовка под внутреннюю резьбу применяется для резьбы М2 – М5.

При конструировании деталей, получаемых путем вытяжки, основное внимание необходимо обращать на правильный выбор радиусов сопряжения дна и стенки, стенки и фланца, соотношения между размерами поперечного сечения и высоты вытягиваемой детали. Необходимо стремиться к тому, чтобы высота была как можно меньше и деталь могла быть получена за одну вытяжную операцию.

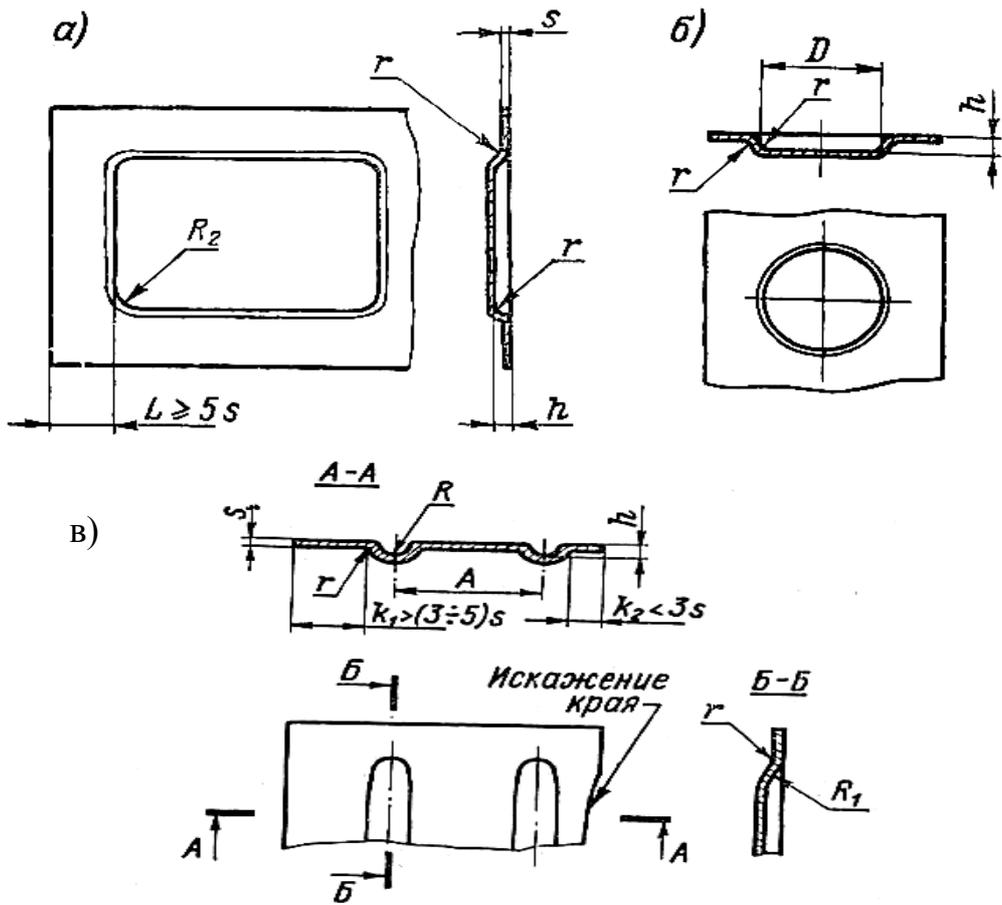


Рис. 1.11. Выдавки:
 а – прямоугольной формы; б – круглой; в – ребра жесткости

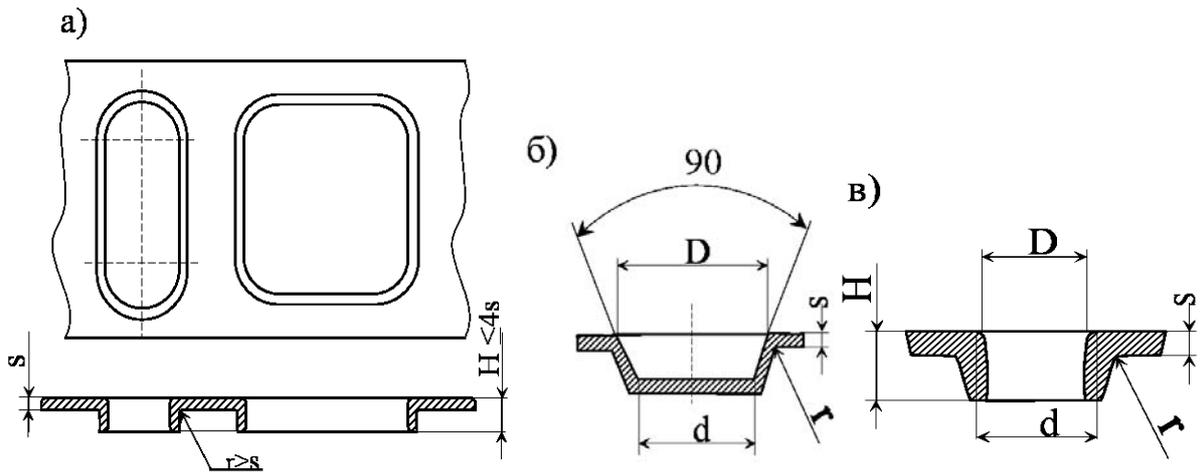


Рис. 1.12. Разбортовка отверстий, предназначенных:
 а – для вентиляции и снижения массы;
 б – для утолщения конической головки винта; в – для нарезания резьбы

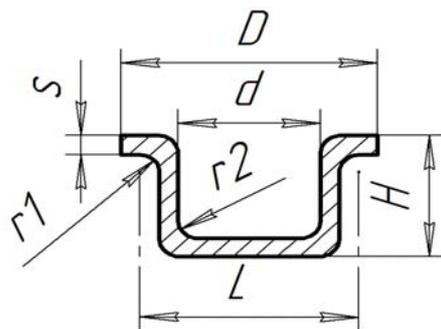


Рис. 1.13. Деталь с фланцем, получаемая вытяжкой

При конструировании деталей коробчатой формы следует выдерживать отношение высоты детали к радиусу скругления в углах (см. рис. 1.13). Значение H/r принимают равным 6 для алюминия, латуни Л62 и Л68, меди и мягкой стали.

1.3.7. Методика конструирования прессованных и литых деталей

Объемные детали получают литьем под давлением или прессованием как из металлических сплавов, так и из пластмасс и керамики. Все детали, получаемые литьем или прессованием, имеют усадку, что необходимо учитывать при конструировании. Литые металлические детали имеют очень малую усадку, у термопластов она больше. Самая большая усадка у литой керамики, которая наблюдается после выжигания пластификатора и спекания.

Важно, чтобы усадка была равномерной, одинаковой по всему объему, иначе происходит коробление детали, приводящее к неисправимому браку. Это должно обеспечиваться соответствующим выбором формы деталей. Толщина стенок во всех участках тела детали должна быть примерно одинаковой, не должно быть острых углов и резких переходов, которые могут вызвать механические перенапряжения и растрескивание при усадке.

Само существование явления усадки не дает возможности получать детали с высокой точностью размеров. При литье под давлением алюминиевых и магниевых сплавов, когда усадка минимальна, можно получить размеры деталей по 5-му классу точности, но для пластмассовых и литых керамических деталей возможен только более низкий класс точности.

Допуски на неотчетливые размеры литых и прессованных деталей назначают по 7, 8 и 9-му классу точности.

Точность размеров деталей из пластмасс, изготовленных литьем под давлением и прессованием, зависит от колебания усадки материала, конфигурации и габаритных размеров детали, способа подготовки сырья, точности и типа конструкции пресс-форм, величины технологических уклонов и механических режимов.

Общие требования к конструкции литых и прессованных деталей сводятся к следующему:

- детали должны иметь технологические уклоны;
- допуски должны быть технологически обоснованы с учетом колебаний усадки;
- детали должны иметь закругления, необходимые для увеличения механической прочности, облегчения процесса формообразования и улучшения внешнего вида;
- стенки деталей должны быть близкими по толщине друг другу;
- детали не должны иметь консольных выступов значительной длины.

Правильно сконструированной деталью следует считать такую, у которой величина разностенности не превышает 30 % наименьшей толщины и нет резких переходов.

Радиусы закруглений рекомендуется делать не менее 0,8 мм для наружных поверхностей и 1,5 мм для внутренних. На одном изделии следует применять наименьшее количество значений радиусов закруглений.

Отверстия в литых и прессованных деталях имеют разнообразное назначение: технологические отверстия, отверстия для снижения веса, расхода материала, установочные отверстия (базы) и т. д. Расположение отверстий на теле детали, их разновидность (сквозные, глухие, ступенчатые) и конфигурация в значительной степени определяют величину внутренних напряжений, усадку и точность отверстий и межцентровых расстояний, сложность пресс-формы, трудоемкость изготовления.

Оформление отверстий может быть окончательное или частичное, с последующей обработкой. Зачастую отверстия проще выполнять механической обработкой, особенно при малой серии.

При литье или прессовании можно получить отверстие такой конфигурации, которую технологической обработкой сделать трудно.

Расстояние между соседними отверстиями или отверстием и краем должно быть не менее диаметра отверстия. При расположении отверстия вблизи от края детали необходимо, чтобы форма края соответствовала форме отверстия. Это способствует соблюдению равнотолщинности, уменьшает возможную деформацию отверстий в результате неравномерной усадки стенок.

При конструировании пластмассовых деталей часто применяют армирование, так как пластмассы характеризуются низкой контактной прочностью, очень малым сопротивлением сдвигу (срезу), склонны к ползучести при длительных нагрузках. Чтобы избежать этих недостатков, пластмассы армируют металлической арматурой из стали, латуни и бронзы.

Арматуру применяют и для увеличения точности детали. Она уменьшает усадку пластмассы. Во многих случаях арматурой являются латунные контактные выводы. Для выполнения пайки они должны быть предварительно залужены.

По расположению в теле детали арматуру подразделяют на следующие виды (рис. 1.14):

- односторонняя,
- угловая,
- сквозная,
- глухая.

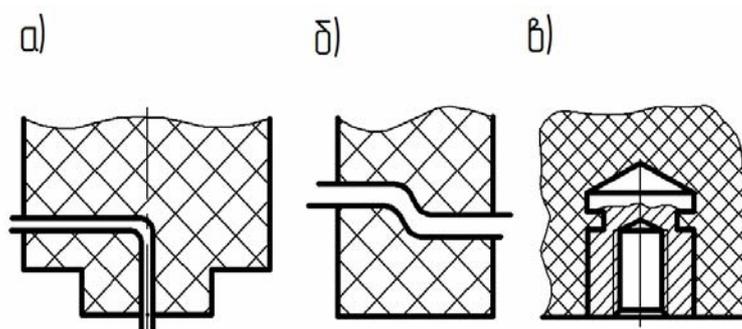


Рис. 1.14. Арматура в пластмассовых деталях:
а – угловая; б – сквозная; в – глухая

1.3.8. Методы конструирования механических соединений

При изготовлении электронной аппаратуры наряду с электрическими широко используются механические соединения, которые делятся на две группы:

- разъемные,
- неразъемные.

Разъемные соединения допускают полную разборку изделия на детали без разрушения их целостности. К ним относятся: *резьбовое, байонетное, штифтовое, шплинтовое и др.*

Резьбовое соединение (свинчивание) в общем объеме занимает наибольший удельный вес, но характеризуется высокой стоимостью и трудоемкостью. С помощью резьбовых соединений крепятся панели, переключатели, тумблеры, переменные резисторы, трансформаторы.

Байонетное соединение (рис. 1.15) используют в тех случаях, когда не требуется точного взаимного расположения совмещаемых деталей, но необходима быстрота соединения и разъединения.

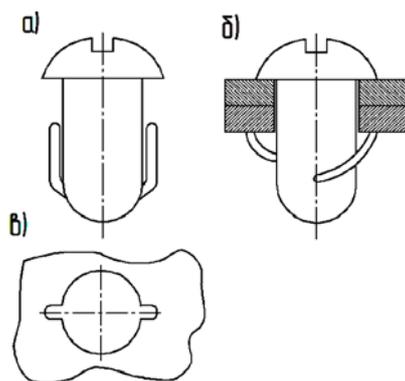


Рис. 1.15. А – байонентный фиксирующий стопор; б – байонентное соединение;
в – форма отверстия в соединяемых деталях

Соединение считается *неразъемным*, если его разборка сопровождается разрушением материалов или деталей, с помощью которых оно осуществлено. Неразъемные соединения выполняют: *склепыванием, пайкой, сваркой, склеиванием, развальцовкой т. д.* Удельный вес механических соединений в электронном аппаратостроении различен (рис. 1.16).

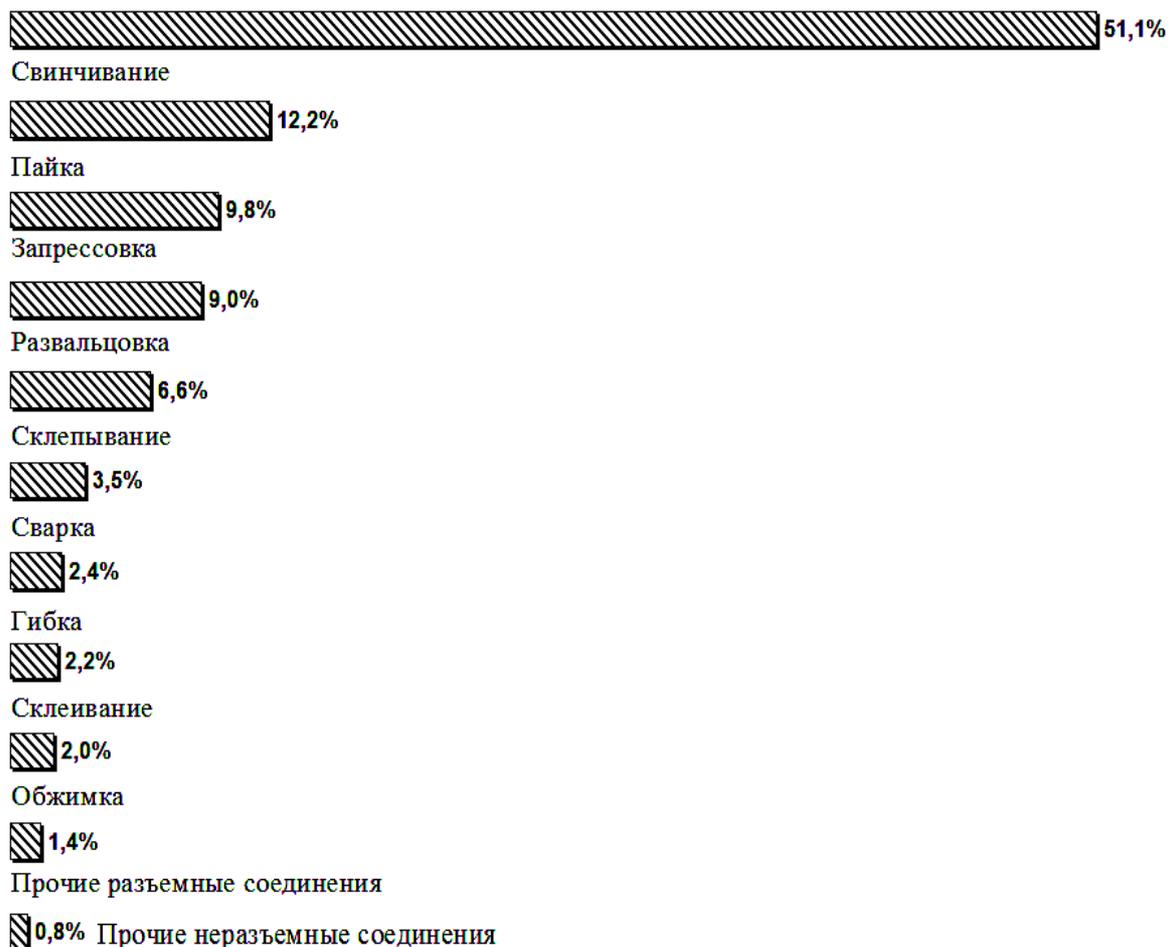


Рис. 1.16. Процентное соотношение видов соединений

Каждому виду соединения свойственны отдельные преимущества и недостатки как по трудоемкости, так и по надежности и долговечности работы.

Склеивание применяют для конструкций, работающих при высоких температурах и давлениях, для прочных соединений неметаллических деталей с металлами. К заклепочным относят соединения, развальцованные с помощью пустотелых и полупустотелых заклепок, а также соединения рассечкой и разворотом язычка, широко применяемом для ненагруженных деталей (рис. 1.17). Недостатками клепаного соединения являются: отсутствие герметичности шва, ослабление материала в месте соединения, концентрация и неравномерное распределение напряжений.

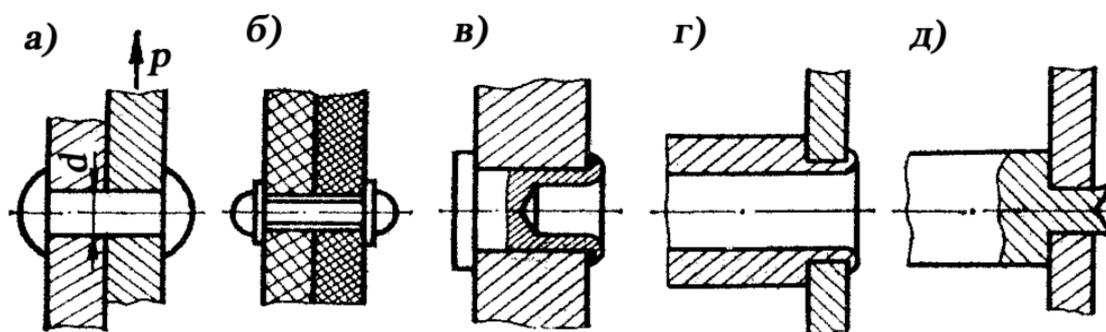


Рис. 1.17. Заклепочные соединения:

а – с осаживанием тела заклепки; б – без осаживания, с шайбами; в – получаемые развальцовкой полупустотелой заклепки; г – трубчатой оси; д – соединение рассечкой

Пайка и сварка конструкционных деталей имеют те же физико-химические особенности, достоинства и недостатки, что и при выполнении монтажных соединений. Некоторые отличия заключаются в технологии: подготовке деталей, выборе материалов, режимах и оборудовании.

Склеивание применяют для соединения материалов в самых различных сочетаниях. Соединения, полученные склеиванием, обладают высокой долговечностью, коррозионной стойкостью, теплоизолирующими, звукопоглощающими, демпфирующими свойствами, герметичностью. Технологический процесс склеивания отличается простотой, низкой себестоимостью сборки, легко может быть переведен на поточное производство. В настоящее время широко применяют комбинированные методы неразъемных соединений – *клеесварные* и *клееклепанные*. К недостаткам клеевых соединений следует отнести сравнительно низкую стойкость при повышенных температурах, пониженную прочность при неравномерном отрыве, дефицитность и токсичность многих составляющих клеевых композиций.

Развальцовка сопровождается возникновением в соединениях значительных деформаций, которые искажают взаимное положение деталей. Это вызывает необходимость в повышении требований к жесткости используемых приспособлений.

Вопросы для самопроверки по теме 1.3

1. Перечислите группы технической документации на изделия ЭВМ.
2. Назовите основные объекты стандартизации в ЭВМ.
3. Дайте определение ЕСКД, ЕСТД, ЕСПД.
4. Перечислите особенности КД на изделия ЭВМ.
5. Назовите виды КД в зависимости от способа выполнения и характера использования.
6. Перечислите графические КД.
7. Перечислите текстовые КД.
8. Дайте определение основного КД.
9. Что включает основной комплект КД?
10. Что включает полный комплект КД?
11. Назовите виды и типы схем. Как они обозначаются?
12. Охарактеризуйте разнесенный и совмещенный способы изображения схем.
13. Охарактеризуйте много- и однолинейное изображение схем. Приведите примеры.
14. Приведите правила указания на схемах позиционных обозначений элементов.
15. Перечислите правила указания на схемах входных и выходных цепей.
16. Назовите и дайте характеристику основным эксплуатационным документам на изделия ЭВМ.
17. Назовите и дайте характеристику основным ремонтным документам на изделия ЭВМ.
18. Что оказывает влияние на технологичность деталей, получаемых штамповкой?
19. Назовите специфические особенности деталей, получаемых гибкой.
20. Что определяет технологичность деталей, получаемых вытяжкой?
21. Что такое усадка и как она учитывается при конструировании прессованных и литых деталей?
22. Перечислите общие требования к конструкции литых и прессованных деталей.
23. Перечислите правила конструирования литых и прессованных изделий с отверстиями.
24. Назовите основные виды и охарактеризуйте механические разъемные соединения.
25. Назовите основные виды и охарактеризуйте механические неразъемные соединения.

Тема 1.4. Конструирование ЭВМ с учетом внешних факторов

1.4.1. Тепловой баланс и тепловой режим изделий ЭВМ

В процессе эксплуатации конструкции ЭВМ могут подвергаться внутренним и внешним тепловым воздействиям положительных и отрицательных температур, источниками которых являются как элементы самой ЭВМ, так и окружающая среда или объект установки. Тепловые воздействия могут приводить к снижению надежности функционирования ЭВМ, повышая интенсивность отказов их элементов (деталей, узлов).

Для понимания задачи защиты конструкций изделий ЭВМ от тепловых воздействий необходимо рассмотреть баланс энергии, подводимой и отводимой от изделия. Соотношение полезной и рассеиваемой в виде теплоты энергии определяется *коэффициентом полезного действия* η :

$$\eta = \frac{E_{пол}}{E_{сум}} = \frac{E_{пол}}{E_{пол} + E_{наг} + E_{рас}}, \quad (1.2)$$

где $E_{пол}$ – полезная энергия;

$E_{сум}$ – подводимая к изделию энергия от источника питания;

$E_{наг}$ – энергия, затрачиваемая на нагрев элементов;

$E_{рас}$ – энергия, рассеиваемая в окружающем пространстве.

Элементы, выделяющие теплоту, называют *источниками*, поглощающие – *стоками*, а сам процесс – *теплообменом*. Конструкции изделий ЭВМ представляются в этом случае в виде системы тел с сосредоточенными многочисленными источниками и стоками теплоты. Поскольку выделение теплоты происходит в определенном объеме, то это теплорассеивающее пространство называют *нагретой зоной*. Реальная нагретая зона имеет весьма неравномерное расположение источников теплоты и ограничивается стенками корпуса (каркаса, кожуха). Таким образом, конструкцию ЭВМ при рассмотрении ее теплового режима можно представить как совокупность определенных нагретых зон различной иерархии, вложенных друг в друга. Например, для стойки ЭВМ можно выделить следующую иерархию нагретых зон: кристалл ИМС (или ЭРЭ) → корпус ИМС → плата с ИМС → блок → рама → стойка.

Температурное состояние изделия, т. е. пространственно-временное изменение его температуры в зависимости от мощности источников и стоков энергии, от физических и геометрических параметров изделия и окружающей среды, называют *тепловым режимом изделия*.

Тепловой режим изделия считается нормальным, если обеспечивается нормальный тепловой режим всех без исключения составных частей конструкции (ИМС, ЭРЭ, соединений, материалов и т. п.).

Тепловой режим отдельного элемента считается нормальным, если выполняются два условия:

- 1) температура элемента (или окружающей элемент среды) находится в пределах, определенных паспортом или техническими условиями на него, независимо от изменения температуры окружающей изделие среды;
- 2) температура элемента должна быть такой, чтобы обеспечивать его функционирование с заданной надежностью.

Тепловой режим любого электронно-вычислительного устройства можно охарактеризовать *тепловой напряженностью*, определяемой объемной или поверхностной плотностью теплового потока.

Объемная плотность теплового потока:

$$q_v = \frac{k \cdot P}{V}, \quad (1.3)$$

где $k \cdot P = P_{рас}$ – мощность рассеивания в изделии, Вт;

k – коэффициент потерь мощности ($k = 0,8...0,9$);

P – потребляемая мощность, Вт;

V – объем изделия (нагретой зоны), $дм^3$.

Поверхностная плотность теплового потока:

$$q_s = \frac{k \cdot P}{S}, \quad (1.4)$$

где S – площадь поверхности теплоотдачи, $м^2$.

Требования, предъявляемые к габаритам (объемам) конструкций современных ЭВМ, таковы, что отношение выделяемой в изделиях тепловой энергии к энергии, рассеиваемой их поверхностью теплоотдачи, постоянно увеличивается. Поэтому в настоящее время допустимый нагрев элементов по сути дела является одним из основных факторов, ограничивающих уменьшение габаритов, и возникает глобальная проблема отвода теплоты.

1.4.2. Виды теплообмена в конструкциях ЭВМ

Отвод теплоты от элементов конструкций ЭВМ может происходить за счет конвекции, излучения и теплопроводности. В реальных конструкциях присутствует теплообмен всех трех видов, протекающий по своим вполне определенным законам.

Конвекцией называется процесс теплообмена, при котором перенос теплоты от одной нагретой точки к другой осуществляется макрочастица-

ми газа или жидкости. Конвекция может быть естественной (в результате действия сил тяготения на газ или жидкость) или принудительной (вынужденной), когда перемещение газа или жидкости выполняется специальными устройствами.

Количество теплоты P_k , отдаваемое нагретым телом за счет конвекции, определяется по формуле:

$$P_k = a_k \cdot S \cdot \Delta t, \quad (1.5)$$

где a_k – коэффициент теплообмена конвекцией;

Δt – перепад температур между изотермическими поверхностями.

Коэффициент теплообмена конвекцией зависит от многих факторов:

$$a_k = f(t_c, t_{cm}, h, u, p, \nu, c, \lambda, \beta, g, \alpha, l), \quad (1.6)$$

где t_c – температура среды, К;

t_{cm} – температура стенки (поверхности кожуха, корпуса, каркаса), К;

h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К);

u – скорость движения газа (жидкости), м/с;

p – плотность среды, кг/м³;

ν – вязкость среды, м²/с;

c – теплоемкость среды, Дж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

β – коэффициент объемного расширения среды, К⁻¹;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

a – коэффициент температуропроводности газа (жидкости), м²/с;

l – размер тела, характерный для его конфигурации, м.

Излучение – перенос теплоты, основанный на способности физических тел излучать и поглощать тепловую энергию в виде электромагнитных волн. При попадании лучей на тело часть их отражается, а часть проникает внутрь тела. Глубина проникновения теплового излучения в диапазоне электромагнитных волн длиной 0,3...10,0 мкм и более незначительна. В проводниках все тепловое излучение обычно поглощается в поверхностном слое толщиной до 1 мкм, в непроводниках – порядка 1,3 мм.

Отношение отраженного излучения к падающему характеризуется *отражательной* способностью тела R , отношение поглощенного излучения к падающему – *поглощательной* способностью A . Наибольшей излучательной и наименьшей отражательной поверхностями обладают «абсолютно черные» поверхности ($R = 0, A = 1$).

Отношение излучательной способности любого тела к излучательной способности «абсолютно черного» тела при определенной температуре называют *степенью черноты тела* и обозначают ε . Мощность теплового потока, отводимого от нагретого тела с помощью излучения, может быть приблизительно оценена по следующему выражению:

$$P_{\text{л}} = a_{\text{л}} \cdot S \cdot \Delta t, \quad (1.7)$$

где $a_{\text{л}}$ – коэффициент теплообмена излучением, Вт/(м²·К);

S – площадь излучающей поверхности, м²;

Δt – перегрев поверхности излучения относительно окружающей среды, К.

Коэффициент теплообмена излучением можно оценить по следующей приближенной формуле:

$$a_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{нр}1,2} \cdot \varphi_{1,2} \cdot f(t_1, t_2), \quad (1.8)$$

где $\varepsilon_{\text{нр}1,2}$ – приведенная степень черноты поверхности двух взаимодействующих тел;

$\varphi_{1,2}$ – коэффициент облученности;

$f(t_1, t_2)$ – функция, устанавливающая связь между температурами тел 1 и 2 при излучении.

Тепловое сопротивление при излучении определяется по выражению:

$$R_{\text{тл}} = \frac{1}{(a_{\text{л}}/S)}. \quad (1.9)$$

Теплопроводность – это процесс теплообмена между находящимися в соприкосновении телами (или их частями), обусловленный взаимодействием молекул и атомов. Процесс передачи теплоты за счет теплопроводности (кондукции) возможен, если имеется градиент температуры в различных точках тела или в местах соприкосновения тел.

Тепловой поток через плоскую теплопроводящую стенку можно моделировать (рис. 1.18) процессом протекания электрического тока через резистор (метод электроанalogии).

Тепловой поток за счет теплопроводности P_T от более теплой области к более холодной описывается следующим выражением:

$$P_T = \frac{\lambda \cdot S \cdot (t_1 - t_2)}{d} = \frac{(t_1 - t_2)}{R}, \quad (1.10)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, характеризующий свойства материала стенки, Вт/(м · К);

S – площадь распространения теплового потока по стенке, м²;

t_1, t_2 – температуры поверхностей стенки, К;

d – толщина стенки, м.

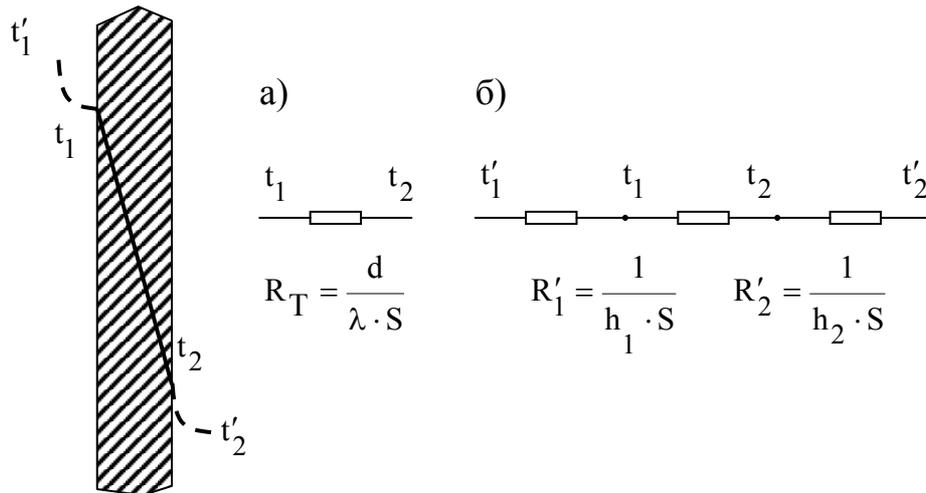


Рис. 1.18. А – модель при передаче теплоты кондукцией через плоскую стенку;
 б – эквивалентные схемы при передаче теплоты кондукцией через плоскую стенку

Отношение $\frac{d}{\lambda \cdot S} = R_T$ называется кондуктивным тепловым сопротивлением, а обратная величина $G_T = \frac{1}{R_T} = \frac{\lambda \cdot S}{d}$ – тепловой проводимостью.

Рассмотрим случай, когда тепловой поток проходит через границу раздела между двумя контактирующими (шероховатыми) поверхностями. При этом он распространяется двумя путями: один путь – через точки соприкосновения r , другой – через зазоры p (рис. 1.19).

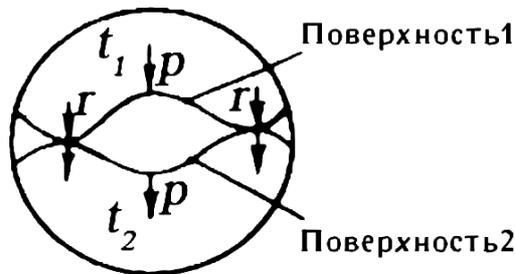


Рис. 1.19. Модель передачи теплоты между двумя шероховатыми контактирующими поверхностями

Общая теплопроводность представляет собой сумму:

$$\lambda = \lambda \cdot r + \lambda \cdot p.$$

Мощность теплового потока, передаваемого через контактную площадь S_K определяется из выражения:

$$P = \lambda \cdot S_K \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(t_1 - t_2)}{R_{T.K.}}. \quad (1.11)$$

Если информации о поверхностях раздела недостаточно, то теплопроводность непосредственного контакта можно определить как:

$$\lambda = 2 \cdot a \cdot n \cdot \lambda_m + \frac{1,56 \cdot \lambda_m}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad (1.12)$$

где γ_1, γ_2 – среднеквадратичные значения шероховатостей для поверхностей 1 и 2 соответственно;

a – средний радиус точек контакта;

n – число контактных точек на единицу площади;

λ_m – теплопроводность контактирующих материалов:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (1.13)$$

где λ_1, λ_2 – теплопроводности контактирующих поверхностей.

Для учета конвекционных потоков с двух сторон теплоотводящей стенки введем в эквивалентную схему для плоской стенки (рис. 1.18, б) два дополнительных резистора, моделирующих конвекционные потоки. Коэффициенты теплопередачи h_1 , и h_2 с обеих сторон стенки в общем случае различны и зависят от температуры охлаждающего потока и характера его протекания (ламинарный или турбулентный). Поэтому конвекционный перенос к стенке и от нее можно описать так:

$$P = \frac{t_2' - t_1}{R_2'} = \frac{t_2 - t_1'}{R_1'}. \quad (1.14)$$

В этом случае отношение $\frac{1}{h \cdot S}$ является конвективным тепловым сопротивлением.

Таким образом, для теплопроводящей стенки с учетом конвекции можно записать:

$$P = \frac{t_2' - t_1}{R_1' + R_2' + R_T}. \quad (1.15)$$

В любом случае, когда идет речь о передаче теплоты между двумя точками, имеющими температуры t_1 и t_2 , тепловой поток, аналогично закону Ома, может быть задан уравнением:

$$P = \frac{\Delta t}{R_{\text{ТСУМ}}}. \quad (1.16)$$

1.4.3. Системы охлаждения и способы обеспечения нормального теплового режима конструкций ЭВМ

Система охлаждения – совокупность устройств и конструктивных элементов, используемых для уменьшения локальных и общих перегревов. Системы охлаждения обычно классифицируют по способу передачи теплоты, виду теплоносителя и источников теплоты. В конструкциях ЭВМ применяются естественное и принудительное воздушное охлаждение, жидкостные и испарительные системы охлаждения.

При естественном воздушном охлаждении теплота от элементов конструкции передается окружающей среде за счет естественной конвекции. Использование других систем охлаждения требует введения в конструкции ЭВМ различных устройств, содержащих теплоноситель и задающих режим его движения.

Выбор способа обеспечения нормального теплового режима и системы охлаждения ЭВМ производится на ранних стадиях разработки ЭВМ и основывается на определении плотности теплового потока q_s и допустимого перегрева конструкции Δt (рис. 1.20). Если точка попадает в заштрихованные области диаграммы, то способ охлаждения уточняется на более поздних этапах конструирования.

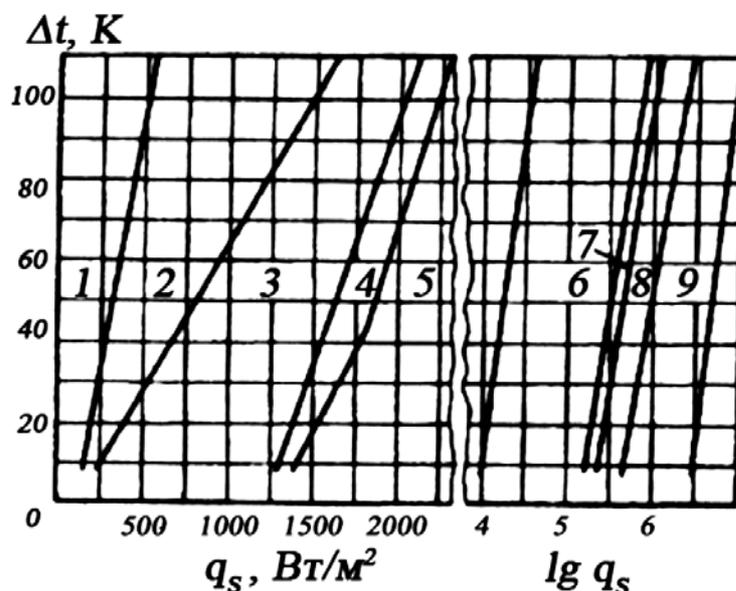


Рис. 1.20. График выбора способа охлаждения в конструкциях ЭВМ:
 1 – естественное воздушное охлаждение; 2 – естественное или принудительное воздушное охлаждение; 3 – принудительное воздушное охлаждение; 4 – смешанное воздушно-жидкостное охлаждение; 5 – жидкостное охлаждение; 6 – жидкостно-испарительное охлаждение без прокачки; 7, 8 – жидкостно-испарительное охлаждение с интенсивной прокачкой; 9 – охлаждение испарением жидкости с прокачкой

В соответствии с плотностью теплового потока узлы и блоки ЭВМ подразделяют на *теплоненагруженные* ($q_s < 0,05 \text{ Вт/см}^2$) и *теплонагруженные* ($q_s > 0,05 \text{ Вт/см}^2$). В теплоненагруженных конструкциях их нагрев при естественном охлаждении относительно температуры окружающей среды не превышает 30 К. В теплонагруженных конструкциях требуется принудительное охлаждение.

Рассмотрим подробнее конструктивные меры по обеспечению нормального теплового режима в ЭВМ и соответствующие системы охлаждения.

Естественное охлаждение. В большинстве современных конструкций ЭВМ при нормальных климатических условиях обычно около 75 % теплоты отводится за счет естественной конвекции, 15 % – за счет теплопроводности и 10 % – за счет излучения.

Чтобы отвод теплоты от элементов конструкции, находящихся внутри изделия ЭВМ, был эффективным, должна быть обеспечена хорошая теплоотдача путем теплового контакта всех теплонагруженных элементов с корпусом изделия.

Эффективность охлаждения естественной конвекцией тем выше, чем больше поверхность корпуса охлаждаемого изделия (можно увеличить за счет использования ребер) и разность температур между корпусом и окружающей средой.

Для увеличения объема охлаждающего воздуха возможно выполнение в стенках корпуса перфорационных отверстий. Печатные платы с элементами желательно размещать вертикально, а не горизонтально, чтобы не было препятствий свободному току воздуха. Платы с недостаточно теплостойкими элементами желательно размещать внизу конструкции, т. е. в зоне с наименьшей температурой.

Охлаждение естественной конвекцией воздуха неэффективно при жарком климате и низком атмосферном давлении (например, на высоте над уровнем моря свыше 5 км, в том числе и на борту летательных аппаратов) и в герметичных конструкциях. Поэтому необходимо сочетать естественное охлаждение конвекцией с охлаждением кондукцией и излучением.

Для интенсификации естественного охлаждения необходимо уменьшать:

- 1) количество выделяемой элементом теплоты, определяемое его рассеиваемой мощностью;

- 2) температуру корпуса, контактирующего с окружающей средой (воздухом);

3) тепловое сопротивление участка пути передачи теплоты от охлаждаемого элемента к корпусу.

Рекомендуется также: уменьшение пути теплопередачи; увеличение площади сечения, по которому происходит теплопередача; применение конструкционных материалов с высокой теплопроводностью; уменьшение шероховатости контактирующих поверхностей; увеличение контактного давления; применение в зазоре между контактирующими поверхностями различных теплопроводящих паст, пластических прокладок; окрашивать теплонагруженные элементы в темные цвета.

Принудительное охлаждение. В настоящее время до 90 % современных конструкций ЭВМ оборудовано системами принудительного воздушного охлаждения с использованием вентиляторов (блоков вентиляторов). Основные причины применения принудительного воздушного охлаждения в ЭВМ – наличие дешевого и доступного теплоносителя, относительная простота и надежность элементов системы охлаждения (вентиляторов, нагнетающих воздух, воздуховодов и т. п.).

На практике используются три системы принудительного воздушного охлаждения (рис. 1.21):

- приточная,
- вытяжная,
- приточно-вытяжная.

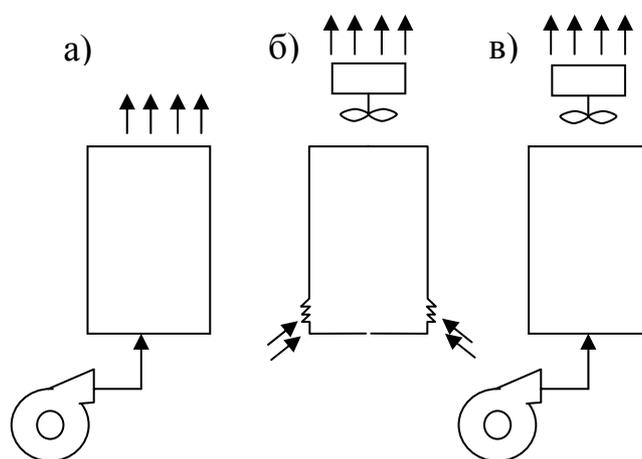


Рис. 1.21. Системы принудительного воздушного охлаждения:
а – приточная; б – вытяжная; в – приточно-вытяжная

Приточная вентиляция эффективнее вытяжной, поскольку воздух подается внутрь охлаждаемого устройства с повышенным давлением, что способствует улучшению теплоотдачи. Однако нагнетаемый воздух может

уходить через неплотности в кожухе. Повысить напор охлаждающего воздуха можно в приточно-вытяжной системе охлаждения.

Системы принудительного воздушного охлаждения, несмотря на их высокую технологичность и низкую стоимость, имеют ряд недостатков: увеличиваются объем и масса конструкций ЭВМ в целом; требуются большие затраты мощности на охлаждение; высок уровень акустических шумов и вибраций и др. Кроме того, в последние годы в связи с ростом тепловой нагрузки все чаще при конструировании, особенно ЭВМ четвертого поколения, возникают ситуации, когда принудительное воздушное охлаждение вообще не в состоянии обеспечить необходимый тепловой режим. В этих случаях более эффективно принудительное жидкостное, воздушно-жидкостное или кондуктивно-жидкостное охлаждение.

Чисто *жидкостные системы* охлаждения эффективны лишь в том случае, если обеспечивается хороший тепловой контакт между источниками теплоты и охлаждающей жидкостью (теплоносителем). Поскольку создание таких разъемных тепловых контактов достаточно сложная конструктивная задача, наиболее часто используются смешанные воздушно-жидкостные или кондуктивно-жидкостные системы охлаждения.

В *воздушно-жидкостных* системах охлаждения отвод теплоты от блоков осуществляется как поступающим в стойку от вентиляторов воздухом, так и жидким носителем (чаще водой, реже фреонами, антифризами и т. д.), протекающим по трубам к охладителям. Охладители выполняются или в виде системы параллельных трубок, расположенных под каждым охлаждаемым блоком, или в виде направляющих для типового элемента замены (ТЭЗ). Для повышения эффективности охлаждения в таких конструкциях максимально используются возможности кондуктивного переноса теплоты от ТЭЗ к жидкому носителю. Чаще применяются замкнутые системы охлаждения, использующие теплообменники, насосы и другое оборудование, позволяющее экономить теплоноситель.

В *кондуктивно-жидкостных* системах охлаждения используется принцип параллельного охлаждения, когда каждый ряд элементов конструкции (источников теплоты) и даже каждый источник теплоты охлаждается отдельно. В этом случае обеспечиваются примерно равные температуры элементов конструкции за счет приблизительно одинакового кондуктивного теплового сопротивления от охлаждаемого элемента к теплоносителю. В конструкциях бортовых ЭВМ, имеющих большую тепловую нагрузку и сравнительно малые габаритные размеры, для обеспечения нормального теплового режима конструкций очень часто применяют тепловые трубы.

Тепловая труба (рис. 1.22) представляет собой герметичный алюминиевый или стальной корпус (возможна различная форма), внутри которого помещается капиллярно-пористый фитиль, изготавливаемый из металлических и неметаллических сеток, стекла и металловолокон, металлокерамических порошковых материалов и т. п., а также жидкий теплоноситель (аммиак, вода, метанол и др.). Фитиль насыщается теплоносителем. Если на один конец тепловой трубы подается теплота, то носитель там испаряется и перемещается по трубе до тех пор, пока не конденсируется и превращается опять в жидкость в холодной части трубы. Затем за счет капиллярного эффекта теплоноситель по фитилю возвращается к горячему концу тепловой трубы. Тепловые трубы позволяют резко снижать тепловые сопротивления между охлаждаемыми элементами конструкции и окружающей средой.

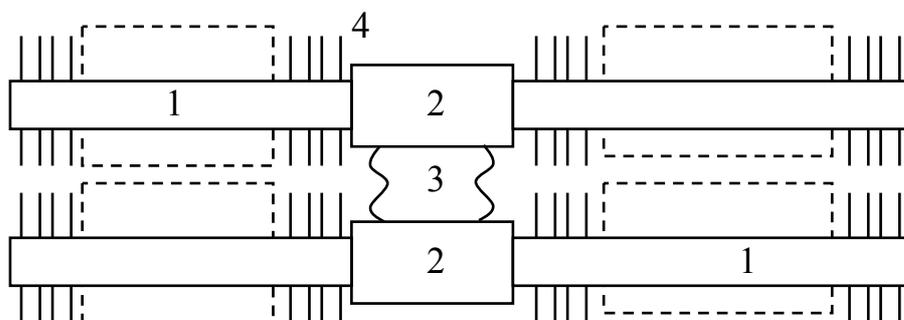


Рис 1.22. Принципиальная схема системы охлаждения тиристора с тепловой трубой
 (1 – тепловая труба; 2 – зона подвода тепла; 3 – тиристор;
 4 – оребрение в конденсационной трубе)

1.4.4. Виды механических воздействий

В процессе эксплуатации конструкции ЭВМ могут подвергаться воздействию целого ряда механических факторов: вибраций, ударов, линейных нагрузок, акустических шумов, комплексных воздействий. При этом, как показывает опыт эксплуатации, наибольшее разрушающее влияние на конструкцию оказывает различного рода вибрация.

Вибрацией называется знакопеременное воздействие механической силы, характеризуемое амплитудой (ускорением), частотой и фазой. Различают гармонические (узкополосные) и широкополосные вибрации.

Удары характеризуются кратковременным (мгновенным) воздействием механической силы на аппарат и отличаются длительностью и амплитудой.

Ударные нагрузки могут воздействовать на аппаратуру не только при ее эксплуатации на подвижных объектах, но и при транспортировании, при погрузочно-разгрузочных работах.

Вибрации и удары характеризуются направленностью приложения механической силы.

Линейные нагрузки возникают при разгоне и торможении транспортных средств, изменении направления движения.

Акустический шум – это распространяющиеся в газах, жидкостях и в материале конструкции упругие волны. Они имеют в большинстве случаев пространственный характер и также характеризуются интенсивностью и частотой. Акустические шумы возникают при работе мощных двигателей (особенно реактивных), а также из-за возникающих аэродинамических эффектов при движении самолетов или ракет в достаточно плотных слоях атмосферы.

Комплексные воздействия – это комбинация из первых четырех выше-названных. Например, может быть одновременное воздействие на изделие вибраций и ударов, вибраций и линейных нагрузок и т. д. Подобные воздействия наиболее часто встречаются в реальных условиях эксплуатации.

Частотный диапазон вибраций, воздействующих на изделия ЭВМ, может быть в пределах 0 – 7000 Гц, амплитуда вибраций может достигать 40 мм, ускорение – до 20 g (при ударах, толчках и взрывах снарядов – до 200 g), замедления – до 4 g. Величина акустического шума на частоте 30 кГц может превышать пороговый уровень на 740 – 160 дБ.

1.4.5. Реакция ЭВМ и их элементов на механические воздействия

При воздействии на ЭВМ вибраций, ударов, линейных нагрузок и акустических шумов возможно возникновение нарушений ее функционирования, которые можно разделить на восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Восстанавливаемые отказы функционирования ЭВМ, к которым относят искажение или появление в полезном сигнале большого уровня шумов и паразитную модуляцию полезного сигнала, возникают из-за тензорезистивных эффектов, пьезоэлектрических и электромагнитных явлений в элементах, обладающих способностью к проявлению подобных эффектов при знакопеременных деформационных нагрузках.

К таким элементам относят тонкопленочные резисторы на подложках микросхем, сегнетокерамические конденсаторы, полупроводниковые приборы и даже обычные проводники, колеблющиеся в магнитных полях.

Невосстанавливаемые отказы, к которым приводят различного рода обрывы и поломки, окончательно выводят изделие из строя, и ее функционирование не возобновляется после прекращения воздействия вибрации. Примерами такого рода отказов могут быть, например, разрывы дорожек печатного монтажа вибрирующей платы, разрушение паяны сварных и клеевых соединений, обрывы выводов резисторов, конденсаторов и т. д.

При воздействии на конструктивный элемент ЭВМ вибрации малого уровня возникает его динамическая упругая деформация ϵ , которую можно оценить отношением величины удлинения или укорочения элемента Δl к его исходной длине l .

При увеличении уровня вибрационной нагрузки возможно появление в конструктивном элементе из металла пластических деформаций, которые приводят к возникновению остаточных механических напряжений σ .

При больших уровнях вибрационной нагрузки возможно разрушение конструктивного элемента после некоторого количества циклов изменения нагрузки, обусловленной вибрацией.

Кроме механической ветви реакции элементов ЭВМ на механические воздействия существует и электрическая ветвь, обусловленная механическими процессами – деформацией и механическими напряжениями. Эта ветвь реакции определяет устойчивость ЭВМ к механическим воздействиям. Под *устойчивостью* понимают нормальное функционирование ЭВМ при механических воздействиях. Если ЭВМ не обладает достаточной устойчивостью, то в ее выходном сигнале могут появиться составляющие, не предусмотренные функциональным назначением. Возможно появление шумового напряжения достаточно высокого уровня. Наиболее типичными причинами нарушения устойчивости работы ЭВМ при механических воздействиях являются следующие: изменение значения переходного сопротивления в контактных группах разъемов, реле, герконов и т. д.; изменение параметров пассивных элементов (тонкопленочных резисторов, катушек индуктивности, некоторых типов конденсаторов); изменение параметров активных элементов; появление шумовых напряжений в проводниках, колеблющихся в магнитных полях; появление шумовых напряжений в кабелях за счет возникающих электрических зарядов на деформируемых при механических воздействиях высококачественных диэлектриках.

1.4.6. Способы виброзащиты конструкций ЭВМ

Известно несколько способов защиты аппаратуры от вибраций. К ним относятся:

- изменение соотношения между собственными частотами конструкций и частотами возмущающей силы;
- экранирование упругих волн источника;
- уравнивание возмущающих нагрузок механизмов;
- изоляция вибраций и применение динамических гасителей.

Применение того или иного способа уменьшения вибраций зависит от конкретных условий эксплуатации изделия ЭВМ. Сущность первого способа защиты от вибраций заключается в изменении частоты возмущающей силы, если это возможно, либо в изменении резонансной частоты конструкции относительно основной и кратных частот источника упругих колебаний. Изменение резонансной частоты конструкции можно осуществить изменением жесткости. В связи с тем, что спектр возбуждения обычно состоит из многих гармонических составляющих, резонансную частоту конструкции необходимо разместить между основными частотными составляющими источника возмущений.

Для осуществления *экранирования* упругих волн между источником вибраций и конструкцией устанавливаются экраны из материалов, отличающихся от материалов конструкции. Например, если упругие волны распространяются в эластичных средах (резина, поролон, полиуретан и др.), в качестве экрана можно использовать металлические прокладки, колпаки, цилиндры, решетки, которые приклеиваются к эластичной среде. Если колебания распространяются в металле, то экранами могут быть эластичные материалы, воздушные зазоры и щели.

Эффективность экранирования упругих волн зависит от соотношения размеров экрана и длины распространяющихся волн. Опытным путем установлено, что экранирование упругих волн начинается тогда, когда «глубина» экрана (размер, характеризующий погружение экрана в среду, в котором распространяются упругие волны) больше или равна $0,3 \lambda$.

Способ *уравнивания* возмущающих нагрузок заключается в выполнении таких конструкций, у которых центр масс лежит на оси вращения (условие равенства нулю главного вектора сил инерции), а ось вращения совпадает с главной осью инерции (условие равенства нулю главного момента сил инерции). Уравнивание возмущающих нагрузок обычно достигается добавлением противовесов или снятием излишнего материала.

Способ *изоляции* вибрации заключается в том, что между изолируемой конструкцией и основанием устанавливаются амортизаторы. Изоляция вибраций является наиболее универсальным и наиболее распространенным способом защиты конструкции ЭВМ от вибраций и ударов.

1.4.7. Движение радиоэлектронного блока на амортизаторах при воздействии вибраций

При изучении данного явления сделаем следующие допущения:

- 1) амортизатор рассматривается как линейная демпфированная механическая колебательная система с одной степенью свободы (под «степенью свободы» подразумевается возможность перемещения или колебания тела в направлении или вокруг какой-нибудь оси координат);
- 2) на амортизатор действует сила, направленная вдоль его оси;
- 3) демпфирование за счет внутреннего поглощения энергии в материале амортизатора не оказывает существенного влияния на его эффективность;
- 4) учитывается только вязкое демпфирование.

При этих допущениях движение тела, установленного на пружинном амортизаторе (рис. 1.23), описывается известным дифференциальным уравнением:

$$mz'' + K_y x = 0, \quad (1.17)$$

- где m – масса тела;
 z'' – абсолютное перемещение тела;
 y – переносное движение тела;
 x – относительное перемещение тела;
 K_y – упругость амортизатора.

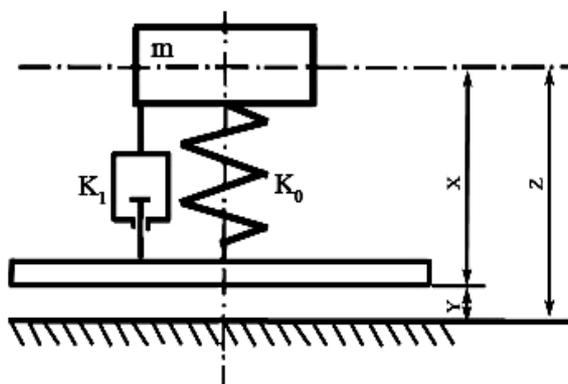


Рис. 1.23. Тело m , установленное на амортизаторе

Учитывая, что $z = y + x$, имеем:

$$m(y'' + x'') + K_y = 0.$$

Если возбуждающая сила вызывает гармоническое движение тела, то для переносного движения тела будем иметь:

$$y = A \sin \omega t, \quad (1.18)$$

где A – амплитуда;

ω – частота возмущающей силы.

Значение y'' будет равно:

$$y'' = -A\omega^2 \sin \omega t. \quad (1.19)$$

Относительное колебание тела x в формуле (1.19) можно записать в виде:

$$x = A_0 \sin \omega t, \quad (1.20)$$

где A_0 – амплитуда относительных колебаний.

Тогда значение x'' будет равно:

$$x'' = -A_0\omega^2 \sin \omega t. \quad (1.21)$$

После подстановки (1.18), (1.21) в выражение: $z = y + x$ и с учетом x'' и y'' имеем:

$$z = (A_0 + A) \sin \omega t, \quad (1.22)$$

$$z'' = -\omega^2(A_0 + A) \sin \omega t. \quad (1.23)$$

Учитывая, что

$$\frac{K_y}{m} = \omega_0^2, \quad (1.24)$$

где ω_0 – собственная частота колебаний тела, установленного на амортизаторе, можно записать:

$$A_0 = \frac{A\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (1.25)$$

Тогда (1.23) можно записать в следующем виде:

$$z = A \left(1 + \frac{A\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \sin \omega t. \quad (1.26)$$

Анализ приведенного выражения позволяет сделать следующие выводы:

1. Если $\omega_0 = \omega$, наблюдается резонанс системы, величина z стремится к бесконечности (теоретически).

2. Если частота возбуждения мала по сравнению с частотой собственных колебаний, т. е. при $\omega < \omega_0$ амплитуда и соответственно перегрузки тела на амортизаторе будут больше, чем у тела, жестко установленного на основании, без амортизатора. Это явление наблюдается при:

$$\frac{\omega}{\omega_0} > \frac{1}{1,42} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Следовательно, при известной частоте возбуждения, собственная частота нагруженного амортизатора должна быть меньше частоты возбуждения по крайней мере в $\sqrt{2}$ раза, т. е. должно выполняться следующее условие:

$$\frac{\omega}{\omega_0} \geq \sqrt{2}.$$

При $\omega/\omega_0 > 5$ эффективность виброизоляции увеличивается незначительно, поэтому отношение ω/ω_0 обычно выбирают в пределах 2,5...5.

Следует отметить, что эффективность виброизоляции зависит от степени демпфирования.

Коэффициент демпфирования K_δ связан с частотой собственных колебаний ω_0 , массой m и коэффициентом вязкого трения h_m следующей формулой:

$$K_\delta = \frac{h_m}{2m\omega_0}. \quad (1.27)$$

После подстановки (1.28) в (1.27) имеем:

$$z = A \left[1 + \frac{\omega^2}{\left(\frac{h_T}{2mK_\delta} \right)^2 - \omega^2} \right] \sin \omega t. \quad (1.28)$$

Из (1.30) видно, что чем больше K_δ , тем больше амплитуда амортизируемого тела.

Таким образом, демпфирование оказывает невыгодное влияние на изоляцию вибраций. Однако уровень демпфирования оказывает существенное влияние на эффективность амортизации только вблизи резонансных частот, т. е. при $\omega / \omega_0 = 1$. При $\omega / \omega_0 > \sqrt{2}$ влияние демпфирования менее заметно.

Этот вывод можно распространять только на стационарные установки, которые подвержены влиянию возмущений гармонического характера. Если система работает в условиях толчков или ударов, частота внешних воздействий не является постоянной. В этой системе появляются переходные процессы, сопровождающиеся свободными колебаниями.

При малом демпфировании свободные колебания могут существовать длительное время и вызывать нежелательные вибрации. В этих случаях необходимо увеличивать уровень демпфирования амортизируемой системы.

1.4.8. Оценка виброзащищенности радиоаппаратуры

Для защиты аппаратуры от механических воздействий используются различные амортизаторы, поглощающие энергию колебательной системы или энергию удара. Амортизаторами могут быть специальные устройства, упругие прокладки, композиционные материалы, вязкоупругие полимерные и армированные материалы.

В общем случае блок, закрепленный на амортизаторах, может иметь 6 степеней свободы и соответственно 6 резонансных частот (три за счет перемещения вдоль осей x , y , z и три за счет вращения). При известных значениях ω и ω_0 , пользуясь номограммой (рис. 1.24) для демпфированной амортизирующей системы, можно оценить степень эффективности амортизатора η (т. е. отношение амплитуд колебаний блока к амплитуде колебаний основания).

Коэффициент виброизоляции η прибора определяется отношением амплитуды колебаний прибора на амортизаторе к амплитуде вибросмещения основания, на котором установлен амортизатор.

Обычно блок имеет форму, аналогичную показанной на рис. 1.25. Данная система может возбуждаться на пяти частотах. Зная величину жесткости и нагрузку на амортизатор, можно определить значение статического прогиба амортизатора σ и f_0 по номограмме.

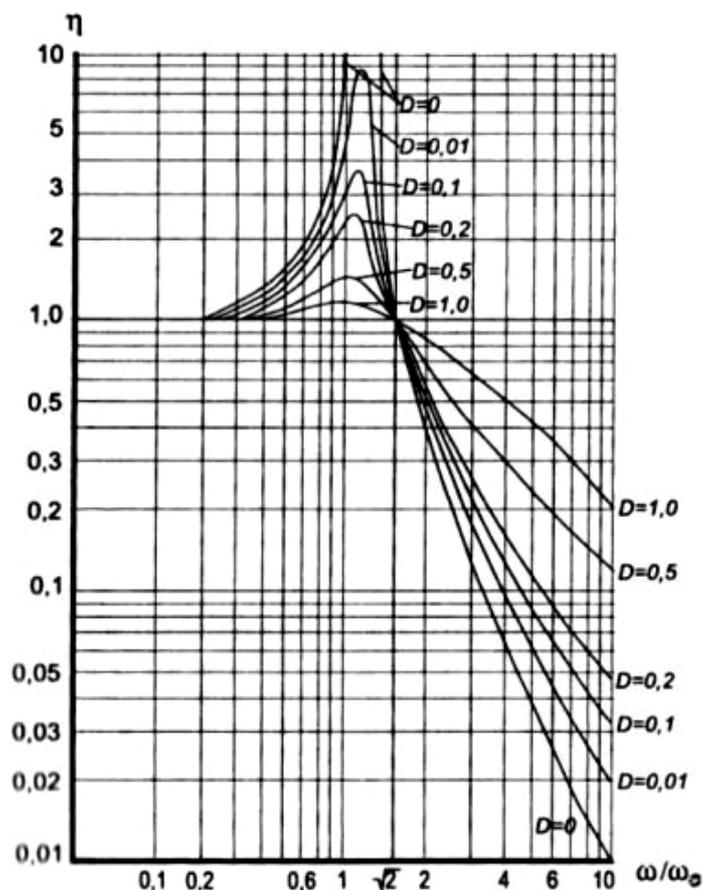


Рис. 1.24. Зависимость коэффициента виброизоляции амортизируемого прибора от соотношения ω/ω_0 при различных значениях демпфирования

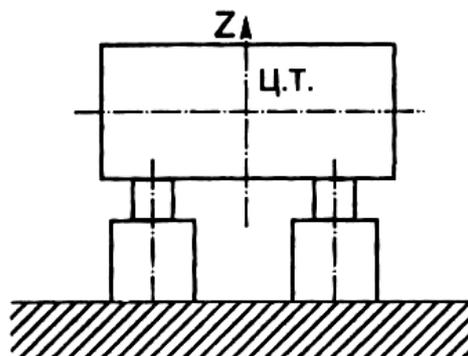


Рис. 1.25. Вертикальное расположение прибора с симметричным расположением центра тяжести относительно боковых поверхностей

Если амортизаторы нельзя установить симметрично центру тяжести (рис. 1.25), то их нагруженность вычисляется по следующим формулам.

1-й амортизатор:

$$P_1^1 = \frac{P(l_1 - l_2)(b_1 - b_2)}{l_1 b_1}, \quad (1.29)$$

2-й амортизатор:

$$P_2^1 = \frac{Pl_2(b_1 - b_2)}{l_1 b_1}, \quad (1.30)$$

3-й амортизатор:

$$P_3^1 = \frac{P(l_1 - l_2)b_2}{l_1 b_1}, \quad (1.31)$$

4-й амортизатор:

$$P_4^1 = \frac{Pl_2 b_2}{l_1 b_1}, \quad (1.32)$$

где $P_1^1, P_2^1, P_3^1, P_4^1$ – нагрузки на амортизаторы;

P – вес блока;

l_1, l_2, l_3, l_4 – расстояние между амортизаторами блока и координаты его центра тяжести относительно амортизаторов.

Защищенность аппаратуры от ударов можно оценить по номограмме рис. 1.27. Данная номограмма по максимальной скорости объекта v и значению собственной резонансной частоты f_0 позволяет определить ускорение s , получаемое аппаратом в момент удара. По величине этого ускорения и максимальной скорости объекта можно оценить максимальную деформацию амортизатора σ_{\max} , значит и пригодность его для заданных условий. Из этой номограммы видно, что амортизатор с частотой f_0 , равной 10 Гц, удовлетворительно защищающий аппаратуру от вибраций, при ударе со скоростью 1,6 м/с передает блоку ударную перегрузку 10 г, которой соответствует деформация 25 мм, и непригоден в качестве элемента, защищающего аппарат от ударов данной величины. В этом случае ищут компромиссное решение или используют амортизаторы из различных элементов, один из которых обеспечивает низкое значение резонансной частоты для защиты от вибраций (пружина), а другой – высокое значение (демпфер) для ударов.

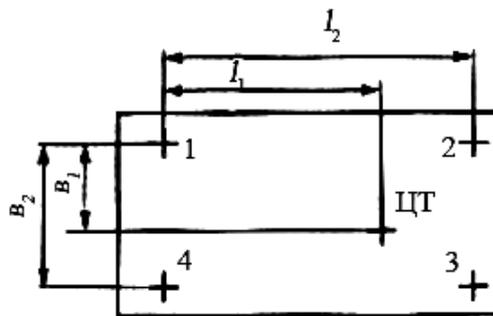


Рис. 1.26. К расчету нагруженности несимметрично расположенных относительно центра тяжести амортизаторов

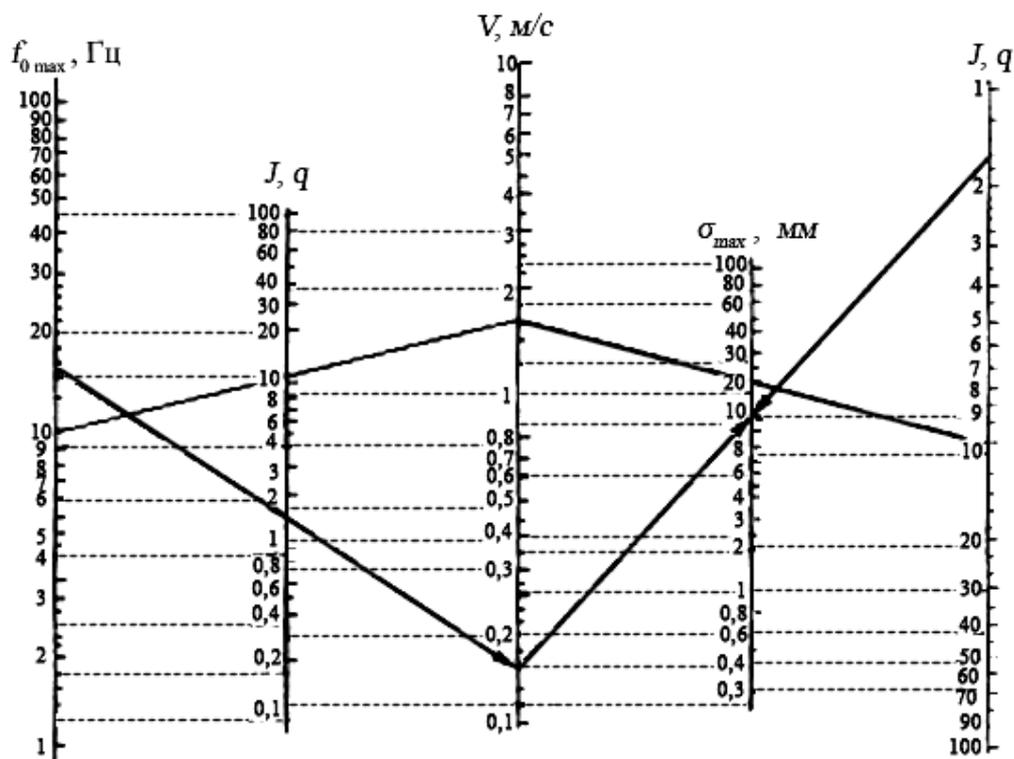


Рис. 1.27. Диаграмма для расчета параметров аппарата и амортизаторов при ударной нагрузке

Некоторые преимущества имеют разночастотные амортизаторы. Их основным элементом является конусная пружина, которая при перегрузке осаживается, часть витков выключается и жесткость возрастает. Таким способом можно автоматически поддерживать $f_{рез}$ вдоль оси пружины примерно постоянной, поэтому их можно применять для блоков с несимметричным расположением центра тяжести. При этом значительно сокращается номенклатура амортизаторов. Например, от 0,25 до 16 кг достаточно только три их номера. Значение $f_{рез}$ таких амортизаторов около 7 Гц.

К материалам для пружинных амортизаторов предъявляются весьма высокие требования. Они должны обладать устойчивыми упругими свойствами, достаточной прочностью, большим сопротивлением к ударным нагрузкам и большими пластическими деформациями. Для изготовления амортизаторов применяют специальные марки легированных сталей. На прочность и упругие свойства стали влияет ее химический состав. Содержание в стали углерода, легирующих примесей (например, марганца, кремния, хрома, никеля, ванадия и вольфрама в определенных количествах) повышает механические свойства стали, делает ее более упругой и прочной. Легирующие примеси повышают эффективность процессов термообработки. Ванадий и вольфрам добавляются в материал температуростойких амортизаторов.

Материал для пружинных амортизаторов выбирается с учетом условий эксплуатации, продолжительности и величины нагрузки, цикличности во времени, состояния окружающей среды, климатических факторов и т. д. На выбор марки стали влияют также технологические факторы, например, возможность термообработки и др.

Наибольшее распространение в пружинных амортизаторах получили марганцевые и кремнистые стали. Они относительно дешевые, не дефицитные и хорошо поддаются термообработке, что обеспечивает получение необходимых механических параметров.

Наилучшими по своим механическим свойствам являются кремнистые и вольфрамокремнистые стали с содержанием углерода 0,55 – 0,60 % и кремния 2 %.

Механические свойства амортизатора в сильной степени зависят от состояния поверхности материала. Поверхность должна быть гладкой, без закатов, раковин, штрихов и других дефектов, видимых глазом.

На усталостную прочность амортизатора и его сопротивление при ударной нагрузке отрицательно влияет обезуглероживание поверхностного слоя, получающегося при термической обработке.

Большие пределы усталости наблюдаются у образцов с полированной поверхностью, например, хромованадиевые стали.

1.4.9. Определение собственных частот колебаний печатных плат

Собственную частоту колебаний печатной платы при различных способах ее закрепления (табл. 1.4), можно определить по формуле:

$$\omega_{01} = \frac{\alpha_1}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_э + m_{пл}}}, \quad (1.33)$$

где ω_{01} – основная частота колебаний платы;

α_1 – коэффициент, зависящий от способа закрепления платы;

a – длина платы;

D – цилиндрическая жесткость платы (жесткость материала платы при изгибе):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)},$$

E – модуль упругости материала платы;

h – толщина платы;

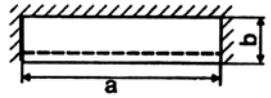
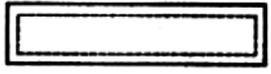
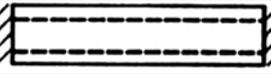
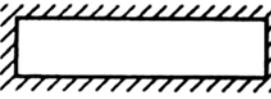
σ – коэффициент Пуассона;

$m_э$ – масса элементов, установленных на плате;

$m_{пл}$ – масса платы.

Для стеклотекстолита $E = 3,02 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $\sigma = 0,22$.

Основные способы закрепления плат

Способ закрепления платы	Формулы для вычисления коэффициента α_1
	$22,372 \cdot \sqrt{1 + 0,549 \cdot \beta^2 + 0,475 \cdot \beta^4}$
	$9,87 \cdot (1 + \beta)$
	$22,37 \cdot \sqrt{1 + 0,48 \cdot \beta^2 + 0,19 \cdot \beta^4}$
	$22,37 \cdot \sqrt{1 + 0,61 \cdot \beta^2 + \beta^4}$
	$9,87 \cdot \sqrt{1 + 2,57 \cdot \beta^2 + 5,14 \cdot \beta^4}$
	$15,42 \cdot \sqrt{1 + 1,19 \cdot \beta^2 + 2,1 \cdot \beta^4}$
<p>--- сторона платы свободно опертая  сторона платы жестко закреплена</p>	

Цилиндрическая жесткость платы – жесткость платы при изгибе. Модуль упругости материала платы характеризует упругие свойства той части платы, которая закреплена и участвует в колебаниях. Модуль упругости определяется отношением механической силы к поверхности платы. Коэффициент Пуассона определяется отношением модуля упругости к коэффициенту упругости.

1.4.10. Причины возникновения помех в ЭВМ

Помехой для изделия ЭВМ является внешнее или внутреннее воздействие, приводящее к искажению дискретной информации во время ее хранения, преобразования, обработки или передачи.

Основные причины возникновения помех:

1) Энергетический уровень информационных сигналов. Он имеет тенденцию к уменьшению (повышение частоты и снижение перепада напряжений). Энергетический уровень внешних помех непрерывно увеличивается, что обусловлено ростом энерговооруженности промышленности.

2) Увеличение взаимного влияния элементов из-за уменьшения габаритных размеров активных элементов и линий связи между ними и увеличение 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 ЭВМ во все сферы человеческой деятельности.

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

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

1.4.11. Помехи при соединении элементов ЭВМ

Электрические связи между элементами в ЭВМ выполняются различными способами в виде печатных и навесных проводников. При группировке элементов по узлам образуются связи, которые делятся на электрически «короткие» и электрически «длинные».

«Короткие» – линии связи, время распространения сигнала в которых много меньше значения переднего фронта передаваемого по линии импульса (в пределах ячеек и модулей). Сигнал, отраженный от несогласованных нагрузок в этой линии связи, достигает источника раньше, чем успевает существенно измениться входной импульс. Свойства такой линии описываются сосредоточенными сопротивлениями, емкостью и индуктивностью.

Индуктивный характер сигнальной линии связи рассчитывается по эквивалентной схеме (рис. 1.28). Задержка сигнала определяется выражением:

$$\tau_3 \approx 0,7\tau = 0,7 \frac{L}{R_{вх2}}.$$

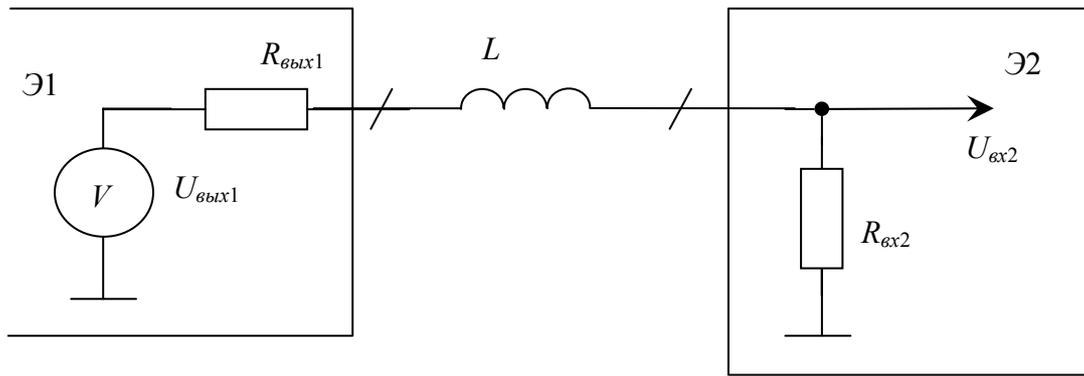


Рис. 1.28. Схема сигнальной линии индуктивного характера

Для уменьшения задержки необходимо уменьшить индуктивность линии и увеличить входное сопротивление элементов. Индуктивность линии зависит от типа используемых проводников, их сечения и длины. В существующих ЭВМ используются элементы, время переключения (задержки) которых составляет единицы и доли наносекунд. Желательно, чтобы задержки, вносимые линиями связи, составляли малую, в худшем случае соизмеримую, часть от времени переключения элементов.

Емкостной характер сигнальной линии рассчитывается по эквивалентной схеме (рис. 1.29). Время задержки определяется из выражения:

$$\tau \approx CR_{\text{вых1}}.$$

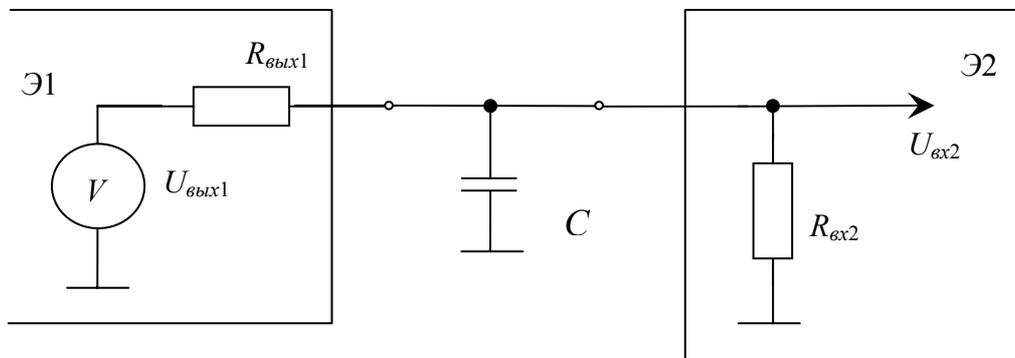


Рис. 1.29. Эквивалентная схема сигнальной линии емкостного характера

Чтобы обеспечить устойчивую работу элементов, необходимо уменьшить длину цепей связи, амплитуды токов, увеличить порог срабатывания элементов, фронт передаваемых импульсов, расстояние между проводниками связей.

В общем случае в цепи приемника наводки возникают как емкостные, так и индуктивные помехи. При этом емкостная наводка изменяет потенциал всей линии связи, а индуктивная создает разность потенциалов между входом и выходом линии.

«Длинная» линия связи характеризуется временем распространения сигнала, которое много больше фронта импульса (соединения внутри субблоков, блоков, панелей, внутривстроенные, межстоечные для ЭВМ). 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. Количество «длинных» линий имеет тенденцию к росту.

Электрически «длинную» линию (ДЛ) при расчетах схем рассматривают как однородную линию с распределенной емкостью C_0 и индуктивностью L_0 . Переходные процессы в таких линиях зависят от характера перепада напряжения $U_{вх}$ на входе линии и соотношения волнового сопротивления линии Z_0 , выходного сопротивления Z_2 генератора импульсов и входного сопротивления Z_n нагруженного на конец линии элемента.

Линию, в которой $Z_n = Z_0$, называют *согласованной*. В ней не происходит отражения сигнала от сопротивления нагрузки. Если $Z_n \neq Z_0$, линию называют *несогласованной*. При этом наблюдается отражение сигнала от конца линии связи. Процесс поочередного отражения волны напряжения от обоих концов «длинной» линии 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. Аналогичные явления происходят и для волны тока. Отражения волн напряжения и тока могут быть не только от несогласованных нагрузок на концах «длинной» линии, но и от различных неоднородностей в ней самой (например, от границы раздела двух участков линии с различными значениями волнового сопротивления).

Любой канал может быть как источником, так и приемником помех. Если два канала связи имеют взаимную паразитную связь, то и наводки возникают в обоих каналах взаимно. В реальных условиях на каналы связи могут воздействовать не один, а несколько источников помех с различными видами паразитной связи. Так как цепи паразитных связей в большинстве случаев являются линейными, то на основе принципа суперпозиции влияние каждого вида паразитной связи и источника помехи можно рассматривать отдельно. Суммарное значение помехи может быть получено в виде суммы векторов токов или напряжений.

1.4.12. Методы снижения паразитных связей

Для снижения наводок необходимо устранять или ослаблять до допустимых значений паразитные связи. В первую очередь ослабление паразитных связей должно производиться прямым уменьшением $C_{нар}$, $L_{нар}$, $M_{нар}$ и $Z_{общ}$.

Способы уменьшения паразитных связей:

- размещение вероятных источников и приемников наводок на максимально возможном расстоянии друг от друга;
- уменьшение габаритов токонесущих элементов, обеспечивающих минимум паразитной связи (для получения минимальной взаимной индуктивности катушек индуктивности их оси должны быть взаимноперпендикулярны);
- сведение к минимуму общих сопротивлений;
- изъятие посторонних проводов, проходящих через несколько узлов или блоков, которые могут связать элементы, расположенные достаточно далеко друг от друга;
- при невозможности исключения посторонних проводов, создающих паразитную связь, необходимо позаботиться о том, чтобы при емкостной паразитной связи сопротивление постороннего провода относительно корпуса было минимальным, при индуктивной паразитной связи необходимо увеличивать внутреннее сопротивление посторонней линии связи, в последнюю очередь установить экраны и развязывающие фильтры. Экранирование – это локализация электромагнитной энергии в пределах определенного пространства путем преграждения ее распространения. Развязывающий фильтр – это устройство, ограничивающее распространение помехи по проводам, являющимся общими для источника и приемника наводки.

Введение экранов часто требует существенного изменения компоновки, конструкции, а иногда и габаритных размеров изделия, поэтому конструктор должен ясно понимать физическое действие каждой детали экрана, влияние любого элемента конструкции на значение паразитных связей. Необходимо совмещать элементы экранов с элементами несущей конструкции.

Подавление емкостных паразитных связей. Емкостная паразитная связь между двумя электрическими цепями возникает через ближнее электрическое поле. Для снижения паразитной емкости между электрическими цепями вводится токопроводящий экран, соединенный с общим проводом и замыкающий на общий провод большую часть электрических силовых линий.

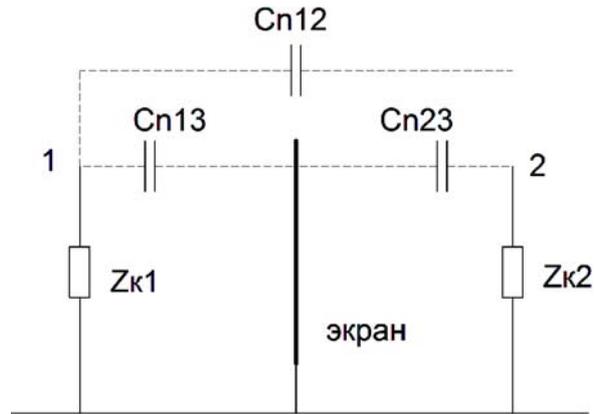


Рис. 1.30. Принципиальная схема экранирования

Введением экрана (рис. 1.30), имеющего сопротивление, равное нулю относительно общего провода, теоретически наводку можно снизить до нуля. Практически же всегда из-за наличия проводников и технологических отверстий и возникновения краевых эффектов имеется остаточное ближнее электрическое поле, следовательно, остаточная емкость.

Эффективность экранирования определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{U_{n.n12}}{U'_{n.n12}} = \frac{C_{n12}}{C'_{n12}}. \quad (1.34)$$

При экранировании электрического поля очень важно создать низкое сопротивление экрана относительно корпуса (общего провода). Появление любого сопротивления, особенно индуктивного, в цепи соединения экрана с общим проводом создает эффект паразитной связи через посторонний провод, поэтому все металлические элементы конструкции тщательно соединяются между собой и общим проводом.

Подавление индуктивных паразитных связей. Паразитная индуктивная связь возникает между электрическими цепями через ближнее магнитное поле. Для снижения магнитных полей используют два вида экранирования:

- магнитостатическое,
- динамическое.

Магнитостатическое экранирование или экранирование шунтированием магнитного поля основано на применении экранов из ферромагнитных материалов с большой магнитной проницаемостью. Линии магнитного поля втягиваются в материал с более высокой магнитной проницаемостью, в результате внутри экрана поле ослабляется. Эффективность магнитостатического экранирования зависит от магнитного сопротивления экрана:

$$\mathcal{E} = 1 + \frac{\mu h}{D}, \quad (1.35)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость;
 h – толщина стенок экрана;
 D – диаметр эквивалентного сферического экрана.

Эффективность магнитоэкранирования не зависит от частоты в тех пределах, в которых от частоты не зависит магнитная проницаемость материала экрана. Эффективность экранирования снижается при наличии в конструкции экрана стыков и швов, идущих поперек линий магнитного поля и снижающих эффективное значение магнитной проницаемости экрана. Магнитоэкранирование имеет невысокую эффективность: $\mathcal{E} = 2 - 5$, им пользуются на низких частотах, на которых мала эффективность динамического экранирования.

Физический смысл *динамического* экранирования заключается в том, что переменное магнитное поле ослабляется по мере проникновения в металл с малым электрическим сопротивлением (медь, алюминий и т. д.), т. к. внутренние слои экранируются вихревыми токами, возникающими в слоях, расположенных ближе к поверхности. Экранирующее действие вихревых токов определяется двумя факторами: обратным полем, создаваемым токами, протекающими в экране, и поверхностным эффектом в материале экрана.

Можно определить минимальную толщину стенок экрана, обеспечивающего эффективность экранирования не ниже заданной величины:

$$h \geq \delta \ln(2\mathcal{E}).$$

Экранирование проводов и катушек индуктивности. При экранировании реальных элементов, например трансформаторов, катушек индуктивности, проводов, обычно требуется одновременное экранирование от электрических и магнитных полей. Желательно в качестве электрических и магнитных экранов использовать одни и те же элементы конструкции, но при этом следует учитывать, что они действуют по-разному.

Получаемая эффективность экранирования обычно меньше рассчитанной за счет паразитной связи, возникающей из-за проводов, выходящих из экранируемого пространства, и при наличии отверстий в экранах. Чтобы снижение эффективности было минимальным, отверстия для выводов должны быть расположены таким образом, чтобы не мешали вихревым токам: отверстия и вырезы в экране необходимо делать вытянутыми вдоль направления вихревых токов.

Для полного экранирования проводов от электрических и магнитных полей необходимо добиваться, чтобы весь обратный ток протекал по экрану, т. е. чтобы токи, протекающие по экранируемому проводу и экрану, были равны между собой. Для этого необходимо выводы генератора и нагрузки подключать к проводу и экрану непосредственно без промежуточных проводников, а соединение с корпусом производить в одной точке, лучше со стороны приемника сигнала.

1.4.13. Методы защиты от помех

Электрическое соединение логических и других элементов ЭВМ осуществляется по двум видам связи: сигнальной и цепям питания. По сигнальным связям информация передается в виде импульсов напряжения и токов. Шины питания служат для подведения энергии к элементам от низковольтных источников постоянного напряжения. При использовании одного источника напряжения питание к элементам подводится с помощью двух проводников: прямого и обратного.

Часто на элементы необходимо подавать напряжение от нескольких источников с разными номиналами. В этом случае для уменьшения количества шин питания обратные проводники объединяют в одну шину, которую соединяют с корпусом устройства и называют «земля». В статическом состоянии по цепям питания протекают токи, вызывающие падение напряжения на элементах. Необходимо, чтобы это падение напряжения составляло малую часть от номинала источника напряжения. Если задаться значением максимально допустимой помехи, возникающей при потреблении элементами энергии в статическом состоянии, то можно установить требования к допустимому значению сопротивления шины питания, а отсюда и к геометрии шины. Поясним это на примере цепочки элементов, последовательно подключенных к шине «земля» (рис. 1.31).

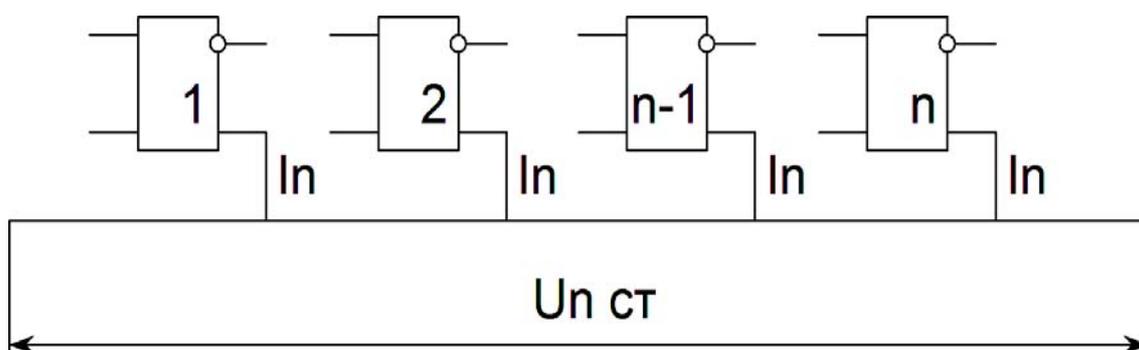


Рис. 1.31. Принципиальная схема

В наихудшем «режиме» по помехозащищенности на шине питания находится i -тый элемент, так как его реальная статическая помехозащищенность уменьшена по сравнению с номинальной на значение падения напряжения на шине «земля» относительно точки ее присоединения к источнику питания $U_{ист}$. Величину $U_{ист}$ можно оценить, пользуясь эквивалентной схемой (рис. 1.32).

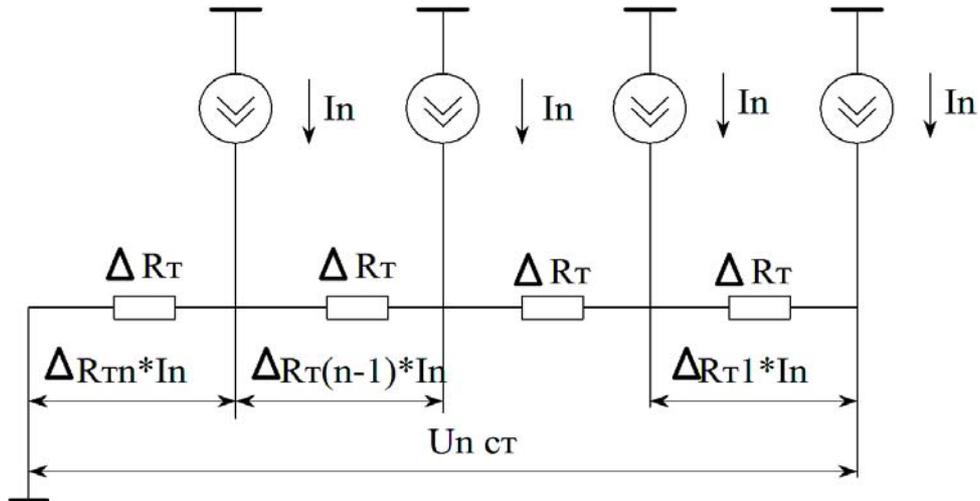


Рис. 1.32. Схема замещения

Обозначая через R_t сопротивление участка шины питания между двумя расположенными рядом элементами, а через I_n – ток потребления одним элементом, можно определить допустимое сопротивление шины питания из выражения:

$$\Delta R_{t \text{ доп}} \leq \frac{2U_{\text{п.ст}}}{[I_{\text{п}}(n+1)n]}. \quad (1.36)$$

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 наводкам. Для шины питания большого устройства (стойки) изменение тока в ней незначительно, так как для этой шины в любой момент времени число включенных элементов можно считать одинаковым.

Иное происходит в шинах питания, подводящих энергию к более мелким устройствам (регистрам, счетчикам, блокам формирователей). В этом случае переключение элементов (сброс в «0» регистра или запуск блока формирователей) приводит к значительному изменению тока потребления от источника напряжения. Так как шины питания имеют паразитную емкость и индуктивную связь с сигнальными шинами, то при переключении элементов на сигнальных связях наводятся большие помехи. При определенных условиях эти помехи могут вызывать ложное срабатывание схем.

Кроме того, изменение тока в шине питания приводит к возникновению в ней переходного процесса. Переходной 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. Задавшись допустимым значением импульсного сигнала помехи

на входе элемента (из-за помех по цепям питания $U_{пом.дин}$), можно определить максимально допустимое значение индуктивности шины питания:

$$\Delta L_T \leq \frac{2U_{пом.дин}\tau_\phi}{[I_\pi(n+1)n]}, \quad (1.37)$$

где τ_ϕ – фронт импульсов переключения.

Индивидуальные сглаживающие конденсаторы (ИСК) устанавливаются между шинами питания и «земля» непосредственно возле точек присоединения электронной схемы к этим шинам. Будучи заряженными до значения источника напряжения, ИСК являются как бы индивидуальными источниками питания схемы, максимально приближенными к ней физически.

В аппаратуре используются два вида ИСК: устанавливаемые непосредственно у каждой микросхемы и устанавливаемые на группу микросхем в пределах одной ячейки или модуля. Первый тип предназначен для «сглаживания» импульсных помех в момент переключения микросхемы за счет локализации цепи протекания бросков тока в цепи микросхема – ИСК. В качестве ИСК используют обычно обладающие малой собственной индуктивностью керамические конденсаторы (К 10 – 9). Емкость ИСК – $C_{иск}$ 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:

$$C_{иск} > \frac{\Delta I_\pi \tau_\phi}{2U_{ип}}, \quad (1.38)$$

$$\Delta I_\pi = k \cdot I_k, \quad (1.39)$$

где ΔI_π – максимальное значение переменной составляющей тока потребления;

I_k – выходной ток короткого замыкания микросхемы;

k – коэффициент, значение которого зависит от типа схемы (например, для схем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) $k = 0,33$);

$U_{ип}$ – допустимая импульсная помеха на шине питания.

Второй тип ИСК, 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 емкости этого типа проводят, используя выражение:

$$C_{пит} > \frac{4L_{пит}}{R_{пит}^2}, \quad (1.40)$$

где $L_{пит}$, $R_{пит}$ – индуктивность и сопротивление шин питания.

1.4.14. Способы защиты конструкций ЭВМ от агрессивной внешней среды. Покрытия

Действие климатических факторов на конструкционные материалы проявляется, главным образом, в ускорении коррозионных процессов, потере механических и диэлектрических свойств, изменении электропроводности. В связи с этим принимают необходимые меры по обеспечению надежной защиты конструкций ЭВМ от воздействия влаги, температурных колебаний, солнечной радиации, атмосферного давления, осадков, пыли, плесневых грибов и т. п.

Уменьшение влияния указанных воздействий на блоки, сборочные единицы и детали может быть обеспечено следующими мероприятиями:

- разработкой конструкций с применением материалов, не изменяющих своих свойств в условиях эксплуатации (нержавеющие стали, бронзы, титановые сплавы, специальные пластмассы и т. п.);
- полной изоляцией узла, блока или сборочной единицы от внешней среды (герметизации) путем заливки, обволакивания и заключения их в герметизированный корпус;
- покрытием (пропиткой) отдельных узлов и деталей специальными смолами, лаками, металлами или их оксидами для снижения вредного воздействия климатических факторов.

Защита деталей ЭВМ от внешних воздействий может быть осуществлена следующими методами:

- а) негальваническими (металлических и неметаллических);
- б) химическими;
- в) гальваническими.

Негальванические покрытия. К *металлическим* покрытиям относятся: вакуумное испарение практически любым металлом и почти на любые подложки (толщина слоя зависит от скорости и времени испарения вещества); катодное распыление (перенос металла с катода на анод при тлеющем разряде в газах); горячее распыление (расплавленный металл распыляется сжатым газом, толщина пленки от 30 мкм до нескольких миллиметров), которым можно нанести любое металлическое покрытие на поверхность любого материала. К *неметаллическим* покрытиям относятся лакокрасочные, защищающие поверхность детали от коррозии, одновременно придавая ей соответствующий цвет и блеск. Наносятся кистью, распылением или окунанием и применяются для окраски корпусов, кожухов, панелей, шкал и т. д. Основой лакокрасочного покрытия является органическое

пленкообразующее вещество и пигмент. Лакокрасочное покрытие долговечнее металлического, однако его не следует применять для деталей, подвергающихся значительным механическим и химическим воздействиям (вибрация, изгиб, пайка, сварка). Перед нанесением покрытия поверхности металлических элементов обрабатывают по 4...6 классам.

Химические покрытия. К ним относятся оксидирование, пассивирование, фосфатирование, азотирование, анодирование.

Оксидирование бывает щелочное, бесщелочное и химическое. Щелочное оксидирование выполняется в горячих концентрированных растворах щелочей в присутствии различных окислителей (температура процесса 140 – 145 °С, время выдержки 60 – 90 мин в зависимости от процентного содержания углерода в стали). Бесщелочное (кислотное) оксидирование стальных деталей образует защитную пленку порядка 15 мкм из фосфатов кальция и оксидов железа. Химическое оксидирование алюминия и его сплавов ведут в растворах, содержащих щелочь и хроматы щелочных металлов. Оксидирование меди и ее сплавов происходит в щелочно-сульфатных растворах.

Пассивированием называется образование очень тонких оксидных пленок на цветных металлах с участием оксидов хрома. Пассивирование производят в подкисленном растворе хромпика.

Фосфатирование является химической реакцией, при которой происходит кристаллизация фосфатов на поверхности, причем в реакции участвует металл основания.

Азотирование состоит в насыщении поверхности стальных деталей азотом в потоке аммиака при температуре 500 – 650 °С.

Анодированием называется процесс образования оксидной пленки на поверхности алюминия и его сплавов в электролитах под действием тока. Это покрытие применяется для защиты от коррозии, для создания электроизоляционной пленки и повышения износостойчивости поверхностного слоя. Анодированные изделия могут окрашиваться в любой цвет органическими и специальными красителями.

Гальванические покрытия. Толщина покрытия выбирается в зависимости от материала покрытия: для бронзового, кадмиевого, латунного, никелевого, серебряного, хромового составляет от 1 до 60 мкм, для золотого, палладиевого, платинового и родиевого – от 0,25 до 12 мкм.

Никелевое покрытие характеризуется хорошими антикоррозионными свойствами. На черные металлы оно наносится обычно на подслое меди или никеля. В этом случае толщина покрытия составляет 0,5 – 0,6 мкм.

Цинковое покрытие имеет сравнительно низкие твердость и стойкость в атмосфере, насыщенной морскими испарениями. Применяется для черных металлов. Слой цинка выдерживает вальцовку и гибку, но плохо поддается сварке и пайке.

Кадмиевое покрытие устойчиво в морской воде. Защитные свойства кадмия, как и цинка, зависят от толщины покрытия, которая составляет 10 – 20 мкм. Кадмиевое покрытие по меди хорошо поддается пайке и применяется в условиях тропического климата.

Серебрение применяют для защитных целей, улучшения электропроводности и облегчения пайки, уменьшения переходного сопротивления контактируемых поверхностей. Серебрению подвергаются детали из меди и ее сплавов.

Золочение характеризуется высокой химической стойкостью в условиях повышенной влажности и агрессивных средах. Применяется для ответственных контактных деталей, изготовленных из меди и ее сплавов. Это покрытие очень мягкое. Для повышения твердости применяют золочение с добавкой 0,17 % никеля.

Родирование используется для защиты от коррозии ответственных наружных деталей, для предохранения от потускнения серебряных и никелевых покрытий. Эти покрытия обладают высокой твердостью, отражательной способностью и не окисляются на воздухе до 1100 °С.

1.4.15. Защита герметизацией

Герметизация является одним из наиболее эффективных методов защиты от климатических факторов. Она может быть полной или частичной.

Частичной герметизации подвергаются наименее стойкие к внешним воздействиям детали и узлы (например, трансформаторы, дроссели и др.). При этом кожух не является герметизирующим элементом. Основные методы частичной герметизации: пропитка, обволакивание, заливка. Основные электроизоляционные материалы: пропиточные лаки, компаунды, покровные лаки и эмали.

Пропитка заключается в заполнении пор, трещин, пустот в изоляционных материалах, промежутков между конструктивными элементами узлов электроизоляционными негигроскопичными материалами. Пропитке подвергаются многие детали и узлы ЭВМ, изготавливаемые из волокнистых электроизоляционных материалов, являющихся пористыми и гигроскопичными. К таким узлам относятся намоточные изделия, каркасы катушек и др. Одновременно с повышением влагозащиты при пропитке достигается повышение механической прочности, нагревостойкости, диэлектрической прочности, теплопроводности и химической стойкости.

Заливка заключается в заполнении диэлектриком свободного промежутка между заливаемым изделием и стенками кожуха или заливочной формы.

Обволакивание – процесс покрытия изделия пленкой только снаружи. Нанесенный слой удерживается на поверхности в результате адгезии, которой должны обладать материалы, применяемые для обволакивания.

Полная герметизация достигается применением защитных корпусов из металла, керамики и других материалов. Она весьма эффективна для аппаратуры, устанавливаемой на летательных аппаратах. В этих случаях полная герметизация предохраняет не только от действия влаги и пониженного давления, но и исключает возможность электрического пробоя.

Полная герметизация может осуществляться следующими способами: сваркой основания и корпуса блока; паяным демонтируемым соединением корпуса (основания) с крышкой (кожухом) блока; уплотнительной прокладкой. Выбор способа герметизации определяется требованиями, предъявляемыми к блокам в зависимости от условий эксплуатации, габарита (объема) блока, материалов, используемых в корпусе и в основании блока.

Герметизацию с помощью *сварки* применяют для блоков, объем которых не превышает $0,5 \text{ дм}^3$ и не подлежащих ремонту. Вскрытие таких блоков возможно только с помощью механического снятия сварного шва, что влечет за собой обязательное попадание металлической пыли на бескорпусные элементы и соответственно их отказ. Этот способ герметизации широко используется для герметизации корпусов ИС и микросборок и обеспечивает степень натекания $V_n = 10^{-9} \text{ л} \cdot \text{мкм} / \text{с}$.

Герметизация с помощью *паяного демонтируемого соединения* применяется для блоков, объем которых лежит в пределах $0,5 - 5 \text{ дм}^3$. Этот способ обеспечивает степень натекания $V_n = 10^{-6} \text{ л} \cdot \text{мкм} / \text{с}$, что гарантирует работоспособность блока.

Герметизация с помощью *уплотнительных прокладок* (резина, отожженная красная медь, алюминий, свинец) применяется для блоков, объем которых превышает 3 дм^3 . Блоки меньших объемов герметизировать данным способом нецелесообразно из-за больших потерь на элементы крепления. Способ обеспечивает скорость натекания $V_n = 10^{-3} \text{ л} \cdot \text{мкм} / \text{с}$.

Вопросы для самопроверки по теме 1.4

1. Дайте определение теплового режима изделия, отдельного элемента.
2. Приведите характеристики теплового режима ЭВМ.
3. Назовите виды теплообмена в конструкциях ЭВМ.
4. Охарактеризуйте конвективный теплообмен в изделиях ЭВМ.

5. Охарактеризуйте теплообмен излучением в изделиях ЭВМ.
6. Охарактеризуйте теплообмен теплопроводностью в изделиях ЭВМ.
7. Дайте определение и назовите виды применяемых систем охлаждения электронных систем.
8. Охарактеризуйте естественное воздушное охлаждение изделий ЭВМ.
9. Охарактеризуйте принудительное воздушное охлаждение изделий ЭВМ.
10. Дайте характеристику жидкостных, воздушно-жидкостных, кондуктивно-жидкостных систем охлаждения.
11. Назовите особенности применения тепловых труб для охлаждения изделий ЭВМ.
12. Перечислите и охарактеризуйте механические факторы, воздействующие на изделия ЭВМ в процессе эксплуатации.
13. Перечислите виды реакций конструкций ЭВМ на механические воздействия.
14. Перечислите способы виброзащиты конструкций ЭВМ.
15. Назовите коэффициент демпфирования. В чем заключается его влияние на изоляцию вибраций?
16. Как проводят оценку виброзащищенности аппаратуры?
17. Дайте оценку защищенности аппаратуры от ударов.
18. Назовите виды амортизаторов и их основные характеристики.
19. Как определяют собственную частоту колебаний печатных плат?
20. Причины возникновения помех в изделиях ЭВМ.
21. Перечислите виды линий связи в конструкциях ЭВМ.
22. Назовите особенности конструирования «коротких» линий связи.
23. Перечислите рекомендации по конструированию «длинных» линий связи.
24. Охарактеризуйте согласованные и несогласованные линии связи.
25. Перечислите способы уменьшения паразитных связей в конструкциях ЭВМ.
26. Перечислите особенности обеспечения помехозащищенности устройств ЭВМ по цепям питания.
27. Перечислите мероприятия, обеспечивающие защиту конструкции ЭВМ от воздействия вредных климатических факторов.
28. Охарактеризуйте негальванические покрытия.
29. Перечислите и дайте характеристику химических покрытий.
30. Перечислите и дайте характеристику гальванических покрытий.
31. Назовите виды и особенности применения частичной герметизации.
32. Назовите виды и особенности применения полной герметизации.

БЛОК 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Тема 2.1. Основы методологии автоматизированного проектирования

2.1.1. Необходимость применения и сущность САПР

Постоянное ужесточение требований к ЭВМ по точности, помехозащищенности, чувствительности, надежности ведет к значительному усложнению изделий и, в конечном счете, – к возникновению противоречия между требованиями к ЭВМ и конкретным производственным возможностям их удовлетворения. Чем сложнее изделие, тем более трудоемка его разработка (сроки разработки увеличиваются), увеличивается вероятность получения негативного результата (быстрое моральное старение изделия, при длительной разработке изделие может устареть до окончания его разработки).

Снижение сроков разработки изделий ЭВМ достигается 2 путями:

- увеличение количества разработчиков;
- применение автоматизированного проектирования.

Первый путь влечет следующие недостатки: количество специалистов ограничено, уменьшается удельная производительность труда, снижается эффективность управления процессом проектирования и производства, увеличивается стоимость разработки, увеличивается число ошибок в проекте (добавляются ошибки согласования между отдельными частями проекта).

Для избавления разработчиков от значительного объема «нетворческой» работы при проектировании ЭВМ используют автоматизацию проектирования (АПР), т. к. имеется возможность формального математического описания некоторых конструкторских задач и их унификация, уровень развития современных ЭВС позволяет создавать САПР.

При применении АПР происходит разделение сфер деятельности между человеком (инженером) и ЭВМ.

Инженеру остаются такие виды деятельности, как:

- принятие решений и инженерное творчество;
- осмысление целей, проблем и содержания проекта;
- постановка задач проектирования;
- выбор критериев оценок при решении задач;
- выбор наилучшего решения и т. п.

Основные задачи конструирования изделий ЭВМ, достаточно легко решаемые автоматизированным способом:

- оптимальное проектирование топологии и фотошаблонов ИМС, микросборок и печатных плат;
 - проектирование проводного монтажа;
 - компоновка (размещение) различных модулей низшего иерархического уровня в модули высшего иерархического уровня (например, ИМС на печатные узлы, ячеек в панели и т. д.);
 - выпуск графической и текстовой конструкторской документации.
- Преимущества применения АПР:

- сокращение трудоемкости и сроков разработки конструкций ЭВМ;
- повышение производительности труда инженеров в проектных организациях;
- улучшение качества и технологического уровня изделий ЭВМ;
- снижение стоимости разработки;
- уменьшение количества разработчиков;
- использование уже готовых правильных решений (из баз данных);
- использование новейших достижений (облегчение обмена информацией между базами + Internet...).

Система автоматизированного проектирования (САПР) – комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователем системы), выполняющей автоматизированное проектирование.

САПР – организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств автоматизированного проектирования, связанных с подразделениями проектных организаций, и выполняющая автоматизированное проектирование.

САПР – инструмент проектирования, включающий различные обеспечения и предназначенный для автоматизированного проектирования на всех этапах от выдачи ТЗ до выпуска готового изделия.

Основная функция САПР – выполнение автоматизированного проектирования на всех или отдельных стадиях проектирования объектов и их составных частей.

В сфере производства ЭВМ можно выделить следующие системы автоматизации труда:

- автоматизированные системы научных исследований;
- системы автоматизированного проектирования;
- автоматизированные системы ТПП;
- автоматизированные системы управления производством;
- автоматизированные системы комплексных испытаний.

2.1.2. Классификация и архитектура САПР

Существующие САПР можно проклассифицировать:

- а) по типу объекта проектирования:
 - САПР изделий машиностроения;
 - САПР изделий приборостроения;
 - САПР технологических процессов в машино- и приборостроении;
 - САПР программных САПР объектов строительства;
 - САПР технологических процессов в строительстве;
 - САПР организационных систем.
- б) по сложности объекта проектирования:
 - простых объектов с числом составных частей до 10^2 ;
 - объектов средней сложности ($10^2 - 10^3$);
 - сложных объектов ($10^3 - 10^4$);
 - очень сложных объектов ($10^4 - 10^6$);
 - объектов очень высокой сложности (число составных частей свыше 10^6).
- в) по уровню автоматизации проектирования:
 - низкоавтоматизированные (до 25 % проектных процедур);
 - среднеавтоматизированные (25 – 50 %);
 - высокоавтоматизированные (свыше 50 %).
- г) по комплексности автоматизации проектирования:
 - одноэтапные;
 - многоэтапные;
 - комплексные (все этапы).
- д) по характеру выпускаемых проектных документов (САПР, выпускающих документы):
 - на бумажной ленте и (или) листе;
 - на машинных носителях;
 - на фотоносителях (в виде микрофильмов, микрофиш, фотошаблонов и др.);
 - комбинированные (выполняют документы на двух носителях данных или более).

Согласно ГОСТ 2.2487-77 можно выделить следующие составные части САПР (обеспечения):

- 1) математическое,
- 2) программное,
- 3) лингвистическое,

- 4) информационное,
- 5) методическое,
- 6) организационное,
- 7) техническое.

1 – 4 – программно-информационное

5, 6 – организационно-методическое.

Математическое обеспечение САПР – это совокупность математических методов, моделей и алгоритмов проектирования, необходимых для его выполнения.

В настоящее время для АПР ЭВМ широко применяются:

- модели и алгоритмы разбиения схем на подсхемы меньшей сложности,
- алгоритмы размещения конструктивных модулей (перестановки, силовые и др.),
- алгоритмы разводки (трассировки) межсоединений различного уровня и т. д.

Программное обеспечение (ПО) САПР – совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для выполнения АПР и представленных в заданной форме.

Различают: общесистемное ПО (обеспечивает ввод, вывод и определение информации в процессе функционирования САПР); специальное (прикладное) ПО.

В специальном ПО реализуются методы автоматизированного проектирования. Оно определяет специализацию системы, характер и степень использования ЭВМ в процессе конструирования, обеспечивают возможность модернизации и перестройки конкретной САПР.

Для подготовки и использования программных средств необходимо лингвистическое обеспечение.

Лингвистическое обеспечение САПР – это совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка и методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для автоматизации проектирования.

Выделяют :

- а) языки программирования;
- б) языки проектирования;
- в) языки управления.

Информационное обеспечение (ИО) САПР – совокупность сведений, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования в заданной форме.

Основная функция ИО – обеспечение создания, поддержки и организации доступа к данным.

Методическое обеспечение САПР – комплект документов, устанавливающих состав и правила отбора и эксплуатации средств обеспечения проектирования.

Оно включает методические материалы по САПР, позволяющие проводить единую техническую политику по автоматизации проектирования на межотраслевом, отраслевом уровнях, уровне предприятия и т. д.

Организационное обеспечение САПР – комплект документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, форму представления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов.

Техническое обеспечение САПР включает универсальные и специализированные технические средства электронно-вычислительной техники для автоматизации процессов проектирования, изготовления и контроля.

К универсальным техническим средствам относятся средства обработки информации, т. е. ЭВМ, средства ввода-вывода информации (принтеры, сканеры, плоттеры, графопостроители, манипуляторы, кодировщики и т. п.).

К специализированным техническим средствам САПР относят:

- автоматизированные рабочие места (АРМ) (за рубежом используется термин «рабочая станция»);
- пункты выпуска документации;
- автоматизированные средства для изготовления и контроля конструкций ЭВМ (современные САПР позволяют кроме КД изготавливать макеты проектируемых устройств, ПО для ГАП и т. п.).

2.1.3. Основные требования и принципы создания САПР

Необходимым и достаточным условием создания САПР на предприятии является количественный или качественный выигрыш от ее применения с учетом дополнительных затрат, которые она вызывает.

САПР должна иметь возможности (*требования*):

- последовательного расширения, совершенствования системы;
- активной связи специалист – система;
- оперирования оптимальными взаимозаменяемыми алгоритмами;
- специализацию системы на проектирование (ЭА, РЭА, ИМС);
- увеличения мощности системы;
- легкой настраиваемости;

- стыковки со специальными устройствами;
- изменения критериев оптимизации;
- расширения и дополнения библиотек программ;
- свободного доступа к данным на всех этапах проектирования;
- изготовления КД и ТД.

2.1.4. Определение и состав математического обеспечения САПР

Основу МО САПР составляет математический аппарат для моделирования, анализа и оптимизации. В МО САПР выделяют специальную и инвариантную часть. *Специальная* часть отображает специфику объекта проектирования, физические и информационные особенности его функционирования. Она тесно привязана к этапам проектирования.

Инвариантная часть включает методы и алгоритмы, слабосвязанные с особенностями математических моделей и используется на различных этапах проектирования. Основу инвариантной части в первую очередь составляют методы параметрического синтеза и многовариационного анализа.

К МО САПР предъявляют требования:

- универсальность;
- алгоритмическая надежность;
- точность;
- затраты машинного времени (минимальные);
- используемая память.

Под универсальностью МО понимается его применимость к широкому классу проектируемых объектов. Высокая степень универсальности МО необходима для того, чтобы САПР была применима к большинству объектов, проектируемых на предприятии. Степень универсальности не имеет количественной оценки. Если методы и модели сформулированы интуитивно, то они называются эвристическими.

Свойство компонента МО давать при его применении правильные результаты называется алгоритмической надежностью. Количественной оценкой алгоритмической надежности служит вероятность получения правильных результатов при соблюдении оговоренных ограничений на применение метода.

Точность определяется по степени совпадения расчетных и истинных результатов. Оценка точности производится с помощью специальных вычислительных экспериментов, в которых создаются условия отдельной оценки погрешностей, вносимых математическими моделями элементов,

алгоритмами анализа и оптимизации. В этих экспериментах используются специальные задачи (тестовые). Количественная оценка погрешности результата решения тестовой задачи есть одна из нормалей вектора относительных погрешностей.

Универсальные модели и методы характеризуются большим объемом вычислений, растущих с ростом размерности решаемых задач.

Затраты машинного времени являются главным ограничивающим фактором при повышении сложности проектируемых на ЭВМ объектов.

Требования высокой степени универсальности, алгоритмической надежности, точности с одной стороны и малых затрат машинного времени с другой – основное противоречие при создании МО САПР. Поэтому при создании САПР целесообразно использовать библиотеки с наборами моделей и методов, перекрывающих потребности всех пользователей САПР.

Затраты используемой памяти являются вторым фактором (после затрат машинного времени) экономическим показателем САПР. Она определяется объемом программы и используемых массивов.

Несмотря на значительный объем памяти в современных ЭВМ требования по экономичным затратам памяти остаются актуальными, т. к. современные системы работают в мультипрограммном режиме, и задачи с большим запросом объема памяти получают более низкий приоритет.

2.1.5. Методы повышения эффективности МО САПР

Увеличение эффективности САПР может быть достигнуто следующими путями:

- разработкой экономичных моделей и алгоритмов, имеющих частный характер;
- совершенствованием используемых общих принципов создания МО, эффективного по затратам машинного времени и памяти.

К таким принципам относятся:

- учет разреженности матриц;
- исследование сложных систем по частям;
- макро моделирование;
- событийность анализа;
- рациональное использование эвристических способностей человека в интерактивных (диалог) процедурах.

Учет разреженности матриц позволяет во многих алгоритмах, в которых используются операции над матрицами, добиться существенного сокращения затрат времени и памяти. Так как в памяти ЭВМ хранят только ненулевые элементы матриц и выполняют арифметические действия только над ними.

Сильно разреженными матрицами при проектировании ЭА являются:

- а) матрицы коэффициентов систем разностных уравнений при анализе полупроводниковых компонентов электронных схем;
- б) матрицы Якоби – в математических моделях электронных схем;
- в) матрицы смежности и инцидентности в задачах компоновки, трассировки и размещения.

Если учитывать разреженность матриц, то затраты времени и памяти можно сделать линейно зависимыми от показателя сложности анализируемого объекта (если нет – то квадратичная либо кубическая зависимость).

Исследование сложных систем по частям реализуется в диаконтических методах исследования. Диаконтические методы исследования отличаются от блочно-иерархических использованием структурных особенностей исследуемых схем и выражающих их матриц. Принятие упрощений производится расчленением математических моделей на части, которые исследуются самостоятельно.

Макромоделирование связано с рациональным выбором математической модели. Оно реализует возможность системы использовать при анализе одного и того же объекта несколько моделей, различающихся сложностью, точностью и полнотой отображения объекта. Экономическая эффективность системы повышается путем деления схемы на более крупные блоки с использованием для них макромоделей.

Событийность анализа заключается в том, что при имитации процессов, протекающих в исследуемом объекте в каждый отдельный момент времени, вычисления производятся только для небольшой части математической модели объекта. Эта часть включает в себя те элементы, состояние которых на данном временном шаге может измениться.

Использование данного принципа повышает экономичность анализа на функциональном, системном и логическом этапах проектирования.

Рациональное использование эвристических способностей человека в интерактивных процедурах позволяет инженеру вмешиваться в ход вычислений и выбирать наиболее перспективные продолжения на основе эвристических оценок. Процедура наиболее эффективна на этапе конструкторского проектирования.

2.1.6. Формальное описание коммутационных схем. Основные модели представления коммутационной схемы в памяти ЭВМ

Любая коммутационная схема электронной аппаратуры состоит из набора элементов, заданным образом соединенных между собой. Поэтому схему можно представить как некоторое подмножество элементов X :

$$X = \{x_1, x_2 \dots x_n\},$$

соединенных между собой цепями из множества E :

$$E = \{e_1, e_2 \dots e_m\}.$$

Представляя гиперграф $H(X, E)$ матрицей инцидентности получаем удобную форму представления схемы в памяти ЭВМ.

Электрическую схему задают в виде матрицы цепей:

$$T = \left\| t_{ij} \right\|_{n \times m}.$$

Строки матрицы T соответствуют элементам схемы, а столбцы – контактам элементов. Если в схеме имеются элементы с различным числом контактов (наиболее часто встречается), то в качестве m принимается число контактов элементов с максимальным числом контактов. Пример матриц приведен на рис. 2.1.

Рассмотрим основные модели представления коммутационных схем в памяти ЭВМ.

Модель 1.

Схема строится в виде мультиграфа $G(X, U)$, где X – множество элементов схемы, U – множество ребер, каждое из которых соответствует соединению между i -тым и j -тым элементами схемы.

Обычно модель представляется в ЭВМ в виде матрицы смежности.

Характеристики модели:

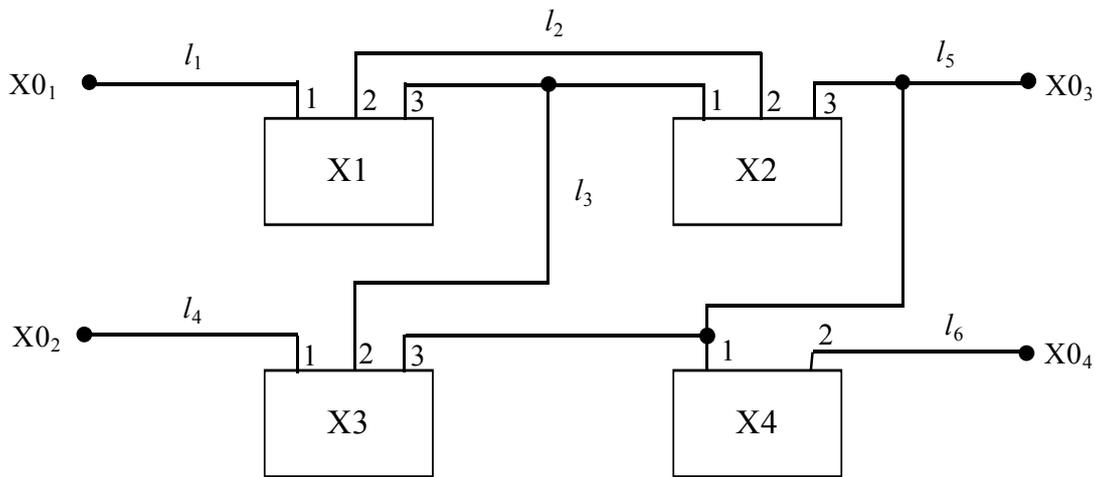
1. Модель широко используется при решении задач компоновки и размещения.

2. Описание данной модели обладает избыточностью, т. к. число ребер, инцидентных отдельным вершинам модели оказывается больше фактического осуществления трассировки.

3. Алгоритм обработки достаточно прост.

4. Переход от объекта к модели достаточно прост.

5. Недостаток: требуется значительный объем памяти, пропорциональный квадрату числа элементов схемы.



	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
X_0	1	2	3	1	2	3
X_1	1	2	3			
X_2				1	2	3
X_3				1	2	3
X_4						

$$B = \begin{matrix} & l_1 & l_2 & l_3 & l_4 & l_5 & l_6 \\ \begin{matrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

	1	2	3	4
X_0	l_1	l_4	l_5	0
X_1	l_1	l_2	l_3	0
X_2	l_3	l_2	l_5	0
X_3	l_4	l_3	l_5	0
X_4	l_5	l_6	0	0

Рис. 2.1. Пример схемы и матрицы цепей

Модель 2.

Вершины графа $G(X, U)$ сопоставляются выводам элементов, а соединения между ними – ребрам. Модель применяется для решения задач трассировки. Ее характеристики аналогичны характеристикам модели 1.

Модель 3.

Электрическая схема представляется гиперграфом, который в памяти ЭВМ представляется матрицей инцидентности.

Характеристики модели:

1. Обычно используется при компоновке и размещении элементов.
2. Позволяет достаточно точно определить основные конструктивные параметры устройства.
3. Установление однозначности объекта и модели не вызывает затруднений.
4. Недостатки: алгоритмы обработки модели достаточно сложны.
5. Требуется большой объем памяти ЭВМ.

Модель 4.

Для построения модели необходимо пронумеровать все цепи схемы. Вершины модельного графа сопоставляются элементам схемы. Выводы контактов элементов и цепи нумеруются. Исходными данными для ввода является матрица цепей.

Характеристики модели:

1. Универсальна.
2. Обладает достаточной степенью детализации и позволяет точно описать объект.
3. Объем памяти значительно меньше, чем у моделей 1 – 3.
4. Недостатки: алгоритмы обработки достаточно сложны (сложнее чем у моделей 1 и 2).
5. Переход от объекта к модели достаточно сложен.

2.1.7. Математическая модель монтажного пространства

Монтажным пространством элементов конструкций называется некоторая область, ограниченная габаритами этих элементов.

В монтажном пространстве данного модуля (рис.2.2) размещаются элементы низшего иерархического уровня и осуществляется их электрическое соединение. Двумерное монтажное пространство называется монтажным полем.

Различают регулярное и нерегулярное монтажное поле (МП). Регулярное МП имеет прямоугольную форму и равные по размеру элементы, расположенные с равным шагом по горизонтали и вертикали. Нерегулярное МП характеризуется тем, что элементы имеют разные размеры и не имеют точно определенных посадочных мест.

Минимальный размер ячейки определяется выражением:

$$\delta \geq h + 2s,$$

где h – ширина проводника,

s – минимальное расстояние между проводниками.

Общее число дискретных ячеек:

$$N = n \cdot m.$$

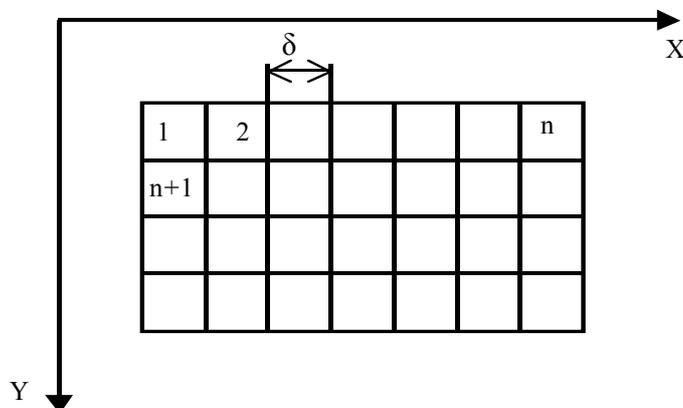


Рис. 2.2. Модель монтажного пространства

Место любого i -того дискрета на монтажном поле однозначно может быть указано его координатами (x_i, y_i) в системе дискретных координат, либо индексом I , значение которого через координаты x_i и y_i выражается следующим образом:

$$i = x_i + (y_i - 1) \cdot n.$$

В зависимости от того, проходит ли через текущий дискрет проводник, либо в каком направлении проходит этот проводник, можно рассматривать некоторое конечное множество состояний каждого дискрета. Каждому дискрету можно поставить в соответствие некоторое число, код.

Машинным эквивалентом дискретного монтажного поля может служить некоторый двумерный массив $B(X, Y)$, значения каждого элемента которого соответствуют состоянию дискрета с координатами X, Y .

Уменьшая шаг координатной сетки δ , можно с какой угодно точностью описать монтажную плату. Однако при значительно уменьшающемся размере дискрета увеличивается объем памяти.

Аналогично можно поставить в соответствие каждой ячейке вершину графа. Тогда модель можно описать графом $G(X, U)$, вершины которого соответствуют вершинам дискретов, а ребра – отображают связи между дискретами.

Модель монтажного пространства описывается также матрицей расстояний:

$$D = \left\| d_{ij} \right\|_{n \times m},$$

где
$$d_{ij} = \begin{cases} L_{ij}, & \text{если } x_i, x_j \text{ – смежные} \\ 0, & \text{если – нет} \end{cases},$$

L_{ij} – длина ребра.

2.1.8. Компоновка типовых элементов конструкции

Модульный метод проектирования предусматривает расчленение электронной аппаратуры на отдельные конструктивно законченные единицы (модули) различных уровней: стойки, блоки, субблоки, функциональные узлы.

При разработке конструкции электронной аппаратуры (ЭА) необходимо распределить элементы схемы (модулей предыдущего уровня) по коммутационным платам (коммутационным пространствам) данного уровня иерархии.

При ее решении основным *критерием оптимальности компоновки* модулей является минимизация числа межмодульных связей, что необходимо для повышения надежности схем (за счет уменьшения числа разъемных соединений), уменьшения влияния наводок и времени задержки сигнала в цепях (вследствие минимизации суммарной длины соединений), упрощения конструкции и повышения технологичности разрабатываемого устройства.

Электрическую схему интерпретируют ненаправленным мультиграфом $G(X, U)$, в котором каждому конструктивному элементу (модулю) ставят в соответствие вершину мультиграфа X , а электрическим связям схемы - его ребра U . Требуется «разрезать» его на отдельные куски $G_1(X_1, U_1)$, $G_2(X_2, U_2), \dots, G_k(X_k, U_k)$ так, чтобы число ребер, соединяющих эти куски, было минимальным, т. е.:

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k U_{ij}, i \neq j,$$

где U_{ij} – множество ребер, соединяющих куски $G_i(X_i, U_i)$ и $G_j(X_j, U_j)$.

Конструктивные ограничения в задачах компоновки:

- число кусков разрезания графа k ;
- число вершин в каждом из кусков графа (определяется числом конструктивных элементов, которые необходимо разместить на коммутационной плате, пластине БИС, подложке БГИС и т. д.);
- максимальное число внешних связей каждого отдельно взятого куска графа (определяется количеством контактов используемого разъема, числом выводов стандартного корпуса БИС или БГИС);
- требование на отдельную компоновку отдельных вершин в различных кусках графа (обусловлено конструктивными соображениями и условиями электромагнитной совместимости).

Алгоритмы компоновки можно классифицировать:

1). Алгоритмы, использующие методы целочисленного программирования. Для устройства реальной сложности фактически не реализуемы на ЭВМ.

2). Последовательные алгоритмы. При использовании последовательных алгоритмов сначала по определенному правилу выбирают первую вершину графа, затем осуществляют последовательный выбор вершин (из числа нераспределенных) и присоединение их к формируемому куску графа. После образования первого куска переходят ко второму и т. д. до получения желаемого разрезания исходного графа.

3). Итерационные алгоритмы. В них начальное разрезание графа на куски выполняют произвольным образом; оптимизация компоновки достигается парными или групповыми перестановками вершин графа из различных кусков. Процесс перераспределения вершин заканчивают при получении локального экстремума целевой функции, удовлетворяющего требованиям разработчика.

4). Смешанные алгоритмы. Для получения начального варианта «разрезания» используется алгоритм последовательного формирования кусков; дальнейшая оптимизация решения осуществляется перераспределением вершин между отдельными кусками графа.

5). Алгоритмы, основанные на методе ветвей и границ. Метод ветвей и границ сводится к последовательному разбиению множества допустимых планов задачи целочисленного программирования L на подмножества. Процесс разбиения продолжается до тех пор, пока каждое подмножество не будет представлять собой точку в многомерном пространстве. Процесс последовательного сечения исходного множества решений L гиперплоскостями представляет собой построение дерева ветвлений с соответствующими подмножествами. Чтобы уменьшить объем перебора, производят оценку образуемых подмножеств по наибольшему (наименьшему) значению для задач максимизации (минимизации) целевой функции. Это позволяет на каждом шаге исключать из рассмотрения те подмножества, для которых ожидаемое значение целевой функции оказывается наихудшим.

Чуть подробнее рассмотрим *последовательный алгоритм*: «разрезание» исходного графа $G(X, U)$ на куски $G_i(X_i, U_i)$ сводится к следующему. В графе $G(X, U)$ находят вершину $x_i \in X$ с минимальной локальной степенью ρ :

$$\rho(x_i) = \min_{x_j \in X} \rho(x_j).$$

Число ребер инцидентных некоторой вершине x_i , называется степенью вершины. Из подмножества вершин, смежных с вершинами формируемого куска графа $G_i(X_i, U_i)$, выбирают ту, которая обеспечивает минимальное приращение связей куска с еще нераспределенными вершинами. Данную вершину x_j включают в $G_i(X_i, U_i)$, если не происходит нарушения ограничения по числу внешних связей куска.

Указанный процесс продолжается до тех пор, пока множество X_i не будет содержать n элементов либо присоединение очередной нераспределенной вершины x_j , к куску $G_i(X_i, U_i)$ не приведет к нарушению ограничения по числу внешних соединений куска.

Процесс повторяют для формирования второго, третьего и т. д. кусков исходного графа с той лишь разницей, что рассмотрению подлежат вершины, не вошедшие в предыдущие куски.

Достоинства: прост, легко реализуется на ЭВМ и позволяет быстро получить решение задачи компоновки.

Данный алгоритм может эффективно применяться и при наличии ограничения на совместную компоновку отдельных вершин графа. В этом случае каждая такая вершина жестко закрепляется за определенным куском графа и формирование очередного куска начинается с непосредственного выбора этой вершины в качестве исходной.

2.1.9. Алгоритмы размещения

После распределения конструктивных элементов (КЭ) ЭА в монтажном пространстве различного уровня иерархии для каждой полученной в результате компоновки сборочной единицы производят размещение включенных в ее состав элементов предыдущего уровня, т. е. выбирают такое их взаимное расположение, при котором наилучшим образом учитываются предъявляемые к аппаратуре требования.

Постановка задачи. Исходными данными при решении задач размещения являются:

- данные о конфигурации и размерах коммутационного пространства (определяются требованиями установки и крепления данной сборочной единицы в аппаратуре);
- количество и геометрические размеры конструктивных элементов, подлежащих размещению;
- принципиальная схема узла (или КЭ);
- ограничения на взаимное расположение отдельных элементов, учитывающих особенности разрабатываемой конструкции.

Задача размещения сводится к отысканию для каждого размещаемого элемента таких позиций, при которых оптимизируется выбранный показатель качества и обеспечиваются наиболее благоприятные условия для последующего электрического монтажа.

Особое значение эта задача приобретает при проектировании аппаратуры на печатных платах.

Основная сложность в постановке задач размещения – выбор целевой функции. Связано это с тем, что одной из главных целей размещения

является создание наилучших условий для дальнейшей трассировки соединений, что невозможно проверить без проведения самой трассировки.

Любые другие способы оценки качества размещения (минимум числа пересечений ребер графа, интерпретирующего электрическую схему соединений, разбиение графа на минимальное число плоских суграфов и т. д.), хотя и позволяют создать благоприятные для трассировки условия, но не гарантируют получение оптимального результата.

Если для оценки качества размещения элементов выбрать критерий, непосредственно связанный с получением оптимального рисунка металлизации печатной платы, то конечный результат может быть найден только при совместном решении задач размещения, выбора очередности проведения соединений и трассировки, что трудно осуществить вследствие огромных затрат машинного времени.

Поэтому все применяемые в настоящее время алгоритмы размещения используют промежуточные критерии, которые лишь качественно способствуют решению основной задачи (получению оптимальной трассировки соединений):

- минимум суммарной взвешенной длины соединений;
- минимум числа соединений, длина которых больше заданной;
- минимум числа пересечений проводников;
- максимальное число соединений между элементами, находящимися в соседних позициях либо в позициях, указанных разработчиком;
- максимум числа цепей простой конфигурации.

Наибольшее распространение в алгоритмах размещения получил первый критерий, что объясняется следующими причинами:

- уменьшение длин соединений;
- улучшает электрические характеристики устройства;
- упрощает трассировку печатных проводников и снижает трудоемкость изготовления печатных плат;
- сравнительно прост в реализации.

При практической реализации алгоритмов размещения часто используют представление конструктивных элементов и позиций на коммутационной плате точками, совпадающими с их геометрическими центрами, а все соединения между элементами приводят к попарно взвешенным связям. Весовые оценки связей учитывают такие характеристики схемы, как число электрических цепей между элементами, теплонагруженность элементов, условия распространения сигналов в цепях и т. д.

Широкий класс таких оценок описывается формулой, определяющей значение коэффициента взвешенной связности:

$$c_{ij} = \sum_{s=1}^g a_{ij}^s T_{ij}^s,$$

где T_{ij}^s - вес s -той цепи, связывающей элементы i и j .

a_{ij}^s - элемент матрицы смежности между элементами i и j по s -той цепи.

g - число цепей, по которым связаны элементы i и j .

T_{ij}^s определяет важность s -той цепи с точки зрения минимизации ее длины с учетом условий распространения сигнала, теплонагруженности, электромагнитной совместимости и т. д.

В общем виде задача размещения конструктивных элементов на коммутационной плате формулируется следующим образом. Задано множество конструктивных элементов X и множество связей между этими элементами U , а также множество установочных мест (позиций) на коммутационной плате T . Найти такое отображение множества X на множестве T , которое обеспечивает экстремум целевой функции F .

Если критерием качества размещения является минимум суммарной взвешенной длины соединений, то задача состоит в минимизации функции:

$$F = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{ij}.$$

Обычно поле позиций коммутационная плата имеет форму прямоугольника $a \times b$ с координатами $0 \leq x \leq a$ и $0 \leq y \leq b$.

Вся площадь платы разбивается на ряд областей (позиций), число которых должно быть не меньше числа размещаемых элементов. В результате получим фиксированные позиции для установки элементов.

Исходя из конструктивных соображений, могут выделять области для размещения выводных контактных зон схемы (разъемов), запрещенные области, в которых не должны помещаться элементы схемы (зоны крепления платы, конструктивные вырезы и т. п.).

Все конструктивные элементы, подлежащие размещению, можно условно разделить на три группы:

1) нефиксированные элементы, местоположение которых на плате заранее не известно;

2) граничные элементы, к которым относятся элементы, связанные с разъемами, осуществляющими электрическую связь с элементами, расположенными на других коммутационных платах. Так как разъемы обычно

помещают на внешней стороне коммутационной платы, то эти элементы желательно располагать у границы коммутационного поля;

3) фиксированные элементы, местоположение которых на плате заранее определено (указано разработчиком).

Оптимизацию размещения осуществляют локально из некоторого случайного или интуитивно выбранного первоначального размещения.

По принципам реализации известные алгоритмы размещения можно разделить на алгоритмы, использующие непрерывно-дискретные и дискретные методы оптимизации (рис. 2.3). Эффективность того или иного алгоритма обычно оценивают по результатам решения типовых конструкторских задач.



Рис. 2.3. Классификация алгоритмов размещения

2.1.10. Алгоритмы и модели трассировки

Исходная информация для решения задач трассировки соединений:

- список цепей;
- параметры конструктивных элементов;
- параметры монтажного поля;
- данные по размещению конструктивных элементов;
- координаты выводов элемента.

Задача трассировки имеет метрический и топологический аспекты.

Метрический аспект предполагает учет конструктивных размеров элемента и соединений контактных площадок. *Топологический* аспект свя-

зан с выбором допустимого пространственного расположения отдельных монтажных соединений на плате при ограничениях на число пересечений и число слоев монтажной платы.

Различают методы трассировки проводных и печатных соединений (рис. 2.4, 2.5). Трассировка *проводных* соединений более проста, т. к. цепи электрически изолированы друг от друга. Глобальная оптимизация обеспечивается локальной оптимизацией отдельной цепи. Трассировка *печатных* соединений сложна из-за согласования метрических и топологических параметров схемы соединений и монтажного пространства.

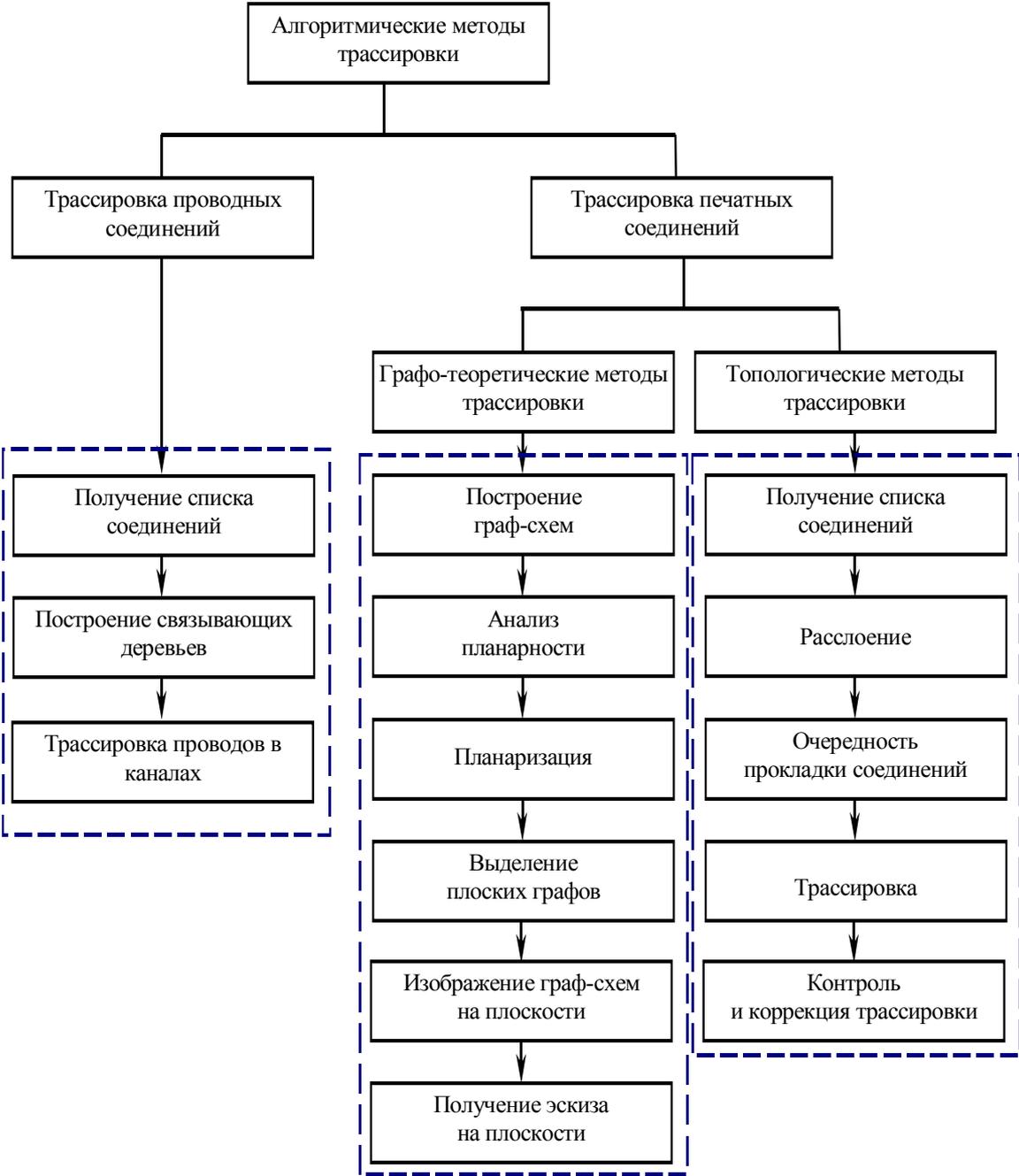


Рис. 2.4. Классификация алгоритмов трассировки (часть 1)

Требования к трассировке соединений:

- соединения должны соответствовать принципиальной схеме и быть кратчайшими;
- число пересечений трасс в монтажном поле должно быть минимальным для МПП, либо не допускается – для ОПП;
- распределение цепей в монтажном поле должно приближаться к равномерному;
- минимум числа непроверенных соединений;
- минимальная протяженность параллельных участков соседних проводников;
- минимум числа изгибов проводников;
- минимум числа слоев металлизации и числа переходов из слоя в слой (применяется при проектировании многослойных печатных плат).

Так как все перечисленные критерии являются противоречивыми, то при выборе обобщенного показателя качества указывают важность или очередность учета отдельных критериев оптимизации.

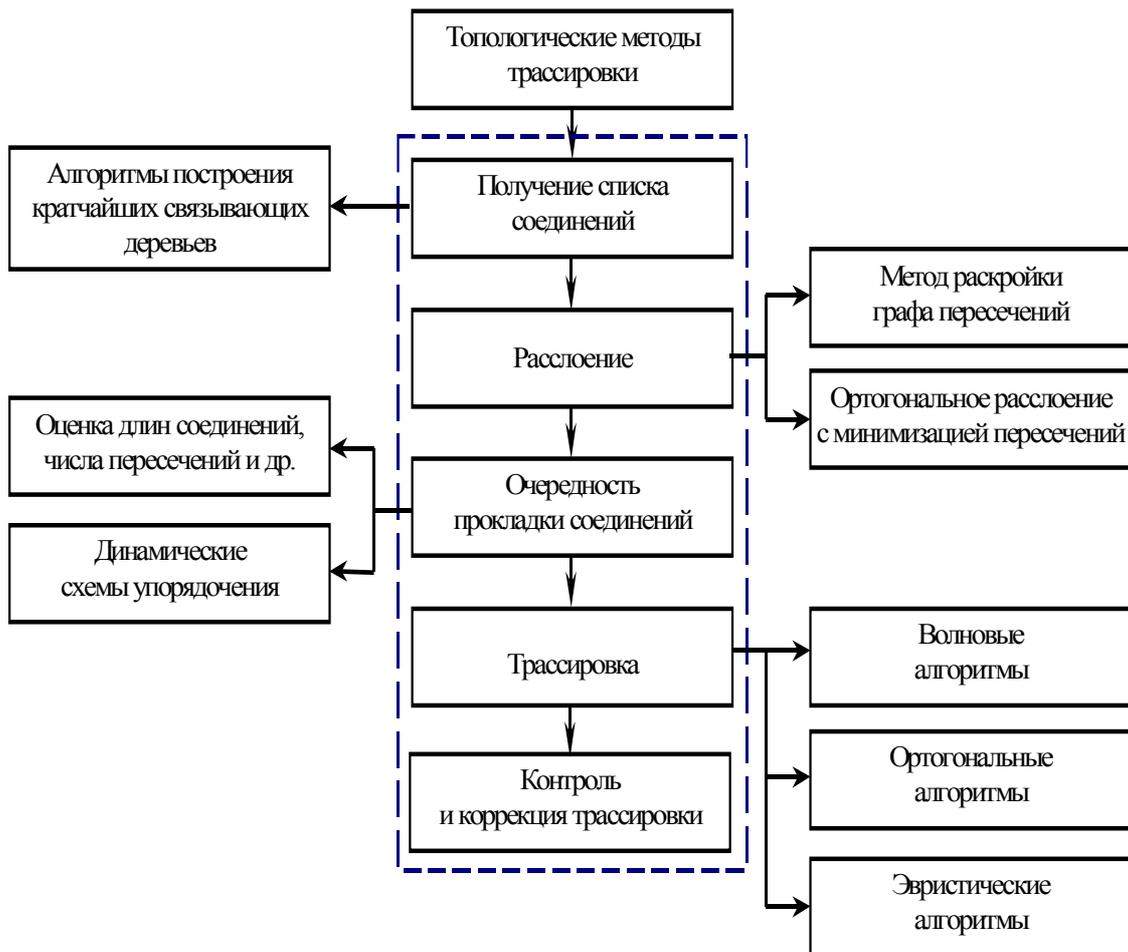


Рис. 2.5. Классификация алгоритмов трассировки (часть 2)

2.1.11. Трассировка проводных соединений

Несмотря на быстрое развитие печатного монтажа, удельный вес проводных соединений в ЭА остается еще достаточно большим. Как правило, проводной монтаж используют при электрическом объединении модулей третьего (субблоков, кассет) и четвертого (блоков, рам) уровней иерархии.

Трассировку проводных соединений производят двумя способами:

- 1) по прямым, соединяющим отдельные выводы модулей (монтаж внавал);
- 2) с помощью жгутов.

Трассировка по первому методу заканчивается построением кратчайших деревьев – этап 1 (рис. 2.4).

Достоинства метода: простота выполнения; высокая помехоустойчивость; позволяет до минимума сократить общую длину проводников и протяженность участков их параллельного прохождения; уровень паразитных наводок и время задержки сигнала в электрических соединениях относительно невелики.

Недостатки: высока вероятность появления в процессе монтажа ошибок (неправильное подсоединение отдельных выводов, пропуск некоторых соединений и т. п.); контроль правильности трассировки сложен; при высокой плотности монтажа обладает малой ремонтпригодностью.

Трассировка с помощью жгутов предполагает объединение отдельных проводников в жгуты, которые укладываются в специальные каналы, предусмотренные в монтажном поле. При трассировке проводных соединений данным методом решаются следующие задачи (рис. 2.4): получение списка соединений; построение кратчайших связывающих деревьев (сетей); выполнение трассировки проводов в каналах.

Достоинства: более технологичен, так как позволяет разделить операции вязки и распайки жгутов; проще процесс контроля и устранения ошибок, допущенных при монтаже.

Недостатки: практически неприемлем для создания высокочастотной и чувствительной к электрическим помехам аппаратуры.

Задача трассировки проводных соединений формулируется следующим образом.

В некоторой системе координат $X Y Z$, связанной с коммутационным пространством модуля, задано местоположение множества выводов:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}.$$

В соответствии с электрической схемой соединений разобьем множество M на непересекающиеся подмножества $M^{(1)}, M^{(2)}, \dots, M^{(P)}$, каждое из которых включает в себя выводы, подлежащие электрическому объединению.

Для каждого подмножества требуется определить последовательность соединения выводов и конфигурацию проводников, обеспечивающих при заданных ограничениях минимальную суммарную длину соединений. Необходимо учитывать назначение цепей.

Среди различных вариантов соединения вершин (выводов) подмножества $M^{(i)}$ целесообразно рассматривать лишь древообразные структуры (если нет – дублирование проводов).

2.1.12. Трассировка печатных соединений

Задача проектирования печатного монтажа может быть сформулирована следующим образом. На коммутационной поверхности заданы своими координатами (x, y) множество конструктивных элементов:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_l\}.$$

Выводы этих элементов образуют некоторое множество из L связных подмножеств:

$$\varepsilon = \{C_1, C_2, \dots, C_L\},$$

где каждое l -тое подмножество C_l объединяет N_l выводов конструктивных элементов из множества R в соответствии с принципиальной электрической схемой.

Кроме того, заданы расположение групп контактных площадок разъемов и монтажных отверстий, ряд требований, предъявляемых к топологии платы:

- минимальная ширина проводников и зазора между ними,
- размеры контактных площадок,
- число слоев металлизации и способы перехода с одного слоя на другой и т. п.

Требуется с учетом заданных конструкторско-технологических ограничений соединить выводы конструктивных элементов внутри каждого подмножества $C_l \subset \varepsilon$ так, чтобы полученные соединения отвечали выбранному показателю качества.

В общем виде задачу трассировки печатных соединений можно свести к построению бесперекрестного минимального леса и отысканию кратчайшего пути между его вершинами (трассировка соединений).

Обе эти задачи можно рассматривать как независимые, алгоритмически разрешимые:

1) Построение бесперекрестного минимального леса сводится к поиску таких связывающих деревьев G_l , для каждого из подмножеств C_l , которые минимизируют целевую функцию:

$$F = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_l-1} (d_{ij}^n)_l,$$

где $(d_{ij}^n)_l$ - длина n -ной связи в выбранной метрике между точками i и j (контактами выводов), принадлежащими подмножеству C_l , объединяющему N_l контактов.

Единственно достоверным способом получения оптимального результата в этих условиях является полный перебор вариантов последовательностей построения бесперекрестного леса, что на практике невозможно.

Характерной особенностью печатного монтажа является возможность кроме соединений типа «вывод-вывод», применяемых в проводном монтаже, использовать соединения типа «вывод-проводник» и «проводник-проводник».

Оптимизация подобных цепей предполагает построение для каждого множества объединяемых вершин $M^i = \{m_1^{(i)}, m_2^{(i)}, \dots, m_n^{(i)}\}$ минимальных деревьев, допускающих введение произвольного числа дополнительных вершин, образующих множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$, (т. е. точки соединения и разветвления печатных проводников).

Практически все методы построения минимальных связывающих деревьев не учитывают ограничения на размеры монтажного поля, толщину печатных проводников и величину зазора между ними. В результате значительную часть найденных деревьев оказывается невозможным реализовать в виде электрических цепей печатной платы.

Указанный недостаток, большое время, затрачиваемое на построение минимальных связывающих деревьев, привели к тому, что данные алгоритмы применяют лишь для отыскания пар контактов, подлежащих соединению.

2) Трассировку соединений осуществляют с помощью алгоритмов, основанных на методах динамического программирования.

Общим для этих алгоритмов является разбиение монтажного поля на ячейки, размер и форма которых определяют плотность и конфигурацию печатных проводников (равносторонние треугольники, квадраты, шестиугольники).

Наибольшее распространение на практике получило разбиение рабочего поля на правильные квадраты, что обеспечивает простую адресацию ячеек в прямоугольной системе координат и привычную форму соединений.

Покрытие поля равносторонними треугольниками является наименее удачным, так как при реализации алгоритма трассировки потребуется введение дополнительной операции сглаживания углов. Кроме того, использование треугольных и шестиугольных ячеек усложняет их адресацию.

Размеры ячеек определяются конструктивно-технологическими требованиями, предъявляемыми к печатному монтажу. Так как в каждой ячейке обычно размещается только один вывод или печатный проводник, максимальные размеры ячеек определяются допустимой точностью воспроизведения проводников.

Минимальные размеры ячеек обуславливаются возможностью ОЗУ ЭВМ и соотношением:

$$d \geq b_n - l,$$

где d - расстояние между центрами соседних ячеек;

b_n - минимальная ширина печатного проводника;

l - минимальное расстояние между соседними проводниками.

Соединение выводов конструктивных элементов осуществляется в результате последовательного заполнения ячеек трассами, конфигурация которых является локально оптимальной (соединения проводятся оптимальным образом лишь по отношению к ранее построенным проводникам) в соответствии с выбранными критериями трассировки.

При последовательном процессе проведения трасс (поскольку многие соединения конкурируют между собой) число разведенных цепей и их конфигурация определяются последовательностью трассировки отдельных соединений.

Известные алгоритмы трассировки печатных плат можно условно разбить на три большие группы:

- волновые,
- ортогональные,
- эвристического типа.

Волновые алгоритмы. Основаны на идеях Ли. Получили широкое распространение в существующих САПР.

Достоинства:

- позволяют легко учитывать технологическую специфику печатного монтажа со всей совокупностью конструктивных ограничений;
- всегда гарантируют построение трассы, если путь для нее существует.

Ортогональные алгоритмы.

Достоинства:

- обладают большим быстродействием, чем волновые алгоритмы;
- реализация их на ЭВМ требует в 75 – 100 раз меньше вычислений по сравнению с волновыми алгоритмами.

Недостатки:

- получение большого числа переходов со слоя на слой;
- отсутствие 100 %-ной гарантии проведения ряда трасс;
- большое число параллельно идущих проводников.

Такие алгоритмы применяют при проектировании печатных плат со сквозными металлизированными отверстиями.

Алгоритмы эвристического типа.

В настоящее время они широко распространены (критичны к объему памяти и быстродействию ЭВМ). Частично основаны на эвристическом приеме поиска пути в лабиринте. При этом каждое соединение проводится по кратчайшему пути, обходя встречающиеся на пути препятствия.

Волновой алгоритм Ли представляет собой классический пример использования методов динамического программирования для решения задач трассировки печатных соединений.

Основные принципы построения трасс с помощью волнового алгоритма:

- все ячейки монтажного поля подразделяют на занятые и свободные;
- занятыми считаются ячейки, в которых уже расположены проводники, построенные на предыдущих шагах, или находятся монтажные выводы элементов, а также ячейки, соответствующие границе платы и запрещенным для прокладывания проводников участкам;
- каждый раз при проведении новой трассы можно использовать лишь свободные ячейки, число которых по мере проведения трасс сокращается.

На множестве свободных ячеек коммутационного поля моделируют волну влияния из одной ячейки в другую, соединяемых впоследствии общим проводником.

Первую ячейку, в которой зарождается волна влияний, называют источником, а вторую – приемником волны.

Чтобы иметь возможность следить за прохождением фронта волны влияний, его фрагментам на каждом этапе присваивают некоторые веса:

$$P_k = P_{k-1} + \Psi(f_1, f_2, \dots, f_g),$$

где P_k и P_{k-1} – вес ячеек k -того и $k - 1$ -того фронтов;

$\psi(f_1, f_2, \dots, f_g)$ – весовая функция, являющаяся показателем качества проведения пути, каждый параметр которой $f_i (i = 1, 2, \dots, g)$ характеризует путь с точки зрения одного из критериев качества (длины пути, числа пересечений и т. п.).

На P_k накладывают одно ограничение – вес ячеек предыдущих фронтов не должны быть больше веса ячеек последующих фронтов.

Фронт распространяется только на соседние ячейки, которые имеют с ячейками предыдущего фронта общую сторону или хотя бы одну общую точку. Процесс распространения волны продолжается до тех пор, пока ее расширяющийся фронт не достигнет приемника или на ξ -том шаге не найдется ни одной свободной ячейки, которая могла бы быть включена в очередной фронт, что соответствует случаю невозможности проведения трассы при заданных ограничениях.

Если в результате распространения волна достигла приемника, то осуществляют «проведение пути», которое заключается в движении от приемника к источнику по пройденным на этапе распространения волны ячейкам, следя за тем, чтобы значения P_k монотонно убывали. В результате получают путь, соединяющий эти две точки.

Из описания алгоритма следует, что все условия, необходимые для проведения пути, закладываются в правила приписания веса ячейкам.

Чтобы исключить неопределенность при проведении пути для случая, когда несколько ячеек имеют одинаковый минимальный вес, вводят понятие путевых координат, задающих предпочтительность проведения трассы. Каждое направление кодируют двоичным числом по $\text{mod } q$, где q – число просматриваемых соседних ячеек. При этом чем более предпочтительно то или иное направление, тем меньший числовой код оно имеет.

Например, если задаться приоритетным порядком проведения пути сверху, справа, снизу и слева, то коды соответствующих путевых координат будут 00, 01, 10 и 11.

Приписание путевых координат производят на этапе распространения волны. При проведении пути движение от ячейки к ячейке осуществляют по путевым координатам.

Вопросы для самопроверки по теме 2.1

1. Обоснуйте необходимость применения САПР.
2. Раскройте сущность САПР.
3. Приведите классификацию существующих САПР.
4. Назовите и охарактеризуйте основные составные части САПР.

5. Назовите универсальные и специализированные технические средства САПР.
6. Перечислите основные требования при создании САПР.
7. Перечислите требования к математическому обеспечению САПР.
8. Перечислите принципы повышения эффективности МО САПР.
9. Назовите форму представления электрической схемы в памяти ЭВМ.
10. Приведите модели представления коммутационных схем в памяти ЭВМ.
11. Приведите модели представления монтажного пространства.
12. Назовите критерий оптимальности компоновки модулей ЭВМ.
13. Перечислите конструктивные ограничения в задачах компоновки.
14. Приведите классификацию алгоритмов компоновки.
15. Раскройте сущность последовательного алгоритма компоновки модулей ЭВМ.
16. Раскройте сущность задачи размещения конструктивных элементов.
17. Перечислите критерии, используемые при решении задачи размещения.
18. Приведите классификацию алгоритмов размещения.
19. Назовите исходные данные и основные аспекты задачи трассировки.
20. Приведите классификацию алгоритмов трассировки.
21. Перечислите основные требования к трассировке соединений.
22. Охарактеризуйте различные способы трассировки проводных соединений.
23. Сформулируйте задачу трассировки проводных соединений.
24. Сформулируйте задачи трассировки печатных соединений.
25. Назовите алгоритмы трассировки печатных соединений.
26. Приведите волновой алгоритм ЛИ.

Тема 2.2. Применение пакетов САПР при проектировании ЭВМ

2.2.1. Назначение и возможности системы автоматизированного проектирования AutoCAD

AutoCAD – универсальная система автоматизированного проектирования (САПР) фирмы Autodesk (США), завоевавшая наибольшую популярность во всем мире – 76 % пользователей работают в AutoCAD. Многие предприятия в разных странах обмениваются между собой чертежами в

формате AutoCAD *.dwg. Основным достоинством AutoCAD является доступность для создания на его базе мощных специализированных расчетно-графических пакетов.

Система AutoCAD позволяет разрабатывать двухмерные (плоские) чертежи и рисунки, разрабатывать и моделировать каркасные, полигональные (поверхностные) и объемные (твердотельные) конструкции в различных областях человеческой деятельности (техника, строительство и архитектура, швейное производство и т. п.).

Версии системы AutoCAD 2000/20001/2002/2004 связаны между собой единым форматом хранения данных и предназначены для работы в среде операционной системы Windows. Система AutoCAD 2002/2004 может использоваться в локальном или сетевом варианте.

Большим преимуществом системы AutoCAD, как средства рисования, является возможность последующего формирования электронного архива чертежей. Каждый из созданных таким образом файлов рисунков легко редактируется, что позволяет быстро получать чертежи-аналоги по чертежам-прототипам. Для облегчения процесса выпуска проектной документации можно разрабатывать «библиотеки стандартных элементов». В качестве стандартных элементов могут выступать как целые файлы, так и их отдельные части. Начиная с AutoCAD 2002, в систему включены специальные средства для контролирования стандартов предприятий, позволяющих управлять слоями, стилями и т. п. Мощным дополнением к этому является возможность использования языков программирования. Система AutoCAD имеет встроенный компилятор языка AutoLISP, который позволяет пользователю расширить возможности системы, а также средства разработки приложений на языке программирования СИ.

Пакет AutoCAD 2002/2004 позволяет работать одновременно с несколькими чертежами, имеет мощные средства визуализации создаваемых трехмерных объектов и расширенные возможности адаптации системы к требованиям пользователя, обеспечивает связь графических объектов с внешними базами данных, позволяет просматривать и копировать компоненты чертежа без открытия его файла, редактировать внешние ссылки и блоки, находящиеся во внешних файлах, и многое-многое другое.

Требования к компьютеру различны в зависимости от версии программного обеспечения. Для каждой более поздней версии AutoCAD требования к компьютеру ужесточаются. Так, для AutoCAD 2000 необходим процессор не хуже P133, рекомендуемый объем памяти – 64 Мб (минимальный – 32 Мб), жесткий диск – не менее 130 Мб свободного простран-

ства, 50 Мб свободного дискового пространства в системном каталоге, не менее 64 Мб в файле подкачки. Сама система проектирования занимает порядка 150 – 190 Мб (в зависимости от варианта установки). Необходимо наличие мыши, монитор - SVGA с разрешением не хуже 800 × 600. Для AutoCAD 2004 необходим компьютер не ниже Pentium III с процессором 500 МГц, оперативной памятью 256 Мб, винчестером 2 Гб - на винчестере надо иметь свободными 350 Мб под программное обеспечение, и не менее 250 Мб для временных файлов, которые система образует во время сеансов работы. Для установки версии AutoCAD 2004 рекомендуется одна из следующих операционных систем: Windows 2000; Windows XP; Windows NT 4.0 (с обновлением Service Pack 6a или более поздним).

2.2.2. Трехмерное моделирование в системе AutoCAD

Система AutoCAD 2000/2002/2004 включает в себя достаточно широкий спектр средств трехмерного моделирования. Они позволяют работать как с простейшими, примитивами, так и со сложными поверхностями и твердыми телами. Базовые типы пространственных моделей, используемых в AutoCAD, можно условно разделить на три группы:

- каркасные модели;
- модели поверхностей;
- твердотельные модели.

Каркасная модель – это совокупность отрезков и кривых, определяющих ребра фигуры. В каркасном моделировании используются трехмерные отрезки, сплайны и полилинии, которые позволяют в общих чертах определить конфигурацию изделия – построить его каркас. Данный вид работы следует рассматривать, как этап вспомогательных построений для трехмерного проектирования более высокого уровня.

Поверхностная модель – это совокупность поверхностей, ограничивающих и определяющих трехмерный объект в пространстве. Моделирование поверхностей применяется для детальной отработки внешнего облика изделия. Создаваемые при этом объекты характеризуются лишь конфигурацией своей поверхности и поэтому не пригодны для решения таких задач, как определение инерционно-массовых характеристик изделия или получение необходимых изображений для оформления чертежей. Область применения данного вида моделирования – дизайн, решение задач компоновки сложных изделий и т. п.

Набор средств моделирования поверхностей системы AutoCAD 2002 весьма широк и позволяет создавать пространственные объекты практиче-

ски любой формы. Имеется возможность создавать следующие основные типы поверхностей: линейчатые поверхности, поверхности Кунса, поверхности Безье.

Твердотельное моделирование является основным видом трехмерного проектирования изделий машиностроения. Создаваемые в ходе такого моделирования тела воспринимаются системой как некие единые объекты имеющие определенный объем. Твердотельное моделирование позволяет не только эффективно решать компоновочные задачи, но и определять инерционно-массовые характеристики, получать с пространственного объекта необходимые виды, разрезы и сечения для оформления рабочей документации. Твердотельные модели могут подвергаться различным расчетам, в том числе методом конечных элементов.

Средства твердотельного моделирования системы AutoCAD 2002 позволяют осуществлять параметрическое моделирование. Поэтому возможности этой системы в данной области уступают возможностям таких систем как *Autodesk Mechanical Desktop*, *Inventor* или *Solid Works*. Тем не менее AutoCAD 2002 вполне позволяет создавать твердотельные модели деталей и узлов, конфигурация которых представляет собой набор простейших форм. Серьезные сложности возникают лишь при моделировании изделий сложной неправильной формы, например, литых деталей.

Помимо средств создания пространственных объектов, блок трехмерного моделирования системы AutoCAD 2002 включает в себя средства просмотра объемного изображения, визуализации и средства редактирования трехмерных объектов.

2.2.3. Назначение, возможности, структура PCAD

Система P-CAD для Windows выпущена в феврале 1996 г. и получила название ACCEL EDA. После смены владельца в начале 2000 г. ей вернули старое название P-CAD (ACCEL EDA 15.1 стала называться P-CAD 2000).

P-CAD выполняет полный цикл проектирования печатных плат (ПП), включающий:

- графический ввод схемы;
- «упаковку» (перенос) схемы на ПП;
- ручное размещение компонентов;
- ручную, интерактивную или автоматическую трассировку проводников;
- контроль ошибок в схеме и ПП;
- выпуск конструкторской и технологической документации.

Применение сопутствующих программ позволяет выполнять моделирование схем и анализ паразитных эффектов, присущих реальным ПП, до их изготовления, что обеспечивает преимущества P-CAD по сравнению с другими САПР.

В P-CAD 2000 и 2001 в редакторе ПП установлена дискретность измерения линейных размеров 0,1 мил в английской и 0,001 мм в метрической системе, при этом за счет резерва точности внутреннего представления 32-разрядных данных обеспечивается возможность изменения системы единиц на любой стадии работы со схемой или ПП.

По сравнению с OLD PCAD для DOS система P-CAD для Windows имеет преимущества:

- применение интерфейса в стиле Windows упрощает работу с системой и ознакомление с ней;
- обеспечивает вывод результатов проектирования на современные мониторы и периферийные устройства;
- решена проблема нанесения на схемы, ПП и фотошаблоны надписей по-русски;
- возможна тонкая настройка стратегии автоматической трассировки (задание разных типов переходных отверстий при переходе проводников со слоя на слой, трассировка одной и той же цепи сегментами разной ширины и др.);
- усовершенствованы алгоритмы автотрассировки проводников, включая трассировку многослойных ПП, имеющих внутренние слои металлизации;
- обеспечена координация библиотек символов и корпусов компонентов.

Поддержка текстовых форматов баз данных DXF, PDIF, ALT и др. позволяет обмениваться информацией с такими распространенными пакетами, как AutoCAD, OrCAD, P-CAD old, «Компас» и др.

Очередная версия P-CAD 2001 вышла в начале января 2001 г. Австралийская фирма Protel International внедрила в схемный редактор P-CAD Schematic интерфейс с собственной программой моделирования аналого-цифровых устройств Circuit Simulator, используемой в системе Protel 99 SE.

В комплект поставки P-CAD 2001 снова включена программа анализа паразитных эффектов ПП Signal Integrity фирмы INCASES Engineering (она входила в состав ранних версий ACCEL EDA 13 – 15, но была исключена из P-CAD 2000).

Еще одна программа, включенная в интерфейс редактора печатных плат P-CAD PCB – программа доработки управляющих файлов для фото-плоттеров. Она корректно подготавливает управляющие файлы в формате Gerber и позволяет их отредактировать и доработать перед созданием фотошаблонов на технологическом оборудовании, заменяя аналогичную программу CAM350 фирмы Advanced CAM Technologies.

В P-CAD 2001 в состав программ автотрассировки включен бесспорный автотрассировщик Shape-Based Router, в котором применен алгоритм оптимизации нейронных сетей, заимствованный из системы Protel (аналогичная программа под названием SmartRoute используется и в системе OrCAD 9).

Однако интерфейс с хорошо зарекомендовавшей себя программой SPECSTRA сохранен.

Из менее значительных нововведений P-CAD 2001 отметим следующие:

- перед выводом на печать чертежей схем и ПП предусмотрена возможность задания минимальной ширины линий (отсутствие этого в предыдущих версиях P-CAD снижало качество схем, выводимых на лазерные печатающие устройства, некоторые линии были слишком тонкими);
- в файл технологических параметров включена секция для хранения апертур фотоплоттера;
- в графический редактор ПП включена команда вставки точек изломов проводников, имевшаяся в OLD PCAD;
- в графический редактор ПП включена команда маскирования, задающая режим выделения наложенных друг на друга объектов;
- в менеджере компонентов введена возможность одновременного просмотра состава нескольких библиотек.

Система P-CAD 2001 устанавливается на ПК, к которому предъявляются следующие требования:

- процессор 486 и Pentium;
- работает под управлением Microsoft Windows 95/98/2000/NT;
- поставляется на компакт-диске вместе с электронной документацией в формате Adobe Acrobat Reader;
- на жестком диске P-CAD 2001 вместе с библиотеками и утилитами занимает примерно 350 Мб (наибольший объем занимают библиотеки);
- минимальный объем ОЗУ составляет 16 Мб, рекомендуется 32 Мб (при автотрассировке сложных ПП объем ОЗУ следует еще увеличить);
- минимальное разрешение монитора 800 × 600.

2.2.4. Состав и структура системы P-CAD

Система P-CAD 2001 предназначена для проектирования многослойных печатных плат (МПП) электронных устройств в среде Windows. Она состоит из четырех основных модулей:

1. P-CAD Library Manager (или Library Executive);
2. P-CAD Schematic, P-CAD PCB;
3. P-CAD Autorouters;
4. Ряд вспомогательных программ.

1) *P-CAD Library Manager (Library Executive)* – менеджер библиотек. Система P-CAD имеет интегрированные библиотеки, которые содержат графическую и текстовую информацию о компонентах. В графическом виде представлена информация о графике символов и корпусов компонентов; в текстовом виде – число секций в корпусе компонента, номера и имена выводов, коды логической эквивалентности выводов и секций и т. п.

Утилита Library Executive состоит из программы Library Manager, в которую включен ряд дополнительных команд, и редакторов символов компонентов Symbol Editor и их корпусов Pattern Editor.

2) *P-CAD Schematic и P-CAD PCB* – графические редакторы схем и ПП. В отличие от OLD PCAD для выполнения простейших операций перемещения, копирования, поворота или удаления объектов в P-CAD Schematic и P-CAD PCB не нужно пробираться через последовательность разных меню, это делается гораздо проще, в стиле Windows. Например, для перемещения объекта сначала курсором включают режим выбора, отмечают щелчком левой клавиши мыши нужный объект и затем перемещают его движением мыши; поворот объекта при этом выполняется нажатием клавиши R, зеркальное отображение – клавиши F. Двойной щелчок левой клавишей мыши по выбранному объекту обеспечивает доступ к просмотру и редактированию объектов.

Копирование объектов в буфер обмена или в файл позволяет не только переносить их из одной базы данных в другую, но и помещать в другие программы Windows, например в MS Word для выпуска документации.

В поставляемых вместе с системой библиотеках импортных цифровых ИС некоторые компоненты имеют три варианта графики: Normal – нормальный (в стандарте США), DeMorgan – обозначения логических функций, IEEE – обозначения в стандарте Института инженеров по электротехнике и электронике (наиболее близком к отечественным стандартам).

В P-CAD 2001 PCB предусмотрена возможность создания альтернативной графики и для корпусов компонентов. Библиотеки отечественных компонентов выполняются по ЕСКД в среде P-CAD или переносятся из OLD PCAD . Средствами Windows реализован многооконный интерфейс, что разрешает на одном экране просмотреть чертежи схем и ПП и провести идентификацию на ПП цепей, выделенных на схеме (реализуя так называемую «горячую» связь). Применение шрифтов TrueType позволяет наносить на схемы и ПП надписи по-русски.

Графический редактор ПП P-CAD PCB вызывается автономно или из редактора схем P-CAD Schematic. В P-CAD Schematic составляется список соединений схемы (Netlist), который загружается в P-CAD PCB, и на поле ПП переносятся из библиотек изображения корпусов компонентов с указанием линий электрических соединений между их выводами – по терминологии OLD PCAD эта операция называется упаковкой схемы на ПП. После этого вычерчивается контур ПП, внутри него (вручную или в интерактивном режиме с помощью SPECSTRA) размещаются компоненты и проводится трассировка проводников.

В P-CAD PCB появилось много новых возможностей, позволяющих улучшить качество разработки ПП:

- средства обнаружения и удаления изолированных островков металлизации;
- автоматическая очистка зазоров в областях металлизации при прокладке через занятые ими области проводников и простановке переходных отверстий (ПО);
- возможность задания индивидуальных зазоров для разных проводников, классов проводников и проводников, находящихся на различных слоях или в различных областях (комнатах),
- расщепления металлизированных слоев на области для подключения нескольких источников питания, отдельно аналоговой и цифровой «земли»;
- ПО допускается размещать в любой точке ПП, что облегчает разметку центров крепежных отверстий (в OLD PCAD для этого создаются фиктивные компоненты, состоящие из одного вывода).

Еще одно отличие от OLD PCAD – изображения стеков контактных площадок (КП) и ПО не хранятся в виде отдельных графических файлов, подключаемых на заключительной стадии проектирования ПП, теперь они создаются в текстовом виде и хранятся вместе с базой данных ПП или в

файле технологических параметров проекта (при этом имеется возможность их оперативной замены).

Базы данных схем и ПП всех версии OLD PCAD через текстовый формат PDIF переносятся в P-CAD Schematic и P-CAD PCB.

3) *P-CAD Autorouters*. В состав P-CAD 2001 входят автотрассировщики:

- простейшая программа QuickRoute;
- заимствованная из системы Protel программа Shape-Based Router (аналогичная программе SmartRoute из системы OrCAD 9.2);
- программа SPECCTRA (поставляется отдельно).

Они вызываются из управляющей оболочки P-CAD PCB, в которой производится настройка стратегии трассировки. Очень удобно, что информацию об особенностях трассировки отдельных цепей можно с помощью стандартных атрибутов ввести еще на этапах создания принципиальной схемы или ПП:

- атрибуты ширины трассы;
- типа ассоциируемых с ней ПО и их максимально допустимого количества;
- признак запрета разрыва цепи в процессе автотрассировки;
- признак предварительно разведенной и зафиксированной цепи.

Эффективность и «интеллектуальность» алгоритмов трассировки Shape-Based Router гораздо выше, чем у PCAD 8.7, но Shape-Based Router уступает программе SPECCTRA по возможностям тонкой настройки стратегии трассировки; к тому же SPECCTRA обладает возможностями размещения компонентов в интерактивном и автоматическом режимах.

P-CAD Document Toolbox – набор дополнительных команд для автоматизации создания графической и текстовой информации, необходимой для документирования результатов проектирования (вызов этих команд встраивается в набор инструментов программ P-CAD Schematic и P-CAD PCB) – для размещения на чертежах схем и ПП различных диаграмм, таблиц сверловки, составления списков соединений, выводов подключения питания и других текстовых отчетов, которые динамически обновляются.

P-CAD InterPlace&PCS (Pametric Constraint Solver) – DBX-утилита, данные в которую передаются из P-CAD Schematic или P-CAD PCB.

Модуль Pametric Constraint Solver позволяет задать набор правил размещения компонентов, трассировки проводников и других правил разработки ПП на этапах создания принципиальной схемы и ранних этапах

работы с печатными платами. Эти данные передаются в программы Shape-Based Router и SPECCTRA. При задании правил разработки ПП допускается использовать математические функции.

Модуль InterPlace представляет собой интерактивное средство размещения компонентов (базовая программа P-CAD PCB позволяет выполнить размещение компонентов только вручную, для автоматического размещения используется отдельная дорогостоящая программа SPECCTRA). Компоненты могут быть объединены в физические или логические группы и размещены на ПП в определенных областях (комнатах), выровнены, перемещены или повернуты.

P-CAD InterRoute Gold – лицензия, обеспечивающая доступ в P-CAD PCB к дополнительным командам интерактивной трассировки проводников Route > Bus, Fanout, Multi Trace, Push Traces, Visible Routing Area и опциям Maximum Hugging, Minimum Length (которые имеются и в программе SPECCTRA).

P-CAD Relay – средство для обеспечения коллективной работы над проектами ПП, является аналогом графического редактора P-CAD PCB с ограниченными возможностями. Печатные платы можно просматривать, вручную редактировать и выполнять вывод на принтеры и плоттеры.

С ее помощью разработчик схем может выполнить общую расстановку компонентов на ПП, задать наиболее существенные атрибуты, которые будут использованы при трассировке (например, допустимые зазоры), и проложить наиболее критичные трассы. Затем эти результаты передаются конструктору для завершения разработки ПП с помощью P-CAD PCB. Кроме того, с помощью P-CAD Relay выполняется контроль соблюдения технологических норм DRC и запускаются утилиты DBX.

Schematic Viewer, PCB Viewer – средство просмотра схем и ПП.

Protel Advanced Sim – программа моделирования аналоговых и смешанных аналого-цифровых устройств фирмы Protel, интегрируемая с P-CAD Schematic.

P-CAD Signal Integrity – программа анализа электрических характеристик ПП с учетом паразитных параметров реальных конструкций (задержки сигналов в печатных проводниках, учет потерь в них, наличии индуктивностей и емкостей, взаимных индуктивностей, согласование печатных проводников с источниками сигналов и нагрузками).

SPECCTRA – программа ручной, интерактивной и автоматической трассировки проводников и размещения компонентов фирмы Cadence

Design Systems (www.cadence.com). Программа SPECCTRA успешно трассирует ПП большой сложности (число слоев до 256) благодаря применению так называемой бессеточной (Shape-Based) технологии. В отличие от разработанных ранее сеточных трассировщиков, в которых графические объекты представлены в виде набора координат точек, в ней используются компактные способы их математического описания. За счет этого повышается эффективность трассировки ПП с высокой плотностью расположения компонентов и обеспечивается тонкая настройка сложных стратегий размещения компонентов и трассировки проводников.

Всем объектам ПП присваивается определенный уровень иерархии и вводятся правила размещения и трассировки, составляющие их стратегию, предусматривающую особенности разработки конкретной ПП.

Помимо обычного контроля соблюдения технологических зазоров типа проводник – проводник, проводник – ПО и т. п. в системе SPECCTRA можно выполнить контроль максимальной длины параллельных проводников, расположенных на одном или двух смежных слоях, что позволяет уменьшить уровень перекрестных искажений. Контролируется также максимальное запаздывание сигнала в отдельных цепях.

SPECCTRA воспринимает информацию о ПП, подготовленных с помощью одного из графических редакторов: OLD PCAD, P-CAD PCB, MicroSim PCBoards, PADS, Protel, OrCAD Layout и многих др. Разработанная в SPECCTRA ПП транслируется обратно для выпуска документации. Процедура такой двусторонней трансляции встроена в P-CAD PCB, но она может выполняться и автономно.

Вспомогательные утилиты. Система P-CAD поставляется совместно с большим количеством утилит, написанных на Visual Basic, Си или Си ++ и образующих интерфейс DBX (Data Base Exchange). Эти утилиты извлекают данные из открытых файлов схем или ПП, обрабатывают их, передают третьим программам и вносят коррективы в текущую базу данных. В частности, с их помощью можно производить изменение нумерации компонентов, создавать отчеты в заданном пользователем формате, автоматически создавать символы и конструктивы компонентов, рассчитывать паразитные параметры ПП и т. п.

Программа доработки фотошаблонов SAMtastic. Графический редактор P-CAD PCB создает управляющие файлы для фотоплоттеров типа Gerber и сверлильных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), причем управляющие файлы для фотоплоттеров не всегда коррект-

ны. Поэтому перед изготовлением фотошаблона целесообразно просмотреть и при необходимости отредактировать его изображение с помощью программы SAMtastic, интерфейс с которой встроен в P-CAD PCB (передача данных всегда производится корректно). Для изготовления фотошаблонов на отечественном оборудовании необходимо перекодировать управляющие файлы.

Вопросы для самопроверки по теме 2.2

1. Каково назначение САПР AutoCad.
2. Какие возможности имеет САПР AutoCad.
3. Приведите особенности трехмерного моделирования в системе AutoCad.
4. Приведите цикл проектирования печатных плат в системе PCAD.
5. Приведите преимущества системы PCAD для Windows.
6. Приведите состав системы PCAD.
7. Назовите и охарактеризуйте автотрассировщики системы PCAD.

БЛОК 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

Тема 3.1. Содержание и порядок технологического проектирования

3.1.1. Системный подход к технологии. Иерархические уровни производства ЭВМ

Производственный процесс изготовления ЭВМ состоит из большого количества технологических операций, реализуемых на различном оборудовании. Отдельные станки объединяются в линии изготовления деталей, ЭРЭ, сборки. Работа станков, линий и процесс в целом характеризуются частичной или полной синхронизацией и взаимозависимостью выполнения режимов. Поэтому производственный процесс можно отнести к сложным системам, а для его анализа необходимо применять системный подход. *Процессы*, используемые при производстве ЭВМ, подразделяют на 5 групп:

- производство элементной базы, в том числе ЭРЭ, функциональных элементов, микросборок и ИМС;
- изготовление элементов несущих конструкций (штамповка, литье, прессование, точение, фрезерование, электрофизические методы обработки и др.);
- изготовление функциональных элементов;
- сборка, монтаж и герметизация ЭВМ;
- контроль, регулировка и испытания ЭВМ.

Качество и надежность ЭВМ, экономическая эффективность ее производства обеспечиваются с учетом особенностей всех групп процессов. С позиций системного подхода производство ЭВМ – это сложная динамическая система, в которой в единый комплекс объединены оборудование, средства контроля и управления, вспомогательные и транспортные устройства, обрабатывающий инструмент или среды, находящиеся в постоянном движении и изменении, объекты производства (заготовки, полуфабрикаты, сборочные единицы, готовые изделия) и люди, осуществляющие процесс и управляющие им. Указанную сложную динамическую систему называют технологической системой (ТС).

ТС характеризуют следующие признаки:

- возможность разбиения на множество подсистем, объединенных общей целью функционирования;
- взаимодействие системы и внешней среды;

- функционирование в условиях воздействия случайных факторов;
- сложные информационные связи между элементами и подсистемами;
- наличие иерархической структуры.

Иерархическая структура ТС означает возможность разбиения системы на подсистемы нижних уровней. С другой стороны, ТС как сложная система входит составной частью в систему отрасли. В настоящее время технологические проблемы решаются на четырех уровнях (рис. 3.1)

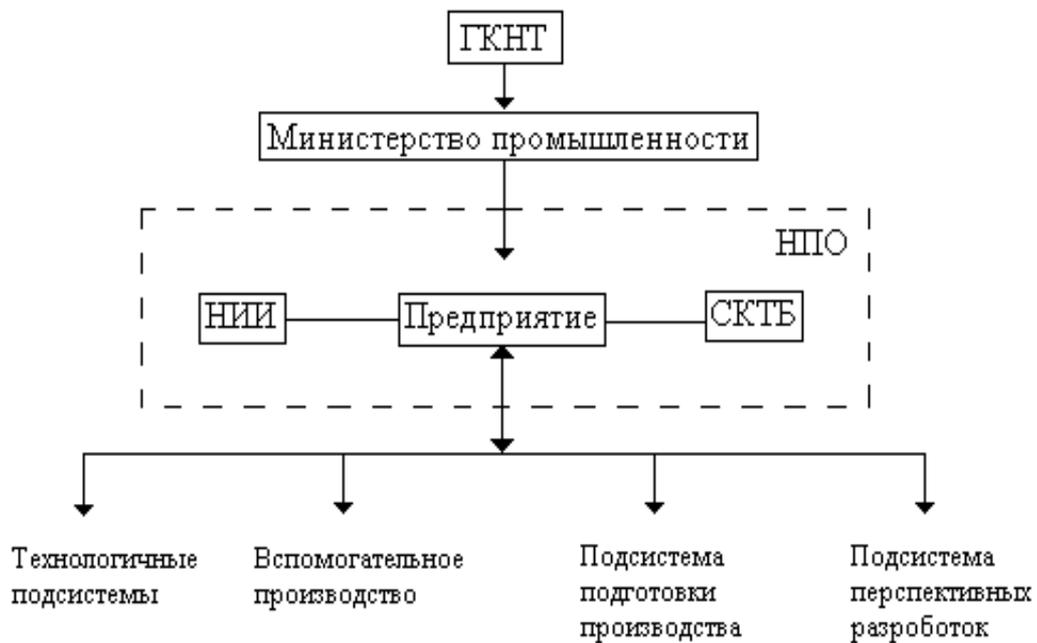


Рис. 3.1. Иерархические уровни организации технологии

В ТС предприятия обычно выделяют следующие функциональные подсистемы: технико-экономического планирования; технической подготовки производства; нормативного хозяйства; материально-технического обеспечения; оперативного планирования и управления основным производством; вспомогательного производства; сбыта готовой продукции; кадров; финансов; бухгалтерского учета и статистической отчетности.

3.1.2. Конструкторские и технологические службы НИИ и предприятий

В процессе проектирования и изготовления ЭВМ осуществляется тесное взаимодействие разработчиков ЭВМ друг с другом и с заказчиками.

В каждом НИИ (головном или отраслевом) в разработке ЭВМ и их частей принимают участие инженеры следующих основных специальностей:

- 1) инженеры электроники-системотехники;
- 2) инженеры-электроники-схемотехники;
- 3) инженеры-конструкторы (включая инженеров-дизайнеров);
- 4) инженеры-технологи;
- 5) инженеры-математики (или прикладники-математики);
- 6) инженеры-экономисты и плановики.

Этих специалистов условно принято делить на три основные группы:

- разработчики,
- конструкторы,
- технологи.

Разработчики определяют идеологию построения ЭВМ, ее назначение, функции, структуру, устанавливают функции устройств, обосновывают и выбирают элементную базу, разрабатывают логическую и схемную реализацию ЭВМ, математическое обеспечение.

Конструкторы осуществляют конструирование ЭВМ в целом и ее составных частей (сборочных единиц, деталей) на основании схемотехнических решений, принятых разработчиками.

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

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

В сложной структуре организации проектирования и производства ЭВМ важную роль выполняют конструкторско-технологические службы (отделения, отделы, бюро и т. д.). Конкретная структура той или иной конструкторской либо технологической службы определяется в основном характером организации (службы НИИ разрабатывают новые конструкции и технологии их изготовления, а в заводских специальных конструкторских бюро (СКВ) главное – сопровождение производства), особенностью и числом заказчиков (однородные или разнородные требования к конструкции и технологии), особенностью схемных решений ЭВМ (ЭВМ общего назначения или специализированные и т. д.), объемом конструкторских и технологических разработок, степенью унификации конструкторских решений и технологических процессов.

При последовательной структуре служб разработка ведется для ЭВМ конкретного назначения и применения (универсальные ЭВМ, бортовые, специального назначения и т. п.), при параллельной структуре – по схемотехническим особенностям (центральные устройства, периферийные устройства, устройства питания и т. п.).

В большинстве случаев используются смешанные структуры служб, куда, кроме чисто конструкторских и технологических, входят следующие подразделения: планово-производственные, надежности, художественного конструирования, технической документации, нормо- и технологического контроля, научно-технической информации, патентования и др.

Разработанная ЭВМ (комплект конструкторской и технологической документации) передается для производства на серийных заводах. Для организации производства заводы так же, как и организации-разработчики, имеют конструкторские и технологические службы, в состав которых входят конструкторские и технологические бюро, лаборатории и другие подразделения.

Основными задачами производственных конструкторских служб являются: приемка конструкторской документации от разработчика, оценка изделия с точки зрения профиля предприятия и его технологических возможностей, доработка документации при запуске ЭВМ в серию, модернизация изделий, обеспечение эксплуатационных показателей серийной продукции и испытания, разработка оригинальных конструкций и узлов и др.

Основные задачи технологических служб: разработка технологических процессов, конструирование технологической оснастки, выбор оборудования, создание технологических планировок производственных служб, контроль за соблюдением технологической дисциплины и др.

3.1.3. Технологичность элементов и деталей ЭВМ

Технологичность является одной из важнейших характеристик изделия.

Под *технологичностью* изделия понимают совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Классификация показателей технологичности приведена на рис. 3.2.

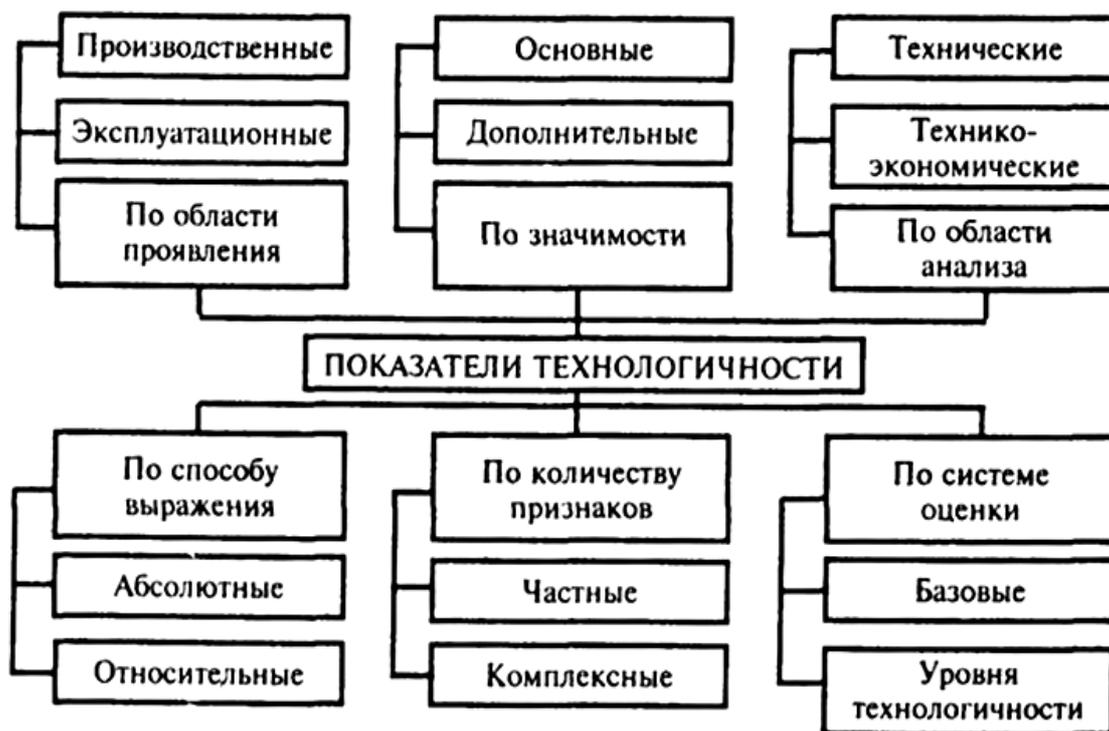


Рис. 3.2. Классификация показателей технологичности

Различают производственную и эксплуатационную технологичность.

Производственная технологичность конструкции изделия проявляется в сокращении затрат средств и времени на конструкторско-технологическую подготовку производства и процессы изготовления, включая контроль и испытания.

Эксплуатационная технологичность проявляется в сокращении затрат времени и средств на техническое обслуживание и ремонт изделия. Технологичность конструкции оценивается качественно и количественно.

Качественная оценка характеризует технологичность конструкции обобщенно на основании опыта исполнителя. Такая оценка проводится на стадии проектирования, когда осуществляется выбор лучшего конструктивного решения и не требуется определения степени технологичности сравниваемых вариантов. Качественная оценка предшествует количественной.

Количественная оценка осуществляется с помощью системы базовых показателей.

По способу выражения характеризуемых признаков показатели технологичности могут быть абсолютные и относительные, а по количеству признаков – частные и комплексные. Частный показатель технологичности конструкции изделия характеризует одно из входящих в нее свойств, а комплексный показатель – несколько входящих в него частных и комплексных свойств.

Рекомендуемый перечень показателей технологичности конструкции изделий приведен в ГОСТ 14.201-83. Наиболее важными из их являются трудоемкость изготовления изделия и технологическая себестоимость. В отраслевых стандартах, разрабатываемых на основе государственных стандартов, приводится номенклатура базовых (частных) показателей и методика их определения. *Базовыми* показателями технологичности производства ЭВМ являются коэффициенты: использования микросхем и микросборок в блоке (1), автоматизации и механизации монтажа (1), автоматизации и механизации подготовки электрорадиоэлементов (0,75), автоматизации и механизации операций контроля и настройки (0,5), повторяемости электрорадиоэлементов (0,3), применимости электрорадиоэлементов (0,18), прогрессивности формообразования деталей (0,11).

Уровень технологичности конструкции изделия при известном нормативном показателе оценивается отношением полученного комплексного показателя к нормативному, которое должно удовлетворять условию $K/K_n \geq 1$.

Нормативное значение показателя K_n технологичности конструкций блоков электронно-вычислительной техники для условий серийного производства составляет 0,5...0,8, а для опытного производства – 0,4...0,7.

При анализе результатов следует учитывать сложность изделия и уровень основного производства. Конструкция детали должна отвечать следующим требованиям: состоять из стандартных и унифицированных деталей; изготавливаться из стандартных заготовок; иметь оптимальные точность и шероховатость поверхностей; обеспечивать применение стандартных и типовых процессов ее изготовления, одновременного изготовления нескольких деталей и прогрессивных процессов формообразования: литья под давлением, литья по выплавляемым моделям, прессования пластмасс, металлокерамики, холодной штамповки.

3.1.4. Автоматизация производства ЭВМ.

Гибкие производственные системы

Одним из важнейших направлений технического прогресса, от которого зависят резкое увеличение объема производства, повышение производительности труда, улучшение всех качественных показателей ЭВМ, является автоматизация процессов производства, которая может быть частичной, комплексной или полной. Частичная, или начальная, автоматизация обеспечивает автоматизацию рабочего цикла машины и создание станков-автоматов, т. е. приводит к автоматическому осуществлению рабочего процесса на отдельных производственных операциях. Комплексная, или развитая, автоматизация охватывает весь комплекс производственных систем.

Полная автоматизация является высшим этапом автоматизации и предусматривает передачу всех функций управления и контроля автоматическим системам управления. Этап полной автоматизации производства ЭВМ имеет несколько стадий развития. Первая из них – внедрение гибких автоматизированных производственных систем (ГПС).

Под ГПС понимается производственная единица (участок, цех, завод), функционирующая под действием многоуровневой автоматической системы управления, обеспечивающей программную перестройку технологического процесса при смене объекта производства. Для ГПС не требуется обычной сопровождающей документации, ее заменяет программа, записанная на машинных носителях (перфолентах, магнитных лентах).

Экономический эффект при использовании ГПС достигается в результате:

1) увеличения сменности работы в 2...2,5 раза, коэффициента использования оборудования до 0,85...0,9;

2) сокращения количества оборудования в 6...7 раз, производственных площадей в 4...5 раз, числа работающих – в 3 раза, снижения себестоимости за счет производительности труда в 2...2,5 раза;

3) уменьшения доли тяжелого ручного труда и лучшего использования интеллектуальных способностей человека. Повышение производительности труда делает экономически выгодным использование ГПС при мелко- и среднесерийном производстве.

При использовании ГПС к конструкциям элементов и узлов ЭВМ предъявляется ряд требований. Необходима совместимость ГПС с САПР, АС ТПП и др. Важнейшим требованием является типизация и унификация деталей, элементов и сборочных узлов. Основой технологической унификации является классификация деталей по технологическим признакам: форме, габаритам, типоразмерам, применимости в изделии, рядам параметров, к требованиям точности обработки и шероховатости рабочих и установочных поверхностей и т. д. В результате сравнения детали с классификатором ей может быть присвоен определенный классификационный шифр, на основании которого составляется программа управления ГПС.

Чтобы конструкция, предназначенная для изготовления на ГПС, была технологичной, требуется учесть ограничения, обусловленные спецификой автоматизированного оборудования, допустимые типоразмеры деталей и компонентов, варианты и точность их взаимной ориентации, наличие элементов фиксации относительно оборудования, зон для размещения рабочих и фиксирующих органов манипуляторов и т. д.

При установке бескорпусных элементов желательно использовать систему организованных выводов (например, жестких на полиимидном носителе); обеспечивать фиксацию элементов путем одинаковой их ориентации, системы посадочных мест, реперных меток и т. д., устанавливать гибкие печатные шлейфы с помощью штырей, использовать вакуумные захваты и т. д.

Надежность работы автоматизированного оборудования требует стабильности размеров компонентов (прогиба плат, усадки полиимидных пленок и керамических структур, полимерных корпусов и т. д.) Особого внимания требует обеспечение возможности подключения к изготавливаемому узлу автоматизированного контрольно-измерительного оборудования. Иногда при односторонней установке компонентов площадки для выполнения контактных устройств выполняются со стороны, противоположной той, на которой установлены компоненты. Конструкция печатного узла должна обеспечивать возможность групповой пайки.

Детали, подлежащие механической обработке на робототехнических комплексах, должны быть типовыми (нетиповые детали используются только в технически обоснованных случаях).

Для обеспечения технологичности изделий, изготавливаемых с использованием сборочно-монтажных ГПС, необходимо выполнять следующие рекомендации:

- 1) если изделие невозможно собрать за один установ, то его необходимо разбить на блоки, которые можно собирать одновременно и независимо;
- 2) максимально использовать ранее используемые детали;
- 3) уменьшать число крепежных деталей, использовать соединения, максимально пригодные для автоматизированной сборки (запрессовку, клейку, пластическое деформирование, контактную сварку, упругие защелки и т. д.);
- 4) обеспечивать доступ к деталям устройств захвата, крепления, контроля;
- 5) упрощать форму деталей и узлов, что облегчает ориентацию, базирование, крепление, изготовление;
- 6) иметь удобные базовые поверхности и ключи для автоматической ориентации, что исключает необходимость переориентации базовой детали при сборке;
- 7) допуски и геометрические характеристики деталей и их поверхностей должны обеспечивать сборку по методу полной взаимозаменяемости;

8) на соединяемых деталях целесообразно выполнять центрирующие элементы (фаски, скосы, закругления кромок и т. д.);

9) если при сборке сопрягаемые поверхности не удастся использовать в качестве базовых, то на относительное положение этих поверхностей необходимо установить такие допуски, при которых погрешность базирования будет меньше влиять на положение сопрягаемых поверхностей.

3.1.5. Технологическая документация

Состав и правила выполнения технологической документации определяет ГОСТ 3.1001-81 и Единая система технологической документации (ЕСТД).

ЕСТД представляет собой комплекс государственных стандартов и руководящих нормативных документов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформления и обращения технологической документации, применяемой при изготовлении и ремонте изделий (контроль, испытания и перемещения).

Основное назначение ЕСТД – установление во всех организациях и на всех предприятиях единых правил выполнения, оформления, комплектации и обращения технологической документации в зависимости от типа и характера производства.

Состав документов зависит от стадии разработки ТП, типа и характера производства. В условиях серийного и массового производства используются документы (ГОСТ 3.1102-81): карта эскизов (КЭ); технологическая инструкция (ТИ); маршрутная карта (МК), карта технологического процесса (КТП), операционная карта (ОК), карта типового (группового) ТП (КТТП), карта типовой (групповой) операции (КТО), комплектовочная карта (КК), технико-нормировочная карта (ТНК), карта наладки (КН); ведомость технологических маршрутов (ВТМ); ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) ТП (операции) (ВТП, ВТО).

Наиболее часто используется следующая документация.

Маршрутная карта – является обязательным документом, предназначена для маршрутного описания технологического процесса или полного указания состава технологической операции, включая контроль и перемещения по всем операциям в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах. Допускается взамен МК использовать соответствующую карту ТП.

Карта ТП – для операционного описания ТП изготовления или ремонта изделия (составных частей) в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах.

Операционная карта – имеет описание технологической операции (ТО) с указанием переходов, режимов обработки и данных о средствах технологического оснащения. Она используется на рабочем месте.

Карта типового ТП – для описания типового ТП изготовления или ремонта деталей и сборочных единиц, а карта типовой ТО – для описания типовой ТО.

Правила оформления технологических документов приведены в ГОСТ 3.1104-81. В соответствии с этими правилами операции следует нумеровать числами ряда арифметической прогрессии (5, 10, 15 и т. д.). Переходы следует нумеровать числами натурального ряда (1, 2, 3 и т. д.). Для обозначения позиций допускается применять римские цифры. Формы МК и правила ее оформления установлены в ГОСТ 3.1118-82, а общие требования к оформлению комплектов документов на единичные процессы изложены в ГОСТ 3.1119-83. Требования к безопасности труда излагают перед описанием технологической операции или технологической инструкции.

Вопросы для самопроверки по теме 3.1

1. Назовите группы процессов, используемых при производстве ЭВМ.
2. Перечислите признаки, характеризующие технологическую систему.
3. Назовите иерархические уровни организации технологии.
4. Инженеры каких специальностей принимают участие в разработке ЭВМ?
5. Какие структуры конструкторских и технологических служб вы знаете?
6. Назовите основные задачи производственных конструкторских служб.
7. Назовите основные задачи производственных технологических служб.
8. Дайте определение технологичности изделия.
9. Приведите классификацию показателей технологичности изделия.
10. Как оценивается технологичность изделия?
11. Дайте определение гибкой производственной системы.

12. В результате чего достигается экономический эффект при использовании ГПС ?

13. Назовите рекомендации, которые следует выполнять для обеспечения технологичности изделий, изготавливаемых с использованием сборочно-монтажных ГПС ?

14. Что такое ЕСТД ? Ее основное назначение.

15. Перечислите документы, используемые в условиях серийного и массового производства.

Тема 3.2. Материалы и методы формообразования деталей ЭВМ

3.2.1. Материалы, применяемые в производстве ЭВМ

В производстве ЭВМ широко используются следующие материалы: металлы и сплавы; простые и сложные полупроводники; диэлектрики; магнитные материалы. Они применяются при изготовлении несущих конструкций, видовых, защитных и других деталей и узлов.

Из *металлических* материалов в производстве ЭВМ широко используются железо, медь, алюминий, титан, магний, молибден, никель и их сплавы.

Железо служит основой для изготовления железоуглеродистых сплавов – стали и чугуна. В стали содержится от 0,08 до 2,14 % углерода, в чугунах – от 2,14 до 6,67 %. Стали подразделяются на: углеродистые, легированные и с особыми физико-химическими свойствами. Из *углеродистых* при изготовлении ЭВМ применяются качественные конструкционные и инструментальные стали. *Конструкционные* маркируются по химическому составу цифрами, которые обозначают содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 08 (0,08 % С), сталь 10 (0,1 % С). Они обладают способностью к глубокой вытяжке, хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Их применяют для изготовления крепежных деталей, деталей несущих конструкций, корпусов полупроводниковых приборов и т. д.

С повышением содержания углерода в стали ее твердость увеличивается, ухудшается пластичность. Углеродистые *инструментальные* стали маркируются буквой У, после которой цифрой указывается содержание углерода в десятых долях процента. Например, сталь У12 содержит 1,2 % С. Эти стали обладают высокой износоустойчивостью и используются для изготовления режущего инструмента.

С целью изменения свойств стали ее легируют, т. е. добавляют соответствующие элементы. *Легированные* стали маркируются по своему

составу. Для этого используется сочетание букв и цифр, причем буквы указывают на соответствующий легирующий элемент, а цифры после букв – на содержание этого элемента в процентах. Буква А в конце маркировки показывает, что сталь очищена от вредных примесей серы и фосфора (до 0,025 % каждого). Например, сталь 12ХНЗА содержит 0,12 % С, 1 % Сг, 3 % Ni, < 0,025 % S и < 0,025 % P. Сталь 12ХНЗА обычно применяется для изготовления зубчатых колес и муфт сцепления. Для изготовления пружин и пружинящих деталей ответственного назначения используются стали марок 55С2А, 50ХФА, 60С2ХА и некоторые другие. В особых случаях, например для деталей вакуумных конструкций, целесообразно применение нержавеющей стали марки Х18Н9Т.

Из сталей с особыми физическими и химическими свойствами широко применяются *нержавеющие, пружинные и жаростойкие*.

Медь обладает высокой электропроводностью, теплопроводностью, хорошо обрабатывается давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Примеси резко снижают ее электропроводность. Медь марки М1 широко используется в производстве проводов.

В конструкциях ЭВМ широко применяют медно-цинковые сплавы с содержанием цинка до 45 % – *латуни*. Они маркируются буквой Л и двумя цифрами, которые указывают содержание цинка в процентах. Латунь хорошо обрабатывается давлением и резанием. Из латуней изготавливают корпуса, втулки, крышки, основания и другие детали, не требующие высокой прочности. Марки латуней: ЛС-59-1; Л63.

Сплавы меди с оловом и другими элементами называют *бронзами*. Их маркируют буквами БР и цифрами, указывающими среднее содержание легирующих элементов в процентах. Например, БР ОЦ4-3 – бронза оловянно-цинковая, содержит 4 % олова и 3 % цинка, остальное – медь. Бронзы обладают хорошими механическими, антифрикционными и литейными свойствами. Особое значение имеет бериллиевая бронза БрБ2. Она используется для изготовления пружин, мембран, деталей электроизмерительных приборов, растяжек пружинных переключателей и других ответственных деталей.

Алюминий имеет малую плотность, невысокое удельное сопротивление, хорошо обрабатывается давлением в холодном и горячем состоянии. Плотная пленка диоксида алюминия защищает его от коррозии.

Из сплавов известны деформируемые и литейные алюминиевые сплавы. К деформируемым относятся сплавы А1-Си, А1-Мп; А1-Мг; А1-Си-Мг и др.

Наибольшее распространение нашли *дюралюмины* и высокопрочные алюминиевые сплавы. Дюралюмины маркируются буквой Д и условным номером сплава, например, Д1; Д6; Д16 и т. д. *Высокопрочные сплавы* маркируются буквой В и условным номером: В95, В93 и т. д. Дюралюмины используются для изготовления обшивки корпусов, силовых каркасов и других деталей, работающих при переменных нагрузках.

К литейным алюминиевым сплавам относятся *силумины* – сплавы алюминия с кремнием (5...14 % Si). Они маркируются буквами АЛ (алюминиевый литейный) и цифрами, указывающими порядковый номер сплава (АЛ3, АЛ5 и т. д.). Такие сплавы применяются для изготовления корпусов, крышек, направляющих, деталей сложной конфигурации.

Из *полупроводниковых* материалов в технологии ЭВМ при изготовлении элементной базы применяют *элементарные полупроводники* (кремний, германий, арсенид галлия) и *полупроводниковые неорганические соединения*.

Кремний имеет различную проводимость в зависимости от степени легирования от 10^{-2} до $10^2(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$. Благодаря большой ширине запрещенной зоны кремний высокой степени очистки сохраняет свои свойства при нагреве до 398 К. Его применяют для изготовления интегральных микросхем (ИМС), транзисторов, диодов, мощных выпрямителей, солнечных батарей и других приборов.

В *германии* особенно ярко проявляется влияние примесей, поэтому при изготовлении приборов используют германий весьма высокой чистоты. Выпускаемый легированный германий может иметь проводимость от 10^{-2} до $10(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$. Допустимая температура эксплуатации не превышает 348 К. Германий используют для изготовления диодов, мощных выпрямителей, триодов, датчиков ЭДС Холла, тензометров и других приборов.

Из сложных неорганических соединений широкое применение находят полупроводники $A^{III} - B^V$ и $A^{II} - B^{VI}$. Полупроводники первого вида образуются соединением элементов III группы – алюминия, галлия, индия с элементами V группы – фосфором, мышьяком и сурьмой. Электронная проводимость достигается введением элементов VI группы – селен, теллур, дырочный полупроводник получают добавлением элементов II группы – цинк, кадмий.

К группе полупроводников $A^{II} - B^{VI}$ относятся соединения элементов II группы (цинк, кадмий, ртуть и др.) с элементами VI группы (сера, селен и теллур). Эти материалы обладают высокой чувствительностью к инфракрасному и видимому свету, ионизирующему излучению, позволяют получать низкую проводимость – до $10^{-13}(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$, просты и экономичны в изготовлении.

Полупроводниковые материалы используются для изготовления диодов, транзисторов, пластин полупроводниковых ИМС, датчиков ЭДС Холла (германий, кремний), варисторов, нагревателей электрических печей (карбид кремния SiC), фоторезисторов, фотодиодов (антимонид индия InSb, арсенид галлия GaAs), полевых транзисторов (теллурид кадмия CdTe).

При производстве несущих конструкций ЭВМ *диэлектрики* используются как изоляторы, а также при изготовлении видовых и защитных деталей. Из диэлектрических материалов широко применяются пластмассы, стекла, ситаллы и керамика.

Пластмассы – это искусственные материалы, получаемые на основе природных и синтетических высокомолекулярных органических соединений – полимеров. Такие соединения содержат сотни и тысячи атомов в одной молекуле. Пластмассы разделяют на простые и сложные. *Простые* пластмассы (полиэтилен, плексиглас, полистирол и т. д.) представляют собой чистые термопластичные полимеры. *Сложные* (композиционные) пластмассы состоят из полимера и ряда специальных добавок, благодаря которым повышается прочность, жесткость, термостойкость, улучшаются другие свойства пластмасс. В качестве наполнителей применяют минеральные (оксид цинка, диоксид титана, слюда, мел) и органические (древесная мука, бумага, хлопковые ткани) материалы. В зависимости от чувствительности пластмассы к нагреву различают *термопластичные* и *терморезистивные* пластмассы. Первые выдерживают неоднократный нагрев и формообразование, вторые после охлаждения застывают необратимо и последующей формовке не подлежат.

В технологии ЭВМ широко используются *полиэтилен* (пленочная изоляция), *фторопласт-4* (прокладки, клапаны, химически стойкие детали, трубы, шланги), *полистирол* (видовые детали, каркасы катушек, колпачки и т. п.), *полиамиды* (пленки, втулки, шестерни), *полиуретаны* (электрорадиоэлементы, работающие длительное время при высокой влажности и температуре до 373...423 К) и др.

Стеклами называют аморфные вещества, получаемые путем переохлаждения жидких растворов кислородсодержащих соединений и их смесей. Стекло в жидком состоянии представляет собой сложный расплав, имеющий высокую вязкость и состоящий из ионов и химических соединений кислых и основных оксидов. Главными стеклообразующими оксидами

являются SiO_2 , B_2O_5 , P_2O_5 , оксиды германия и мышьяка. Стекла обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Ситаллы – искусственные материалы микрокристаллического строения, получаемые из стекол путем направленной инициированной кристаллизации. Ситаллы, изготовленные из фоточувствительных стекол, называют *фотоситаллами*. В ситаллах сочетаются такие свойства, как высокая механическая прочность, твердость, термическая и химическая стойкость, хорошие электрические характеристики. В технологии ЭВМ применяют ситаллы: *установочные* (для изготовления микромодулей, прокладок, оснований и других элементов), *конденсаторные* (в качестве межслоевого диэлектрика) и *вакуумные* (для изготовления подложек гибридных микросхем и микросборок).

Керамику получают спеканием неорганических солей с минералами и оксидами металлов. Керамические материалы термостойки, характеризуются высокой механической прочностью, хорошими диэлектрическими свойствами, стабильны и надёжны в эксплуатации. Достоинством керамики является то, что она дает возможность получения заданных параметров материала путем изменения ее исходного состава. Основными составляющими керамики являются такие оксиды, как Al_2O_3 , MnO , Na_2O , SiO_2 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , CaO , MgO и др.

К *магнитным* материалам, применяемым для изготовления ЭВМ, относят металлические магнитные материалы, магнитодиэлектрики и ферриты. Из *металлических* магнитных материалов применяют различные сорта электротехнической стали, пермаллой. *Электротехническая сталь* выпускается в виде листов толщиной 0,35...0,50 мм, а некоторые ее сорта, например, Э310; Э320; Э330 – в виде лент толщиной до 0,003 мм. *Пермаллой* (сплав железа и никеля, например, 50НП – пермаллой с содержанием никеля 50 %) имеет значительно большую магнитную проницаемость, чем сталь, поэтому магнитопроводы из них имеют меньшие размеры и используются для изготовления трансформаторов переносной и малогабаритной аппаратуры.

Металлические магнитные материалы обладают низким удельным сопротивлением (10^{-5} ... 10^{-4} Ом·м) и не могут применяться для работы на высоких частотах из-за вихревых токов, вызывающих большие потери.

Для высокочастотной аппаратуры используются магнитопроводы из *магнитодиэлектриков*, у которых удельное сопротивление гораздо выше

(от 10^{-2} до 10^2 Ом·см). Магнитодиэлектрик представляет собой спрессованный порошок магнитного материала, частицы которого склеены изолирующим веществом. В качестве магнитного материала используют порошки карбонильного железа с диаметром частиц от 2 до 20 мкм, альсифер (сплав железа с кремнием и алюминием). Магнитодиэлектрики обладают небольшой магнитной проницаемостью.

Наименьшими потерями на больших частотах и высокой магнитной проницаемостью обладают соединения оксидов железа с оксидами других металлов (Ni, Zn, Mn, Cu, Cd), т. е. соединения типа $MOFe_2O_3$, где М – символ двухвалентного металла. Такие соединения названы *ферритами*. Ферриты имеют мелкозернистую кристаллическую структуру, механические свойства их близки к свойствам керамики.

Для изготовления элементов вычислительной техники используют магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса. К ним относятся пермаллой 50НП (50 % Ni), 65НП (65 % Ni), железоникелевокобальтовые сплавы, например, сплав 34НКМП (40 % Ni, 30 % Co).

3.2.2. Классификация методов формообразования деталей

Поскольку в технологии ЭВМ используется широкая гамма материалов, это приводит к необходимости разработки и применения разнообразных методов формообразования деталей из них (рис. 3.3).

В общем случае по виду подводимой в зону обработки энергии методы формообразования можно разделить на два класса:

- 1) механические;
- 2) электрофизические, электрохимические и химические.

Группа методов, основанных на снятии лишнего материала (припуска) с заготовки, относится к *разрушающим*. Недостатком этих методов является то, что удаленная с заготовки часть материала не подлежит восстановлению и идет в отходы. Поэтому они применяются в тех случаях, когда являются единственно возможными на данном этапе производства.

Другая группа – *неразрушающие методы*, основанные на перестройке внутренней структуры материала в результате пластической деформации или вязкого течения. Преимущества этих методов – высокая производительность, воспроизводимость и эффективность. Это обусловлено возможностью формообразования всего объема заготовки одновременно, многократным использованием рабочего инструмента, безотходностью процесса.

Однако неразрушающие методы применяются преимущественно при обработке пластичных материалов и вообще неприменимы, например, для монокристаллических полупроводников, поскольку при их использовании существенно нарушается структура материала.

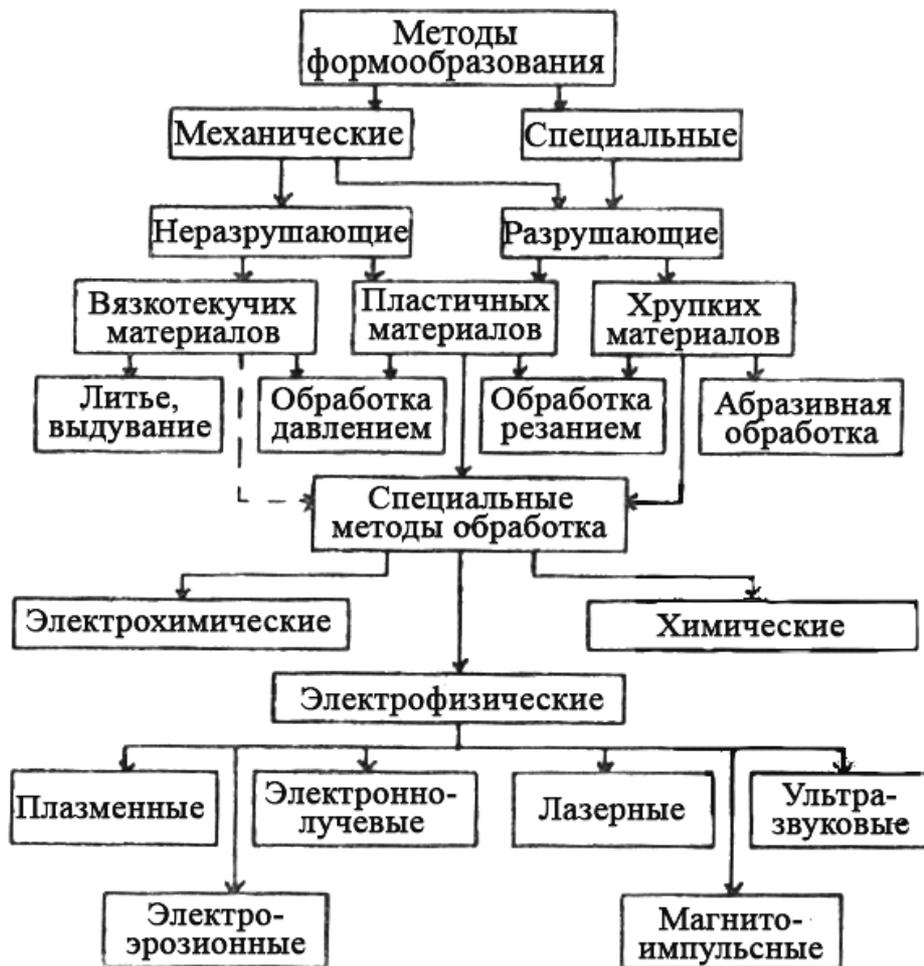


Рис. 3.3. Классификация методов формообразования

Качество процесса формообразования оценивается точностью изготовления детали и шероховатостью поверхности. Под *точностью обработки* понимается степень соответствия полученных в результате обработки размеров детали расчетным. Отклонение реальной детали от заданной по форме, размерам, взаимному расположению поверхностей и шероховатости называется погрешностью. Шкалу точностей образуют 19 рядов допусков, называемых *квалитетами*. Каждый квалитет обозначается порядковым номером, возрастающим с увеличением поля допуска: 01; 0; 1; ... 17.

ГОСТ 2789-73 устанавливает 14 классов шероховатости. Самая низкая шероховатость соответствует 14-му классу. Для более точного указания границ чистоты поверхности с 6-го по 14-й класс их разделяют на разряды.

3.2.3. Формообразование литьем

Методами литья в производстве конструкций ЭВМ изготавливаются детали сложной конфигурации из малопластичных и недеформируемых сплавов и из твердых материалов, трудно обрабатываемых механически.

При литье изделия и заготовки, называемые *отливками*, получают непосредственно в литейной форме после затвердевания залитого в форму расплавленного материала. Отверстия и другие внутренние полости в отливке выполняют путем установления стержней перед заливкой. Заливку выполняют по специальным каналам, которые образуют литниковую систему.

В технологии ЭВМ применяют преимущественно следующие виды литья: в оболочковые формы, в кокиль, под давлением, центробежное литье и литье по выплавляемым моделям.

Для примера рассмотрим *литье по выплавляемым моделям*. Этот метод отличается от других способов литья тем, что отливки изготавливаются в неразъемных формах, выполняемых по точным, неразъемным моделям. Материал формы в виде суспензии наносят на модель из легкоплавкого модельного состава (стеарин, парафин, церезин, полистирол), в результате чего образуется керамическая форма. При нагреве модельный состав расплавляется и вытекает из полости формы. Отсутствие разъемов в форме и удаление модели путем выплавления (горячей водой или воздухом) обеспечивают повышенную точность литья. Точность отливок по выплавляемым моделям достигает $\pm 0,05$ мм на 25 мм длины отливок, а толщина стенок может составлять от 0,3 до 0,8 мм.

Литье по выплавляемым моделям позволяет получать отливки 4 – 7-го классов точности с шероховатостью поверхности по 5 – 7-му классу.

3.2.4. Обработка давлением

Обработкой давлением называется технологический процесс изготовления детали или заготовки путем пластического деформирования исходного материала приложением внешнего усилия. Обработка может производиться как в холодном, так и в горячем состоянии исходного материала.

Горячая обработка производится при температуре выше температуры рекристаллизации и не сопровождается наклепом (упрочнение металла после пластической деформации в холодном состоянии). Поэтому пластическое деформирование в горячем состоянии может выполняться без ограничения степени деформации. Температура нагрева металла должна соответствовать его наибольшей пластичности.

Основные способы обработки давлением: прокатка, волочение, прессование, свободная ковка, объемная и листовая штамповка. В производстве ЭВМ наиболее широко используют прессование и листовую штамповку.

Прессованием называется пластическое деформирование металлов в закрытых контейнерах путем выдавливания в горячем состоянии через отверстие в инструменте-матрице. Профиль отверстия соответствует профилю изделия. Выдавливание заготовки через отверстие производят пуансоном (рис. 3.4).

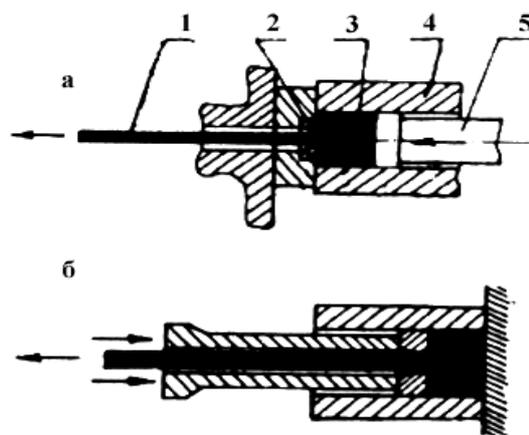


Рис. 3.4. Схемы прессования: а – прямой метод; б – обратный (1 – пруток; 2 – матрица; 3 – нагретый слиток; 4 – контейнер; 5 – пуансон)

Различают два вида прессования:

- прямое,
- обратное.

При *прямом прессовании* (рис. 3.4, а) матрицу монтируют с одной стороны контейнера, в котором помещена заготовка, а пуансон – с другой. Направление течения металла совпадает с направлением движения пуансона.

При *обратном прессовании* (рис. 3.4, б) пуансон делают полым, матрицу крепят на его конце. Металл вытекает через отверстие в направлении, обратном направлению движения пуансона. Метод требует меньших усилий, так как отсутствует трение заготовки о стенки контейнера, но конструкция оснастки усложнена. Необходимое усилие прессования определяется свойствами материала заготовки, габаритными и другими размерами изделия, конструкцией пресса и технологией. Для осуществления процесса используют гидравлические прессы, развивающие усилие более $1,5 \cdot 10^7$ Н.

Листовую штамповку применяют для получения деталей из листовых материалов. Технологический процесс листовой штамповки включает большое число разделительных операций: резку, вырубку, пробивку, надрезку, обрезку и зачистку. Резку листового материала обычно производят в холодном состоянии (кроме листов магния, титана и вольфрама).

После получения заготовок осуществляют формообразующие операции. К ним относятся: гибка и закатка края, вытяжка, правка, рельефная штамповка, обжим и др. Гибка может быть одно- и многоугловая. Гибкой закатывают края на плоских деталях, получают хомутики, трубочки и другие изделия.

Вытяжка – сложный процесс деформирования плоской или полый заготовки в полые изделия любой формы. Она производится в штампах, рабочими элементами которых являются пуансон и матрица (рис. 3.5). Нажатием пуансона заготовка постепенно вдавливаются в отверстие матрицы. В результате получается полое изделие. Отношение диаметра изделия к диаметру исходной заготовки называется коэффициентом вытяжки: $m = d/D$. Как правило, $m = 0,05...0,75$.

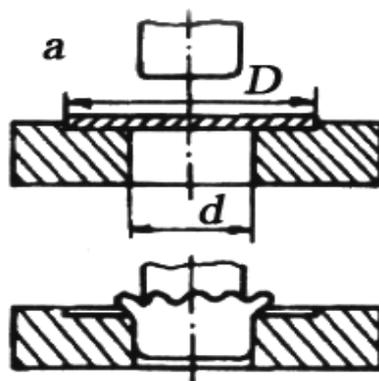


Рис 3.5. Схема вытяжки из тонколистового материала

Отдельные простые операции листовой штамповки объединяют и выполняют в одном штампе. Часто объединяют вырезку и пробивку, вырубку и вытяжку, вытяжку и формовку. Штампы по своему назначению подразделяются на вырубные, отрезные, пробивные, гибочные и др. Основным оборудованием при листовой штамповке являются прессы. Кривошипные, эксцентрикковые, винтовые и фрикционные прессы используют для получения изделий из тонких листов, гидравлические – из толстолиствого материала.

3.2.5. Методы изготовления деталей из пластмасс

К основным методам изготовления деталей из пластмасс относятся:

- компрессорное прессование,
- литьевое прессование,
- литье под давлением,
- пневматическое формование,
- вакуумное формование.

Отделку деталей, нарезание резьбы, изготовление отверстий малых диаметров выполняют механической обработкой резанием.

Компрессорное прессование. Исходные материалы в виде порошка, крошки, таблеток, гранул загружаются в пресс-формы и при повышенной температуре подвергаются сдавливанию пуансоном, который одновременно оформляет часть поверхности изделия. Температура прессования для терморезистивных полимерных материалов 413...473 К, для термопластичных 393...453 К. Давление зависит от текучести пресс-материала.

Литьевое прессование. Исходный материал доводится до пластичного состояния в отдельной загрузочной камере. Далее материал выдавливается из загрузочной камеры в формовочную часть матрицы пуансоном через литниковую систему. В закрытой рабочей полости матрицы материал выдерживается до затвердевания. Вынимается изделие путем разъема пресс-формы.

Преимущество литьевого прессования перед компрессорным – однородность структуры материала по всему объему. Это происходит вследствие равномерного размягчения исходного материала при его прохождении через литниковую систему. Благодаря равномерному прогреванию и хорошей текучести материала можно изготавливать изделия с глубокими отверстиями и различной толщиной стенок. Недостаток литьевого прессования – сложность конструкции пресс-формы.

Литье под давлением осуществляют в специальных литьевых машинах. В нагревательном цилиндре полимерный материал размягчают до состояния текучести, после чего он выталкивается плунжером в формообразующую полость литьевой формы. Остывает материал под давлением. Поскольку усадка полимерного материала намного больше усадки металла формы, изделие легко извлекается из нее. Таким методом из термопластичных полимерных материалов получают изделия сложной конфигурации с разной толщиной стенок, с ребрами жесткости, резьбами и другими конструктивными элементами.

Методами пневматического и вакуумного формования получают детали из листовых термопластов. Формовку детали осуществляют в нагретом состоянии в штампах. Охлаждение производят, не снимая внешнего усилия.

При *пневматическом формовании* предварительно нагретый до высокопластичного состояния лист пластмассы прижимается к поверхности

матрицы сжатым воздухом. Различают два вида пневматического формование: свободное и направленное. При свободном формовании материал деформируется за счет давления сжатого воздуха, при направленном сначала производят предварительную вытяжку пуансоном, а затем окончательную формовку сжатым воздухом.

Вакуумное формование осуществляют в матрице без пуансона. После разогрева листа из полости матрицы откачивается воздух. Под действием атмосферного давления лист прижимается к рабочей поверхности матрицы. После затвердевания материала изделие выталкивается сжатым воздухом.

Часто детали изготавливают из пластмасс с металлической арматурой в виде гаек, винтов, втулок, колец и т. д. Это упрощает их сборку и монтаж. Арматура используется также для проводящих элементов. Металлические детали устанавливают в пресс-форме перед прессованием и закрепляют. Надежное их закрепление производят различными способами: накаткой и кольцевыми выточками в штифтах и втулках, расплющиванием и загибанием проволоки, вырезами и отверстиями в лепестках и т. д.

3.2.6. Получение деталей из порошков

Материалы, изготавливаемые из порошков путем прессования и спекания без расплавления или с частичным расплавлением наиболее легкоплавкой составляющей, называют *порошковыми*. Методы порошковой металлургии служат для создания сплавов из металлов, не растворяющихся друг в друге при расплавлении, и сплавов металлов с неметаллическими материалами, например, керамикой. Процесс производства изделий из порошковых материалов заключается в получении порошка, составлении шихты, прессовании и спекании заготовок. Материалы в порошковой металлургии применяются в диспергированном состоянии с размерами частиц от 0,5 до 500 мкм. Для приготовления шихты дозированные порции порошков смешивают в специальных смесителях, добавляя спирт, воду, глицерин или бензин. Иногда в процессе перемешивания вводят технологические добавки: пластификаторы, облегчающие прессование (парафин, стеарин), легкоплавкие присадки, летучие вещества, обеспечивающие заданную пористость. Формование осуществляют прессованием, прокаткой, суспензионным литьем.

3.2.7. Электрофизические и электрохимические методы обработки

Электрофизические методы обработки материалов основаны на использовании в качестве рабочего инструмента различных видов энергии или специфических физических явлений, обусловленных энергией. К этим методам относятся: электроэрозионные, электронно-лучевые, плазменные, лазерные, ультразвуковые и др.

Электрофизические методы характеризуются рядом особенностей, выгодно отличающих их от механических:

1) независимость скорости, качества и производительности обработки от механических свойств обрабатываемых материалов (кроме ультразвуковой обработки). Возможность обработки материалов с любыми механическими свойствами без приложения существенных механических усилий. Производительность этих методов зависит от электрических, теплофизических и химических свойств материалов;

2) отсутствие необходимости в специальных инструментах или абразивах, более твердых, чем обрабатываемый материал. Большая плотность энергии, подводимой к заготовке, возможность ее локализации по площади и времени позволяют развить температуру в зоне обработки до десятков тысяч градусов, давление в сотни и тысячи атмосфер практически мгновенно;

3) значительное сокращение расходов материала, что особенно важно при обработке дорогостоящих материалов, таких, как германий, кремний, рубин, кварц, алмаз и другие монокристаллы;

4) высокая точность. Широкое использование для изготовления миниатюрных изделий, которые трудоемко или невозможно изготовить механическими способами.

Под *электрохимическими методами* обработки понимают процессы получения заданной формы и размеров детали путем растворения металла в электролите при прохождении через него электрического тока.

К *особенностям электрохимической размерной обработки* относятся:

1) высокая производительность, достигающая десятков тысяч кубических миллиметров в минуту и не имеющая принципиальных ограничений;

2) полное отсутствие износа электрода-инструмента. Электрод лишь задает конфигурацию и размеры детали, но не участвует в процессе растворения;

3) возможность повышения чистоты и точности обработки при одновременном повышении производительности. Этого невозможно добиться при использовании механических и электрофизических методов;

4) наличие механизма саморегулирования при растворении сплавов. Если возникает неоднородность растворения, выступающие грани начинают растворяться быстрее и процесс выравнивается по поверхности.

3.2.8. Электроэрозионная обработка материалов

Для обработки металлических материалов используются *электроэрозионные методы*. Они основаны на физическом явлении, при котором один или оба электрода разрушаются под действием проходящего между ними электрического разряда. При этом на их поверхности образуются лунки (рис. 3.6). Они возникают в результате локального разогрева электродов до температуры, намного превышающей температуру испарения материала электродов. При неоднократном повторении разрядов, возникающих в различных точках электрода-инструмента, последний внедряется в заготовку, образуя углубление – отпечаток поверхности и контура инструмента.

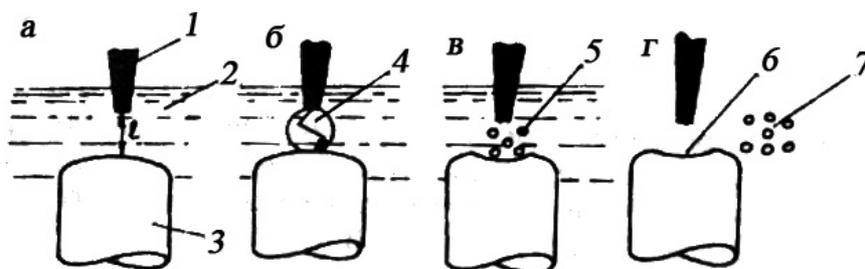


Рис. 3.6. Образование лунки под действием электрического разряда:
 а – до наступления разряда; б – возникновение разряда;
 в – расплавление и выброс жидкой фазы (расплавленного металла);
 г – результат воздействия разряда на материал анода;
 (1 – катод; 2 – рабочая жидкость; 3 – анод; 4 – газовая полость; 5 – жидкая фаза;
 6 – лунка; 7 – отходы материала; l – межэлектродное расстояние)

Основные разновидности электроэрозионного метода:

- электроискровой,
- электроимпульсный,
- высокочастотный электроимпульсный.

Интенсивность протекания электрической эрозии определяется в основном теплофизическими характеристиками материалов электрода (температурой и теплотой плавления и испарения, теплоемкостью и теплопроводностью). Важны электрические характеристики импульсов (энергия, длительность, частота следования) и свойства межэлектродной жидкости (электропроводность, текучесть, вязкость).

Процесс эрозии значительно усиливается в диэлектрической среде и имеет при этом ярко выраженный полярный характер, вследствие чего один электрод (инструмент) изнашивается значительно меньше другого (заготовки).

Электроэрозионная обработка широко используется для упрочнения и легирования поверхности, изготовления пресс-форм небольшого размера из сталей и твердых сплавов, сеток, гребенок и других деталей, для прошивки отверстий и систем отверстий, в том числе и криволинейных в труднообрабатываемых материалах (минимальный диаметр 0,1 мм), для маркировки деталей и т. д.

3.2.9. Электронно-лучевые методы обработки

Электронно-лучевые методы размерной обработки основаны на термических эффектах взаимодействия ускоренных электронов с твердым телом. Электронно-лучевой нагрев отличается от других видов нагрева в вакууме высокой плотностью энергии, выделяемой в материале, универсальностью, высоким коэффициентом полезного действия.

Электронный луч представляет собой направленный поток электронов, переносящий энергию от излучателя (эмиттера) электронов к изделию.

Из *основных видов размерной обработки* необходимо отметить:

1) получение отверстий в твердых материалах (алмазе, рубине, сапфире), работающих в качестве волок для изготовления микропроволоки и подшипников приборов точного времени;

2) прошивание отверстий в металлах, стекле, керамике, синтетических материалах для фильтров зонной очистки, сеток трафаретной печати, звукопоглощающих и охлаждающих элементов. При этом в немагнитных материалах можно получать криволинейные отверстия, изменяя траекторию луча магнитными полями;

3) гравировка на керамике с целью выполнения токоведущих дорожек или на сложных полупроводниках GaP, GaAs для элементов оптоэлектроники;

4) фрезерование металлов, графита, стекла, керамики, синтетических материалов для получения дифракционных решеток, миниатюрных деталей сложного профиля, масок для изготовления изделий микроэлектроники с различными формами отверстий;

5) резка различных диэлектрических материалов (скорость резки до 50 м/с, ширина реза более 25 мкм);

- б) разделение полупроводниковых и диэлектрических подложек микросхем на отдельные кристаллы и платы;
- 7) легирование полупроводников сплавлением примеси для изготовления полупроводниковых приборов.

3.2.10. Лазерная обработка материалов

В последние годы широкое применение для размерной обработки материалов находят методы, основанные на воздействии высококонцентрированными потоками энергии света, в частности излучением лазера. Лазер отличается высокой монохроматичностью (стабильностью частоты), направленностью и мощностью излучения. Наиболее широко для размерной обработки применяются твердотельные и газовые лазеры.

Большинство технологических операций, осуществляемых с помощью лазера, основаны на тепловом воздействии света на непрозрачные среды.

Размерную обработку полупроводников и диэлектриков можно вести только излучением с частотой $\nu \geq \Delta\varepsilon / h$. Если, $\nu \leq \Delta\varepsilon / h$, то такое излучение материалом практически не поглощается.

Особого рассмотрения требует процесс резки материалов непрерывным излучением лазера на CO_2 с поддувом газа, так называемый процесс газолазерной резки (рис. 3.7).

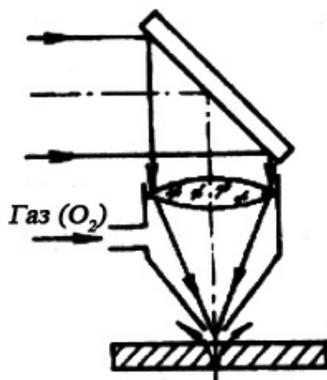


Рис. 3.7. Схема резака для газолазерной резки

Струя газа (чаще всего кислорода) выполняет тройную функцию. Сначала кислород способствует предварительному окислению металла и уменьшению его отражательной способности. Затем происходит переход к воспламенению и горению, причем теплота, выделяющаяся при экзотермической реакции, усиливает термическое действие лазерного излучения. Далее струя сдувает и уносит из зоны резки расплав и продукты сгорания, обеспечивая одновременно приток кислорода непосредственно к месту

резки. Последняя функция струи наиболее важная, т. к. это способствует получению чистого, качественного реза большой глубины; кроме того, струя резко сокращает время остывания металла.

Возможность фокусировки лазерного луча на малой площади, малый угол его расхождения, строгая направленность и способность проникать в замкнутые объемы через прозрачные стенки являются уникальными технологическими особенностями лазера, что дает возможность с успехом применять лазерные методы при размерной обработке, резке и сварке материалов.

Особое значение в технологии ЭВМ имеет *лазерная сварка*. Наиболее эффективные области применения лазерной сварки: сварка в труднодоступных местах, сварка легкодеформируемых деталей, сварка в условиях интенсивного теплоотвода, сварка деталей, требующих минимальной зоны термического влияния и максимальной технологической чистоты, сварка тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама, ниобия, тантала и др.).

3.2.11. Ультразвуковая обработка

Ультразвуковыми условно называют группу технологических процессов, осуществляемых с использованием механических упругих колебаний с частотой выше 16 кГц. Колебания нужны непосредственно для передачи энергии в зону обработки (размерная обработка материалов), и для интенсификации процессов, которые могут протекать и без них (интенсификация процессов очистки, электрохимических и химических процессов осаждения металлов).

Рассмотрим особенности ультразвуковой размерной обработки:

1). Ультразвуковые методы можно применять для размерной обработки только хрупких материалов. Наилучшим образом обрабатываются непрочные материалы (стекло, кремний, германий), в 2 – 4 раза медленнее стекла – феррит, кварц, рубин, в 40 раз медленнее – твердые сплавы.

2). Методы можно применять для обработки как проводящих, так и диэлектрических материалов.

3). Достигаются высокие чистота (до 9-го класса шероховатости) и точность (10 – 20 мкм) обработки.

Размерная ультразвуковая обработка свободным абразивом осуществляется за счет движения зерен абразивной суспензии в пространстве между инструментом и обрабатываемой поверхностью; абразивные зерна получают энергию от инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой.

Несмотря на ничтожно малую производительность одного удара инструмента, относительно высокая производительность ультразвуковой обработки обусловлена высокой частотой колебаний инструмента и большим количеством абразивных зерен (20...100 тыс./см³). Вязкие материалы обрабатываются плохо, т. к. зерна абразива вдавливаются в материал, а скалывания не происходит.

Ультразвуковая обработка используется для разделения хрупких материалов на части, изготовления сложных керамических панелей, прорезания пазов и отверстий в ферритовых сердечниках и других деталях ЭВМ.

3.2.12. Основы плазменной технологии

Плазма – состояние вещества, характеризующееся наличием свободных, не связанных в атомы электронов и ионов, – все шире используется в различных технологических процессах для нанесения, удаления и перераспределения вещества в твердом теле. Под *плазменной технологией* понимают технологические процессы, протекающие в объеме плазмы или при ее взаимодействии с поверхностью твердого тела. Если при этом наблюдаются химические превращения веществ, процессы называются *плазмохимическими*.

Для получения плазмы наиболее широко используют ионизацию в электрических разрядах при давлении $p = 10^0 \dots 10^{-4}$ Па. При указанных давлениях электроны в плазме имеют большую длину свободного пробега и приобретают достаточно высокую кинетическую энергию. В результате столкновения с молекулами или атомами рабочего вещества они передают им свою энергию.

Для осуществления многих технологических процессов применяют бомбардировку поверхности твердого тела ионами, вытянутыми из плазмы и ускоренными в направлении твердого тела. Бомбардировка сопровождается следующими эффектами: десорбцией газа с поверхности, удалением загрязнений, очисткой поверхности от тонкой оксидной пленки, образованием дефектов в приповерхностном слое, распылением материала, конденсацией и образованием пленки на поверхности, если поверхность бомбардируется ионами конденсирующегося вещества.

Таким образом, изменяя род плазмообразующего вещества и энергию ионов, можно проводить очистку поверхности, ее активацию и наносить всевозможные пленки.

Вопросы для самопроверки по теме 3.2

1. Перечислите группы материалов, применяемых в производстве ЭВМ.
2. Назовите металлические материалы, применяемых в производстве ЭВМ.
3. Дайте характеристику конструкционных материалов на основе железа.
4. Охарактеризуйте медь и сплавы на ее основе как конструкционный материал.
5. Охарактеризуйте алюминий и сплавы на его основе как конструкционный материал.
6. Перечислите виды полупроводниковых материалов, применяемых при изготовлении элементной базы.
7. Перечислите диэлектрические материалы. Приведите их виды, состав, особенности применения.
8. Назовите виды, состав и применение пластмасс.
9. Назовите особенности применения ситаллов.
10. Назовите особенности применения стекол.
11. Назовите особенности применения керамики.
12. Перечислите виды магнитных материалов, их свойства и применения.
13. Приведите классификацию методов формообразования деталей ЭВМ.
14. Назовите достоинства и недостатки разрушающих и неразрушающих методов формообразования.
15. Что такое точность обработки, качество?
16. Раскройте сущность метода литья по выплавляемым моделям.
17. Назовите основные способы и особенности техпроцесса обработки давлением.
18. Назовите особенности техпроцесса прессования.
19. Назовите особенности техпроцесса штамповки.
20. Назовите особенности техпроцесса вытяжки.
21. Назовите особенности техпроцесса компрессорного прессования.
22. Назовите особенности техпроцесса литьевого прессования.
23. Назовите особенности техпроцесса литья под давлением.
24. Назовите особенности техпроцесса пневматического прессования.
25. Назовите особенности техпроцесса вакуумного прессования.
26. Назовите отличительные черты метода порошковой металлургии.

27. Сравните электрофизические и механические методы обработки.
28. Приведите особенности электрохимической размерной обработки.
29. Назовите особенности электроэрозионной обработки.
30. Приведите отличительные черты электронно-лучевых методов размерной обработки.
31. Назовите особенности лазерной обработки материалов.
32. Назовите особенности ультразвуковой размерной обработки.
33. Назовите особенности плазменной технологии.

Тема 3.3. Проектирование и технология печатного монтажа

3.3.1. Общие понятия, классификационные признаки и основные конструкторско-технологические разновидности печатных плат

Печатные платы (ПП) – это элементы конструкции, которые состоят из плоских проводников в виде участков металлизированного покрытия, размещенных на диэлектрическом основании и обеспечивающих соединение элементов электрической цепи. Они получили широкое распространение в производстве модулей, ячеек и блоков ЭВМ благодаря следующим *преимуществам* (по сравнению с традиционным монтажом проводниками и кабелями):

- увеличение плотности монтажных соединений и возможность микроминиатюризации изделий;
- получение печатных проводников, экранирующих поверхностей в одном технологическом цикле;
- гарантированная стабильность и повторяемость электрических характеристик (проводимости, паразитных емкости и индуктивности);
- повышенная стойкость к климатическим и механическим воздействиям;
- унификация и стандартизация конструктивных и технологических решений;
- увеличение надежности;
- возможность комплексной автоматизации монтажно-сборочных и контрольно-регулирующих работ;
- снижение трудоемкости, материалоемкости и себестоимости.

К недостаткам печатного монтажа следует отнести сложность внесения изменений в конструкцию и ограниченную ремонтпригодность.

Элементами ПП являются: диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, монтажные и фиксирующие отверстия. Они должны соответствовать требованиям ГОСТ 23752-86 и отраслевых стандартов.

В настоящее время разработано большое число конструктивно-технологических разновидностей ПП. В зависимости от числа проводящих слоев ПП разделяются на:

- односторонние (ОПП),
- двусторонние (ДПП),
- многослойные (МПП);
- жесткие и гибкие платы (ГПП) – по конструктивному исполнению;
- платы с проводным монтажом (рис. 3.8).

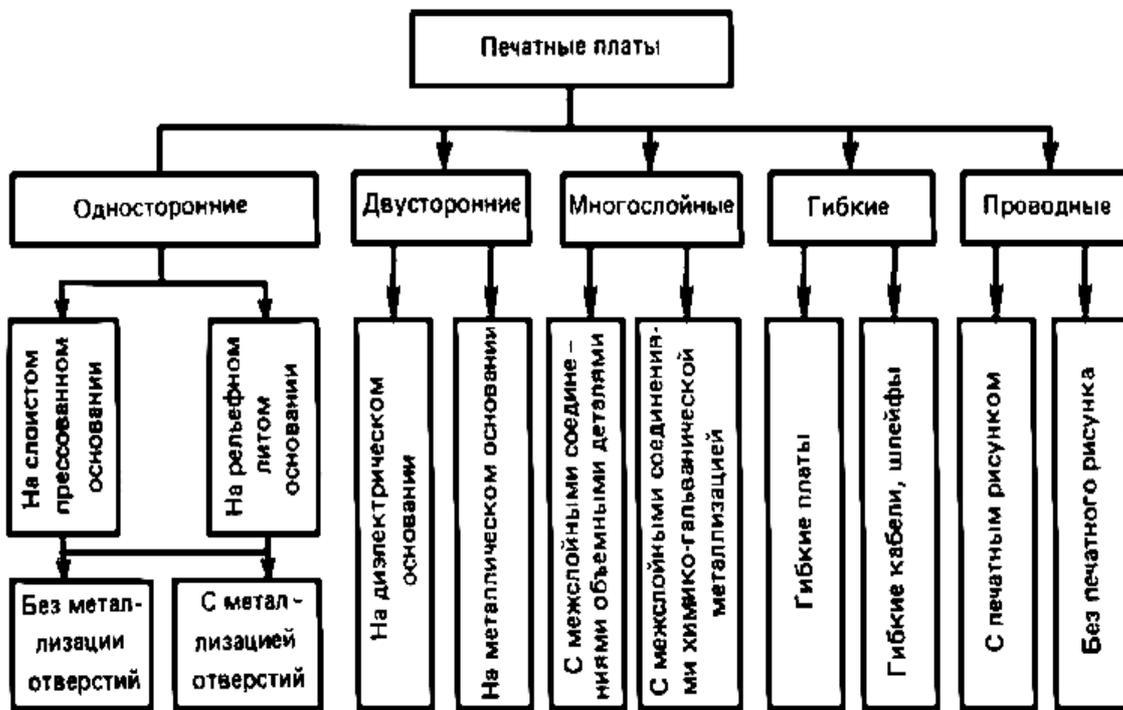


Рис. 3.8. Классификация печатных плат

ОПП выполняются на слоистом прессованном или рельефном литом основании без металлизации (рис. 3.9, а) или с металлизацией (рис. 3.9, б) отверстий. Платы на слоистом диэлектрике просты по конструкции и экономичны в изготовлении. Высокую технологичность и нагревостойкость имеют рельефные литые платы, на одной стороне которых расположен печатный монтаж, а на другой – объемные элементы. Более надежны в эксплуатации платы с металлизированными отверстиями.

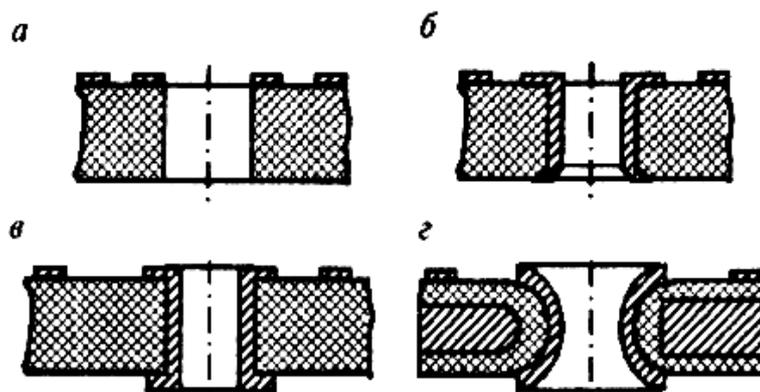


Рис. 3.9. Конструктивные варианты: а – ОПП на слоистом прессованном рельефном литом основании без металлизации отверстий; б – ОПП с металлизацией отверстий; в – ДПП на диэлектрическом основании; г – ДПП на металлическом основании

ДПП имеют проводящий рисунок на обеих сторонах диэлектрического (рис. 3.9, в) или металлического (рис 3.9, г) основания, а необходимые соединения выполняются с помощью металлизированных отверстий. Такие платы позволяют реализовать более сложные схемы, обладают повышенной плотностью монтажа и надежностью соединений, имеют лучший теплоотвод, однако требуют нанесения изоляционного покрытия и сложны в изготовлении. Расположение элементов печатного монтажа на металлическом основании позволяет решать проблему теплоотвода в мощной радиопередающей аппаратуре.

МПП состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводящего рисунка, соединенных клеевыми прокладками в монолитную структуру путем прессования. Электрическая связь между проводящими слоями выполняется перемычками, печатными элементами или химико-гальванической металлизацией. По сравнению с ОПП и ДПП многослойные ПП характеризуются повышенной плотностью монтажа и надежностью, устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям, уменьшением размеров конструкции и сокращением количества контактов. Соотношение трудоемкости изготовления плат ОПП:ДПП:МПП = 1 : 4 : 20. Большая трудоемкость изготовления, высокая точность рисунка и совмещения отдельных слоев, низкая ремонтпригодность и сложность технологического оборудования, высокая стоимость вынуждают применять МПП только для тщательно отработанных конструкций электронно-вычислительной, авиационной и космической аппаратуры. Классификация МПП приведена на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Классификация многослойных печатных плат

ГПП выполняются конструктивно как *ОПП* и *ДПП*, но на эластичном основании, и применяются для конструкций, подвергаемых вибрациям, изгибам, или когда плате, после установки ЭРЭ, необходимо придать компактную изогнутую форму. Разновидностью *ГПП* являются гибкие печатные кабели (*ГПК*), которые состоят из одного или нескольких слоев толщиной 0,06 – 0,3 мм с печатными проводниками и применяются для межблочного монтажа.

Проводные платы представляют собой диэлектрическое основание, на котором выполняют печатный монтаж или его отдельные элементы (контактные площадки, шины питания и заземления), а необходимые электрические соединения проводят изолированными проводами диаметром 0,1 – 0,2 мм. Трехслойная проводная плата эквивалентна по плотности монтажа восьмислойной *МПП*. Проводные платы нашли применение на этапах макетирования, разработки опытных образцов, в мелкосерийном производстве, когда проектирование и изготовление *МПП* неэкономично.

В соответствии с ГОСТ 23751-86 установлены пять классов точности для выполнения размеров элементов конструкций *ПП* (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов конструкции печатных плат

Параметр	Основные размеры элементов ПП для класса точности				
	1	2	3	4	5
Ширина проводника, t , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Расстояние между центрами (осями) проводников, S , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Ширина гарантированного пояса контактной площадки B , мм	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
Параметр, γ	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

Параметр γ представляет собой отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине печатной платы.

3.3.2. Методы изготовления ПП

Методы изготовления плат разделяют на три группы (рис. 3.11):

- субтрактивные,
- аддитивные,
- последовательного наращивания.



Рис. 3.11. Методы изготовления коммутационных плат и нанесения рисунка

При *субтрактивных* методах (от лат. *substratio* – отнимание) проводящий рисунок образуется путем удаления фольги с незащищенных участков поверхности. Для этого на фольгированный диэлектрик наносится рисунок схемы, а незащищенные участки фольги стравливаются. Дополнительная химико-гальваническая металлизация монтажных отверстий позволяет получать двусторонние платы комбинированными методами. К недостаткам субтрактивного химического метода относятся значительный расход меди и наличие бокового подтравливания элементов печатных проводников, что уменьшает адгезию фольги к основанию.

Указанного недостатка лишен *аддитивный* (от лат. *additio* – прибавление) метод изготовления ПП, основанный на избирательном осаждении химической меди на нефольгированный диэлектрик. При этом используют диэлектрик с введенным в его состав катализатором и адгезивным слоем на поверхности. Платы, изготовленные аддитивным методом, имеют высокую разрешающую способность (проводники шириной до 0,1 мм), затраты на производство таких плат ниже – экономятся медь, химикаты для травления и улучшается экологическая обстановка на предприятиях. Аддитивный метод имеет более высокую надежность, т. к. проводники и металлизацию отверстий получают в едином химико-гальваническом процессе, устраняется подтравливание элементов печатного монтажа. Однако применение аддитивного метода в массовом производстве ограничено низкой производительностью процесса химической металлизации, интенсивным воздействием электролитов на диэлектрик, недостаточной адгезией проводников.

При *полуаддитивном*, или химико-гальваническом, методе на диэлектрическом основании сплошной токопроводящий слой получают химическим осаждением, а затем усиливают его до необходимой толщины в местах расположения печатных проводников и контактных площадок электрохимическим методом. В этом случае достигается лучшая адгезия рисунка ПП к диэлектрику (прочность на отрыв в 1,5 раза выше, чем у аддитивного). Толщина меди получается одинаковой на всех участках плат и в металлизированных отверстиях.

Метод *последовательного наращивания* применяют при формировании многослойной структуры на керамической плате, состоящей из чередующихся изоляционных и проводящих слоев. В изоляционных слоях в местах создания межслойных переходов выполняют окна, через которые при нанесении следующего проводящего слоя формируется электрическое межслойное соединение. При использовании толсто пленочной технологии изоляционные и проводящие составы наносят путем трафаретной печати и затем вжигают. Преимущества этого метода – высокая надежность плат, большая гибкость при изменениях схемы, незначительные затраты на обо-

рудование. Недостатки – наличие операции вжигания, невысокая производительность процесса.

Базовыми технологическими процессами (ТП) в производстве ПП являются: нанесение рисунка схемы на основание; получение рисунка схемы (травление, электрохимическая металлизация); механическая обработка плат (сверление, пробивка отверстий); защита печатных проводников для обеспечения пайки; контроль параметров печатных проводников.

3.3.3. Материалы для изготовления ПП

Физико-механические свойства материалов должны удовлетворять установленным техническим условиям и обеспечивать качественное изготовление ПП в соответствии с типовыми ТП.

Для изготовления плат применяют *слоистые пластики* – фольгированные диэлектрики, плакированные электролитической медной фольгой. В качестве основы в слоистых пластиках используют: *гетинакс* (спрессованные слои электроизоляционной бумаги, пропитанные фенольной смолой), *стеклотекстолиты* (спрессованные слои стеклоткани, пропитанные эпоксифенольной смолой), и другие материалы (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Основные материалы для изготовления печатных плат

Материал	Марка	Толщина		Область применения
		фольги, мкм	материала, мм	
<i>Гетинакс:</i>				
фольгированный	ГФ-1(2)	35; 50	1-3	ОПП
огнестойкий	ГПФ-2-50Г	50	1-3	ДПП
влагостойкий	ГОФВ-2-35	35	1-3	ДПП
<i>Стеклотекстолит:</i>				
фольгированный	СФ-1(2)	35; 50	0,8-3	ОПП, ДПП
с адгезионным слоем	СТЭК	-	1,0-1,5	ДПП
с тонкой фольгой	СТПА-1	5	0,1-3	ОПП, ДПП
<i>Фольгированный диэлектрик:</i>				
тонкий	ФДТ-1	50	0,5	МПП
для МПП	ФДМ-1(2)	35	0,2-0,35	МПП
для микроэлектроники	ФДМЭ-1(2)	35	0,1-0,3	МПП
<i>Лавсан фольгированный</i>				
	ЛФ-1	35	0,05	ГПК
	ЛФ-2	50	0,1	ГПК
<i>Фторопласт:</i>				
фольгированный	ФФ-4	50	1,5-3	ДПП
армированный	ФАФ-4Д	50	0,5-3	ГПК
<i>Полиимид фольгированный</i>				
	ПФ-1	35	0,05	ГПП
	ПФ-2	50	0,1	ГПК

Гетинакс, обладая удовлетворительными электроизоляционными свойствами в нормальных климатических условиях, хорошей обрабатываемостью и низкой стоимостью, нашел применение в производстве бытовой РЭА. Для ПП, эксплуатируемых в сложных климатических условиях с широким диапазоном рабочих температур ($-60 \dots +180$ °С) в составе электронно-вычислительной аппаратуры, техники связи, измерительной техники, применяют более дорогие *стеклотекстолиты*. Они отличаются широким диапазоном рабочих температур, низким ($0,2 \dots 0,8$ %) водопоглощением, высокими значениями объемного и поверхностного сопротивлений, стойкостью к короблению. Недостатки – возможность отслаивания фольги при термоударах, наволакивание смолы при сверлении отверстий. Для изготовления фольгированных диэлектриков используется в основном электролитическая медная фольга, одна сторона которой должна иметь гладкую поверхность (не ниже восьмого класса чистоты) для обеспечения точного воспроизведения печатной схемы, а другая должна быть шероховатой с высотой микронеровностей не менее 3 мкм для хорошей адгезии к диэлектрику.

Керамические материалы характеризуются высокой механической прочностью, которая незначительно изменяется в диапазоне температур ($20 \dots 700$ °С), стабильностью электрических и геометрических параметров, низкими (до 0,2 %) водопоглощением и газовыделением при нагреве в вакууме, однако являются хрупкими и имеют высокую стоимость.

В качестве *металлической* основы плат используют сталь, медь, титан, алюминий. На металлических основаниях изолирование токоподводящих участков осуществляют с помощью специальных эмалей, легкоплавким стеклом. Изолирующий слой на поверхности алюминия получают анодным оксидированием. Такие основания характеризуются повышенной теплопроводностью, конструкционной прочностью, ограничениями по быстройдействию из-за сильной связи проводников с подложкой.

В качестве основы для ПП СВЧ-диапазона используют неполярные (фторопласт, полиэтилен, полипропилен) и полярные (полистирол, полифениленоксид) *полимеры*. Для изготовления микроплат и микросборок СВЧ-диапазона применяют керамические материалы, имеющие стабильные электрические характеристики и геометрические параметры.

Полиимидная пленка используется для изготовления гибких плат, обладающих высокой прочностью на растяжение, химической стойкостью,

несгораемостью. Она имеет наиболее высокую среди полимеров температурную устойчивость, т. к. не теряет гибкости от температур жидкого азота до температур эвтектической пайки кремния с золотом (400 °С). Кроме того, она характеризуется низким газовыделением в вакууме, радиационной стойкостью, отсутствием наволакивания при сверлении. Недостатки – повышенное водопоглощение и высокая стоимость.

3.3.4. Формирование рисунка схемы

Нанесение рисунка схемы или защитного рельефа требуемой конфигурации необходимо при осуществлении процессов металлизации и травления. Рисунок должен иметь четкие границы с точным воспроизведением тонких линий, быть стойким к травильным растворам, не загрязнять платы и электролиты, легко сниматься после выполнения своих функций. Перенос рисунка печатного монтажа на фольгированный диэлектрик осуществляют методами сеткографии, офсетной печати и фотопечати. Выбор метода зависит от конструкции платы, требуемой точности и плотности монтажа, серийности производства.

Сеткографический метод нанесения рисунка схемы наиболее рентабелен для массового и крупносерийного производства плат при минимальной ширине проводников и расстоянии между ними $\geq 0,5$ мм, точность воспроизведения изображения $\pm 0,1$ мм. Суть метода заключается в нанесении на плату специальной кислотостойкой краски путем продавливания ее резиновой лопаткой (ракелем) через сетчатый трафарет, в котором необходимый рисунок образован открытыми ячейками сетки (рис. 3.12).

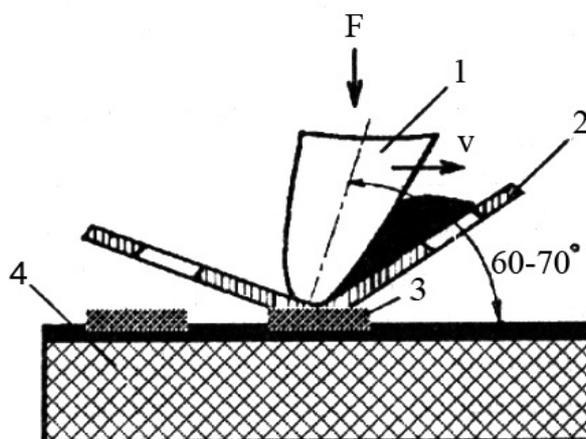


Рис. 3.12. Принцип трафаретной печати
(1 – ракель; 2 – трафарет; 3 – краска; 4 – основание)

Для изготовления трафарета используют металлические сетки из нержавеющей стали, полиэфирных волокон и капрона. Одним из недостатков сеток является их растяжение при многократном использовании.

Для получения рисунка ПП используют термоотверждающиеся краски СТ 3, 5; СТ 3, 12, которые сушат либо в термошкафу при температуре 60 °С в течение 40 мин, либо на воздухе в течение 6 ч, что удлиняет процесс сеткографии. Более технологичными являются фотополимерные композиции ЭП 918 и ФКП-ТЗ с ультрафиолетовым отверждением в течение 10...15 сек, что является решающим фактором при автоматизации процесса.

Офсетная печать применяется для крупносерийного производства ПП при малой номенклатуре схем. Разрешающая способность 0,5 – 1 мм, точность получаемого изображения составляет $\pm 0,2$ мм. Суть метода состоит в изготовлении печатной формы (клише), на поверхности которой формируется рисунок платы. Форма закатывается трафаретной краской с помощью специального валика, а затем печатный цилиндр, покрытый слоем офсетной резины, переносит краску с формы на подготовленную поверхность основания платы (рис. 3.13).

Точность печати и резкость контуров определяются параллельностью валика и основания, типом и консистенцией краски. С помощью одного клише можно выполнить неограниченное число оттисков. Производительность метода ограничена длительностью колебательного цикла (нанесение краски – перенос) и не превышает 200...300 оттисков в час. Недостатки метода: длительность процесса изготовления клише, сложность изменения рисунка схемы, трудность получения беспористых слоев, высокая стоимость оборудования.

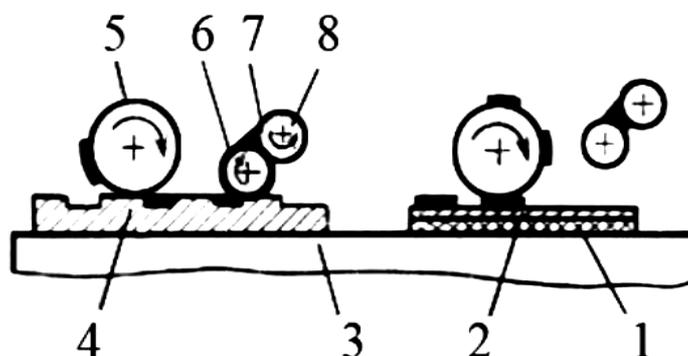


Рис. 3.13. Схема установки офсетной печати

(1 – диэлектрик; 2 – медная фольга; 3 – основание; 4 – печатная форма; 5 – офсетный цилиндр; 6 – валик для нанесения краски; 7 – краска; 8 – прижимной валик)

Фотографический метод нанесения рисунка позволяет получать минимальную ширину проводников и расстояния между ними 0,1...0,15 мм с точностью воспроизведения до 0,01 мм. С экономической точки зрения этот способ менее рентабельный, но позволяет получать максимальную разрешающую способность рисунка и поэтому применяется в мелкосерийном и серийном производстве при изготовлении плат высокой плотности и точности. Способ основан на использовании светочувствительных композиций, называемых фоторезистами (негативные и позитивные), которые должны обладать: высокой чувствительностью; высокой разрешающей способностью; однородным по всей поверхности беспористым слоем с высокой адгезией к материалу платы; устойчивостью к химическим воздействиям; простотой приготовления, надежностью и безопасностью применения.

Фоторезисты разделяются на негативные и позитивные; сухие и жидкие. Негативные фоторезисты под действием излучения образуют защитные участки рельефа в результате фотополимеризации и задубливания. Освещенные участки перестают растворяться и остаются на поверхности подложки. Позитивные фоторезисты передают рисунок фотошаблона без изменений. При световой обработке экспонированные участки разрушаются и вымываются.

Типовые техпроцессы изготовления односторонних, двуслойных ПП приведены на рис. 3.14 и рис. 3.15. Последовательность основных операций изготовления МПП на полиимидной пленке приведена на рис. 3.16.

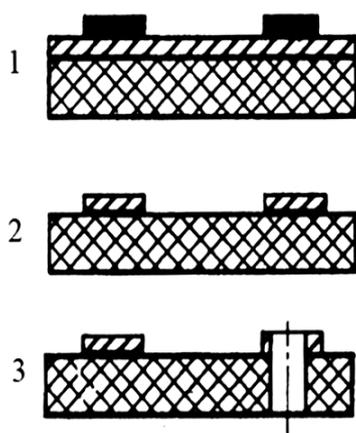


Рис. 3.14. Схема технологического процесса изготовления ОПП:
1 – нанесение защитного рисунка; 2 – получение проводников; 3 – выполнение отверстий

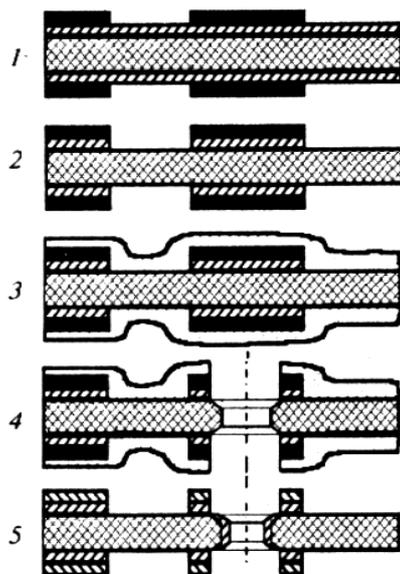


Рис. 3.15. Схема процесса изготовления ДПП комбинированным негативным методом
(1 – нанесение защитного рисунка;
2 – травление меди;
3 – нанесение лака;
4 – сверление и зенкование отверстий;
5 – металлизация отверстий)

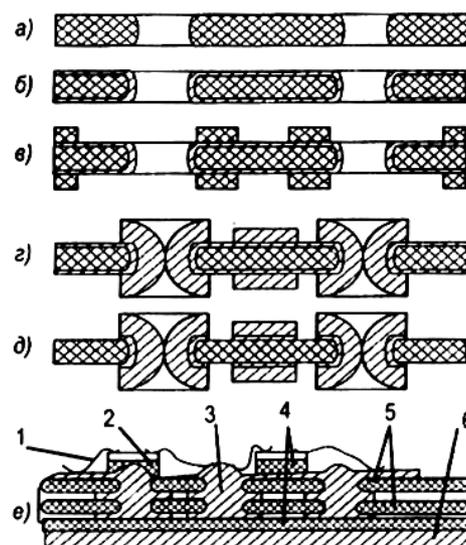


Рис. 3.16. Последовательность основных операций изготовления МПП на полиимидной пленке:

- а – пленка с протравленными отверстиями;
- б – пленка с нанесенным подслоем;
- в – нанесение защитного слоя фоторезиста;
- г – наращивание слоя меди 15...20 мкм;
- д – стравливание подслоя;
- е – структура из спаянных слоев
(1 – внешние выводы бескорпусной ИС;
2 – кристалл; 3 – вакуумный спай через металлизированные отверстия; 4 – клей;
5 – двусторонние полиимидные платы;
6 – алюминиевое основание)

3.3.5. Методы коммутации

В мелкосерийном производстве на этапе разработки опытных образцов применяют комбинированные методы монтажа: многопроводный упорядоченный фиксируемыми проводами, многопроводный неупорядоченный, стежковый неупорядоченный (рис. 3.17, 3.18).

Стежковый монтаж заключается в прокладывании изолированных проводов по кратчайшим расстояниям на поверхности ДПП и в монтажных отверстиях с образованием петель и последующим подпаиванием их к контактному площадкам платы. Процесс осуществляется на станках с ЧПУ.

Новым направлением в технике монтажа является применение *тканых коммутационных устройств* (ТКУ) – рис.3.20, представляющих собой тканый материал, изготовленный из электропроводящих и диэлектриче-

ских нитей, с закрепленными на нем ЭРЭ и ИМС. ТКУ изготавливаются на ткацких автоматах, дополнительно снабженных механизмами подачи и натяжения электропроводящих и диэлектрических нитей, а также петлеобразования. После изготовления ТКУ им придают жесткость. Соединение электрических проводников в контактных узлах и присоединение навесных ЭРЭ осуществляются контактной микросваркой.

Наиболее распространенными методами коммутации функциональных модулей микроэлектронной аппаратуры (МЭА) являются многослойные печатные платы, толстопленочная многослойная разводка, разводка на многослойной керамике, толстопленочная многослойная разводка на жестких и гибких платах.

Толстопленочная многослойная разводка выполняется путем последовательного нанесения на жесткую диэлектрическую подложку проводящих и диэлектрических паст методом трафаретной печати и последующего их вжигания.

Многослойные коммутационные платы на керамической подложке получают путем прессования, литьем под давлением, отливкой пленок.

Многослойная разводка на гибких полимерных платах позволяет принимать форму корпуса любой конфигурации, обеспечивает малую толщину и массу, ударопрочность. Она эффективна при создании межъячеечной и межблочной коммутации. К недостаткам полиимидных пленок можно отнести несколько повышенное водопоглощение и относительно высокую стоимость их производства, которая не столь существенна для изделий микроэлектронной аппаратуры ввиду малой массы потребляемого материала.

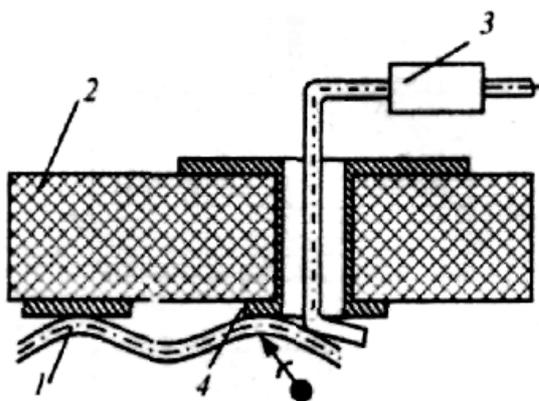


Рис. 3.17. Схема проводного монтажа незакрепленными проводами (1 – провод, 2 – основание платы, 3 – электрорадиоэлементы, 4 – монтажные площадки)

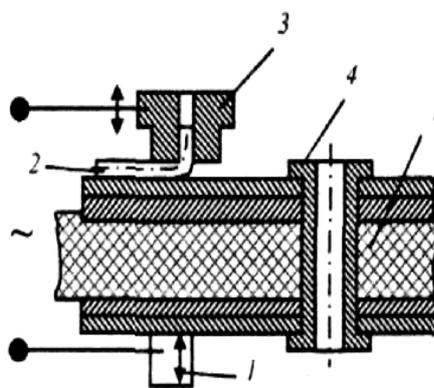


Рис. 3.18. Схема сварки монтажных проводов (1, 3 – электроды, 2 – провод, 4 – монтажная площадка, 5 – плата)

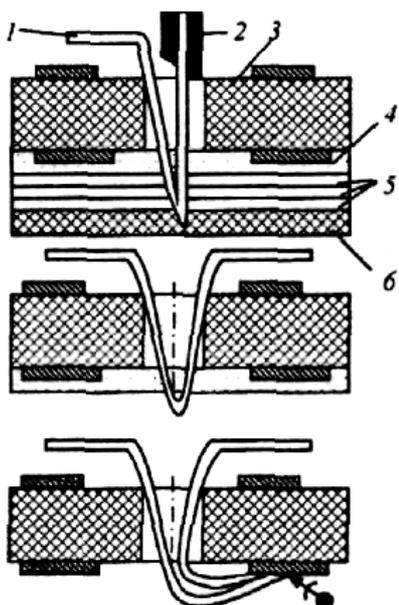


Рис. 3.19. Схема стежкового монтажа
(1 – провод; 2 – игла, 3 – плата;
4 – кабельная бумага;
5 – пакет резиновых прокладок,
6 – защитный слой)

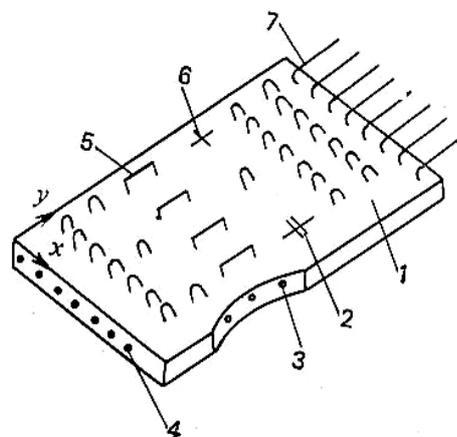


Рис. 3.20. Структура тканого устройства коммутации
(1 – многослойное изоляционное поле;
2,3 – электропроводящие нити;
4 – монтажные узлы; 5 – петли;
6 – контактные площадки; 7 – удлиненные выводы для подсоединения к разъёмам)

3.3.6. Типовые процессы изготовления печатных плат

Базовые технологические процессы изготовления ОПП и ДПП состоят из набора типовых технологических операций. Выбор операций определяется требованиями, предъявляемыми к готовым печатным платам, производительностью оборудования, условиями производства и экономической эффективностью процесса. Ниже рассмотрены назначение и основные методы выполнения технологических операций изготовления печатных плат.

Входной контроль материалов на предприятии – изготовителе ПП служит для обеспечения гарантированного качества получаемой продукции. При этом определяется соответствие физико-механических и эксплуатационных свойств материалов техническим условиям.

При *изготовлении заготовок* их размеры определяются требованиями чертежа и наличием по всему периметру заготовки технологического поля. На последнем выполняются фиксирующие отверстия для базирования деталей в процессе изготовления и тестовые элементы. Ширина технологического поля не превышает 10 мм для ОПП и ДПП и 20...30 мм для МПП. Малогабаритные платы размещают на групповой заготовке с расстоянием между ними 5...10 мм.

Подготовка поверхности заготовки включает очистку исходных материалов от оксидов, жировых пятен, смазки и других загрязнений, специальную обработку диэлектриков, контроль качества выполнения операций. В зависимости от характера и степени загрязнений очистку проводят механическими, химическими, электрохимическими, плазменными и другими методами или их сочетанием.

Получение защитного рисунка на поверхности платы в виде печатных элементов и пробельных мест осуществляется способами фотопечати, сеткографии и офсетной печати. Полученный рисунок контролируется визуально и с помощью различных оптических приборов на отсутствие дефектов. При обнаружении незначительных дефектов (пор, трещин, отверстий) их ретушируют лаком, а при невозможности восстановления брака наносят повторно.

Сенсибилизация и активирование поверхности применяются для придания диэлектрическому материалу способности к металлизации, т. е. формирования на нем каталитически активного слоя.

Химическое меднение – первый этап металлизации поверхностей заготовок и стенок монтажных отверстий.

Гальваническая металлизация применяется для усиления слоя химической меди, нанесения металлического резиста, создания на концевых печатных контактах специальных покрытий из палладия, золота, серебра, родия или сплавов на их основе. Гальваническое меднение проводят сразу после химического.

Травление меди – это процесс избирательного ее удаления с непроводящих (пробельных) участков для формирования проводящего рисунка печатного монтажа. Его проводят в растворе на основе хлорного железа, персульфата аммония, хлорной меди, перекиси водорода, хромового ангидрида, хлорида натрия. Выбор травильного раствора определяется типом применяемого резиста, скоростью травления, размерами бокового подтравливания, возможностью регенерации и экономичностью всех стадий процесса. Наибольшее распространение в производстве печатных плат получили травильные растворы на основе хлорного железа. Они отличаются высокой и равномерной скоростью травления, малым боковым подтравливанием, высокой четкостью получаемых контуров, незначительным содержанием токсичных веществ, экономичностью.

Обработка монтажных отверстий производится с высокой точностью на специализированных одношпиндельных и многошпиндельных сверлильных станках с ЧПУ. От качества выполнения этой операции зави-

сит качество последующих операций металлизации, а следовательно, и качество платы в целом. Сверление отверстий выполняют специальными спиральными сверлами из металлокерамических твердых сплавов.

Металлорезист наносят комбинированным позитивным фотохимическим методом. Он предназначен для защиты рисунка печатного монтажа при травлении, что обеспечивает более высокое качество изделий, чем при использовании фоторезистов, улучшает и сохраняет паяемость контактных поверхностей. В качестве металлорезиста применяют золото, серебро, никель, олово и сплавы на их основе. Широкое применение в промышленности вследствие своей экономичности получили сплавы: олово-свинец, олово-никель, олово-висмут и некоторые другие. Их наносят на поверхности заготовок электрохимическим способом.

Обработка заготовок по контуру производится после полного изготовления платы. Чистовой контур получают штамповкой, обработкой на гильотинных ножницах, на танках с прецизионными алмазными пилами и фрезерованием.

Выходной контроль платы предназначен для определения степени ее соответствия требованиям чертежа и техническим условиям. Осуществляется выходной контроль внешнего вида, инструментальный контроль геометрических размеров, оценка точности выполнения отдельных элементов, проверка металлизации отверстий, определение целостности токопроводящих цепей и сопротивления изоляции.

3.3.7. Контроль качества и диагностика плат

С развитием и усложнением конструкций ПП и МПП возрастает сложность ТП, потребность в более эффективных методах и средствах контроля. Основными мерами повышения качества ПП и МПП являются: организация входного контроля материалов, межоперационный контроль, выходной контроль качества изделий. Весьма важным является тщательный контроль наиболее ответственных операций ТП (травление, металлизация, склеивание и др.), которые оказывают влияние на все остальные операции и автоматизация процесса контроля.

Классификацию методов контроля можно провести по следующим признакам:

- 1) по физической сути метода:
 - оптический,
 - рентгеновский,
 - тепловой,

- электрофизический,
 - электрический,
 - радиотехнический,
 - металлографический,
 - радиационный,
 - ультразвуковой;
- 2) по видам связи с контролируемым объектом:
- контактные,
 - бесконтактные;
- 3) по характеру воздействия на платы:
- разрушающие,
 - неразрушающие;
- 5) по степени определения дефектов:
- контроль работоспособности (явный дефект),
 - диагностический (скрытый дефект),
 - прогнозирующий.

Оптический метод контроля прост и нагляден, имеет высокую разрешающую способность. Недостаток его в субъективности и низкой производительности. Используются микроскопы МБС-2, МИИ-4, МРР-2Р, растровый электронный микроскоп МРЭМИ-2 и др.

Рентгеновский метод применяется для контроля токопроводящих цепей МПП и подразделяется на рентгенотелевизионный, стереорентгенографии и томографии. Наибольшее распространение получил рентгенотелевизионный метод с использованием рентгенотелевизионных микроскопов МТР-1, МТР-3, МТР-4. Данный способ позволяет выявлять характер, вид и местонахождение дефектов. Однако он обладает недостаточной разрешающей способностью для МПП и низкой производительностью контроля. Стереорентгенография применяется при выявлении разрывов печатных проводников после прессования и в готовой плате. Томография обладает возможностью контроля межслойных изображений, его применяют для послойного контроля токопроводящих цепей МПП.

Тепловой контроль токопроводящих цепей МПП основан на измерении градиента температуры в местах локализации дефекта при нагреве, который осуществляется за счет пропуска тока через контролируемую цепь. С помощью данного метода можно обнаружить следующие дефекты печатного монтажа: пористость металлизации, короткое замыкание, утонение (подтравливание) проводников, пониженное сопротивление изоляции.

Вопросы для самопроверки по теме 3.3

1. Дайте определение печатной платы.
2. Назовите преимущества и недостатки печатного монтажа по сравнению с традиционным монтажом.
3. Приведите конструктивно-технологические разновидности печатных плат. Охарактеризуйте различные виды печатных плат.
4. Приведите отличительные черты и особенности применения проводных плат.
5. Назовите методы изготовления коммутационных плат.
6. Назовите особенности субтрактивных методов изготовления печатных плат.
7. Назовите особенности аддитивных и полуаддитивного методов изготовления печатных плат.
8. Назовите сущность метода последовательного наращивания.
9. Назовите основные группы материалов, применяемых для изготовления печатных плат.
10. Сравните характеристики гетинакса и стеклотекстолита.
11. Назовите основные характеристики керамических материалов, применяемых для изготовления печатных плат.
12. Какие металлы применяют для изготовления оснований печатных плат? Назовите особенности их применения.
13. Какие материалы применяют для изготовления печатных плат СВЧ-диапазона?
14. Назовите материалы, применяемые для изготовления гибких печатных плат.
15. Назовите методы формирования рисунка печатных плат. Сравните их.
16. Изложите суть сеткографического метода формирования рисунка ПП.
17. Изложите суть метода офсетной печати.
18. Изложите суть фотографического метода формирования рисунка ПП.
19. Приведите схему типового техпроцесса изготовления ОПП.
20. Приведите схему типового техпроцесса изготовления МПП аддитивным методом.
21. Приведите схему типового техпроцесса изготовления МПП на полиимидной пленке.

22. Назовите комбинированные методы монтажа, применяемые в мелкосерийном производстве. Сравните их.

23. Назовите типовые технологические операции процесса изготовления ОПП и ДПП. Охарактеризуйте их.

24. Дайте классификацию методов контроля качества ПП.

25. Дайте характеристику оптического, рентгеновского и теплового методов контроля.

Тема 3.4. Базовые технологические процессы изготовления интегральных микросхем

3.4.1. Классификация интегральных микросхем

Микросхемы составляют основу элементной базы ЭВМ. Они, являясь исходными унифицированными неделимыми конструктивными элементами, не только определяют эффективность, качество и другие характеристики устройств ЭВМ, но и влияют на конструктивную реализацию модулей последующих иерархических уровней.

Под *интегральной микросхемой* (ИМС) понимается микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматриваются как единое целое.

Интегральные микросхемы можно классифицировать по различным признакам:

- по виду обрабатываемого сигнала,
- по конструктивно-технологическому исполнению,
- по степени унификации и назначению,
- по наличию и отсутствию корпуса,
- по степени интеграции и т. п.

По виду обрабатываемого сигнала ИМС делятся на аналоговые и цифровые. Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Устройства ЭВМ в основном реализуются на цифровых ИМС, в которых осуществляется преобразование и обработка сигналов по закону дискретной функции.

По конструктивно-технологическому исполнению ИМС делятся на три большие группы: полупроводниковые, гибридные и прочие. В группу прочих входят пленочные, керамические, вакуумные и другие ИМС.

По степени унификации и назначению различают ИМС общего применения (массового назначения) и частного применения.

Чрезвычайно важными характеристиками ИМС и микросборок являются плотность упаковки и степень интеграции. *Плотность упаковки ИМС* – это отношение числа элементов и компонентов ИМС к ее объему. *Степень интеграции k* определяет сложность ИМС:

$$k = \lg(N),$$

где N – число элементов и компонентов, входящих в ИМС.

По степени интеграции различают ИМС первой степени интеграции (ИМС1 содержат до 10 элементов), второй степени интеграции (ИМС 2 – свыше 10 до 100 элементов), ИМС третьей и более высокой степени интеграции обычно называют *большими* (БИС).

По особенностям конструкции элементов защиты ИМС от внешних воздействий (влаги, газы, пыль, механические воздействия, радиация и т. п.) различают корпусированные и бескорпусные ИМС.

3.4.2. Особенности создания конструкций интегральных микросхем и их технологии

Интегральные микросхемы обладают по сравнению с дискретными активными и пассивными ЭРЭ рядом особенностей, которые необходимо учитывать при их конструктивно-технологической реализации:

1) дискретные ЭРЭ могут выполнять законченные функции электрической схемы лишь при совместном их использовании, в то время как ИМС являются самостоятельными функционально сложными электронными приборами;

2) в конструкциях ИМС предпочтительнее использовать активные элементы, а не пассивные (резисторы, и особенно конденсаторы занимают большую площадь по сравнению с активными при реализации их в ИМС);

3) параметры элементов ИМС сильно взаимосвязаны, поскольку элементы расположены на близком расстоянии, а в полупроводниковых ИМС еще и выполнены в одном кристалле. Поэтому взаимосвязь параметров элементов и их зависимость от температуры учитывается при проектировании ИМС;

4) с повышением степени интеграции (увеличением функциональной сложности) основные показатели ИМС (надежность, быстродействие, стоимость и т. п.), не ухудшаются, а, наоборот, улучшаются.

Для увеличения эффективности процесса производства ИМС должен быть обеспечен высокий выход годных. *Процент выхода годных* – это процент годных микросхем в партии, полученных при строгом соблюдении технологических норм и режимов на каждой стадии технологического процесса. Для его повышения надо соблюдать ряд принципов на стадии конструирования ИМС и их изготовления, которые рассмотрим на примере полупроводниковых ИМС. Перечислим принципы:

- *Технологическая совместимость* элементов ИМС с наиболее сложным элементом, которым является транзистор. Другие элементы (диоды, резисторы, конденсаторы) должны по возможности содержать только те области, которые включает транзистор.

Таким образом, технологический процесс изготовления полупроводниковой ИМС базируется прежде всего на технологии изготовления транзисторных структур.

- *Групповая обработка микросхем.* Она должна охватывать как можно большее число операций. Групповая обработка возможна благодаря использованию во многих физико-химических процессах производства ИМС в качестве рабочей среды газообразных и жидких веществ. При групповой обработке улучшается воспроизводимость параметров ИМС и существенно снижается трудоемкость изготовления отдельных ИМС.

- *Универсальность процессов обработки.* Он означает, что для изготовления совершенно различных по своим возможностям и назначению ИМС применяются одинаковые типовые технологические процессы, оборудование и режимы. Это позволяет одновременно, без переналадки оборудования, выпускать ИМС различного функционального назначения.

- *Унификация пластин-заготовок,* которые содержат максимальное количество признаков микросхемы.

3.4.3. Конструктивно-технологические особенности элементов полупроводниковых интегральных микросхем

К элементам полупроводниковых ИМС относятся транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы и тонкопленочная токопроводящая система. Основным и самым сложным элементом всех конструктивно-технологических групп ИМС является транзистор. Различают биполярные и ме-

талл-диэлектрик-полупроводниковые (МДП) транзисторы. В последнее время в ИМС применяют и транзисторы другого конструктивного исполнения с различными электрическими характеристиками: быстродействующие транзисторы с барьером Шотки, полевые транзисторы с р-n-переходом, многоэмиттерные, многоколлекторные транзисторы, транзисторы со статической индукцией и др.

Большинство *биполярных транзисторов* изготавливают по планарной технологии со структурой n^+ -р-n-типа, хотя в некоторых случаях используют и транзисторы р⁺-n-р-типа. Транзисторы n^+ -р-n-типа (эмиттер-база-коллектор) имеют улучшенные электрические характеристики по сравнению с транзистором р⁺-n-р-типа.

Формирование структуры транзистора и его изоляция определяются технологическим процессом изготовления, а электрофизические параметры, в том числе профиль распределения примеси – способом проведения технологических операций и их режимами.

Биполярные транзисторы классифицируют по способу изоляции и технологии изготовления. По способу изоляции различают структуры, изолированные обратносмещенным р-n-переходом, диэлектрическим слоем и их комбинацией. Независимо от способа изоляции биполярные транзисторы подразделяют на планарно-диффузионные и планарно-эпитаксиальные.

Наиболее экономичной является планарно-эпитаксиальная технология с изоляцией элементов обратносмещенным р-n-переходом. Поэтому такие транзисторы широко используются при построении различных микросхем. Кроме того, транзисторы, изготовленные по планарно-эпитаксиальной технологии, обладают улучшенными характеристиками по сравнению с планарно-диффузионными.

На рис. 3.21 приведены структуры транзисторов, наиболее широко используемых в ИМС и изготовленных по планарно-диффузионной и планарно-эпитаксиальной технологии.

Планарно-эпитаксиальные транзисторы (рис. 3.21, в) получают методом двойной диффузии. При этом базовая и эмиттерная области формируются локальной диффузией примесей в эпитаксиальный n-слой, предварительно выращенный на пластине кремния р-типа и являющийся коллектором, а изоляция обратносмещенным р-n-переходом осуществляется локальной разделительной диффузией на всю глубину эпитаксиального слоя, по всему периметру транзистора перед формированием базовой и эмиттерной областей.

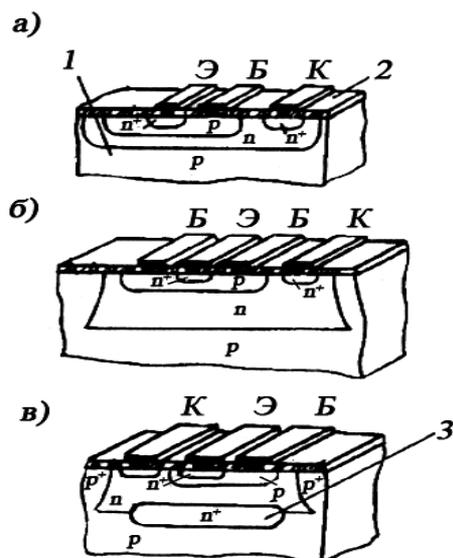


Рис. 3.21. А, б – структуры планарно-диффузионных транзисторов;
 в – структура планарно-эпитаксиальных транзисторов
 (1 – пластина кремния; 2 – оксид кремния; 3 – скрытый n^+ -слой)

Для уменьшения сопротивления тела коллектора и степени влияния пластины в планарно-эпитаксиальных транзисторах создают скрытый n^+ -слой в коллекторе. Его получают дополнительной локальной диффузией донорной примеси (мышьяк или сурьма), которая предшествует эпитаксиальному наращиванию.

Транзисторы типа МДП подразделяют на два основных вида:

- 1) с индуцированным каналом (рис. 3.22, а), в которых канал наводится (индуцируется) под действием управляющего напряжения на затворе;
- 2) со встроенным каналом (рис. 3.22, б), в которых канал между истоком и стоком создается технологическим путем, обычно локальной диффузией.

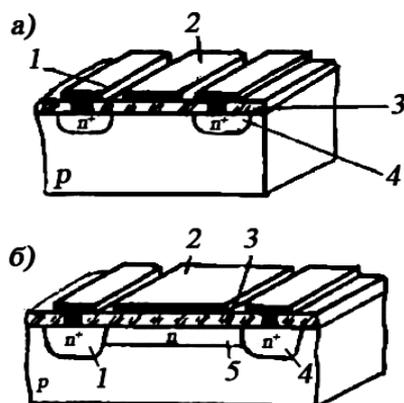


Рис. 3.22. Структура МДП-транзистора:
 а – с индуцированным каналом; б – со встроенным каналом
 (1 – сток; 2 – затвор, 3 – оксид кремния, 4 – исток, 5 – встроенный канал)

Диоды в полупроводниковых ИМС изготавливают на основе тех же диффузионных (эпитаксиальных) слоев и р-п-переходов, что и в биполярных транзисторах. Поэтому на практике в качестве диодов ИМС принято обычно использовать транзисторные структуры n^+ -р-п-типа в диодном включении (рис.3.23). Это обусловлено тем, что диоды изготавливаются в пластине кремния вместе с другими элементами в едином технологическом процессе, поэтому возможности их оптимизации ограничены.

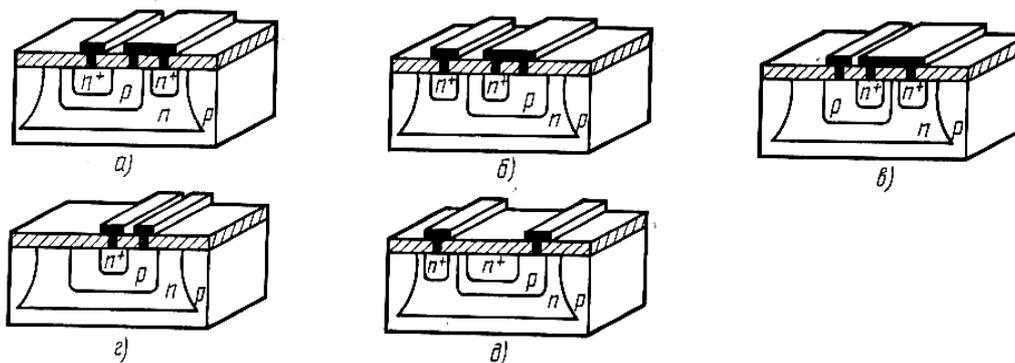


Рис. 3.23. Конструкции интегральных диодов:

- а – на основе перехода база – эмиттер коллектором, закороченным на базу (БК – Э);
- б – на основе перехода коллектор – база с эмиттером, закороченным на базу (БК – К);
- в – с использованием эмиттерного и коллекторного переходов, когда эмиттерные и коллекторные области соединены (Б – ЭК);
- г – на основе перехода база – эмиттер с разомкнутой цепью коллектора (Б – Э);
- д – на основе перехода база – коллектор с разомкнутой цепью эмиттера (Б – К)

Диффузионные резисторы (рис. 3.24) могут быть реализованы на основе любой из структурных областей транзистора. Выбор конкретной области обусловлен удельным сопротивлением полупроводника, требуемым для получения необходимого номинала резистора. Для их включения в ИМС на поверхности структурных областей создают металлизацией омические контакты.

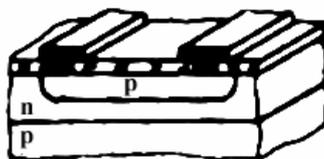


Рис.3.24. Структура диффузионного резистора, сформированного на основе базового слоя

В полупроводниковых ИМС обычно используются конденсаторы двух типов: на основе р-п-переходов (диффузионные) и со структурой металл-оксид кремния (диэлектрик) – полупроводник (МДП-конденсаторы).

В МДП-конденсаторах в качестве нижней обкладки используется n^+ -слой, в качестве диэлектрика – слой SiO_2 толщиной 0,08...0,1 мкм, в качестве верхней обкладки – пленка алюминия (рис. 3.25).

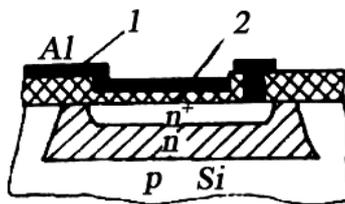


Рис. 3.25. Структура МДП-конденсатора:
1 – обкладка; 2 – диэлектрик

Неотъемлемой частью любой ИМС является *тонкопленочная токопроводящая система* (ТТС) – металлическая пленка, которая играет роль контактов к активным областям ИМС, внутрисхемных соединений и контактных площадок. До настоящего времени в качестве основного материала ТТС ИМС широко используется алюминий. Основными стадиями создания ТТС на основе алюминия являются: осаждение пленки, получение заданной конфигурации ТТС, термообработка.

3.4.4. Технология создания конфигурации элементов ИМС

Из рассмотрения конструкций элементов ИМС видно, что они представляют собой структуры, сформированные на основе тонких пленок различных материалов: проводящих, резистивных, диэлектрических, полупроводниковых. При этом необходимо создать определенную конфигурацию тонкопленочных слоев и обеспечить их совмещение с заданной точностью. Для этого разработан ряд методов (рис. 3.26). Наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании свободных и контактных масок.

Свободная маска представляет собой трафарет, изготовленный из металлической фольги. В трафарете предусмотрены щели и отверстия в соответствии с топологией наносимого на подложку слоя. Маска называется «свободной» из-за наличия неустраняемого зазора между ней и подложкой в процессе осаждения слоя (рис. 3.27). При отсутствии зазора на подложке должна конденсироваться пленка, линейные размеры которой (т. е. рисунок) будут строго соответствовать линейным размерам вырезов в маске. Наличие зазора приводит к образованию зоны «размытости» рисунка. Зона «размытости» может образоваться за счет отражения атомов напыляемого вещества от стенок выреза маски и испарения их с внутренней стороны.

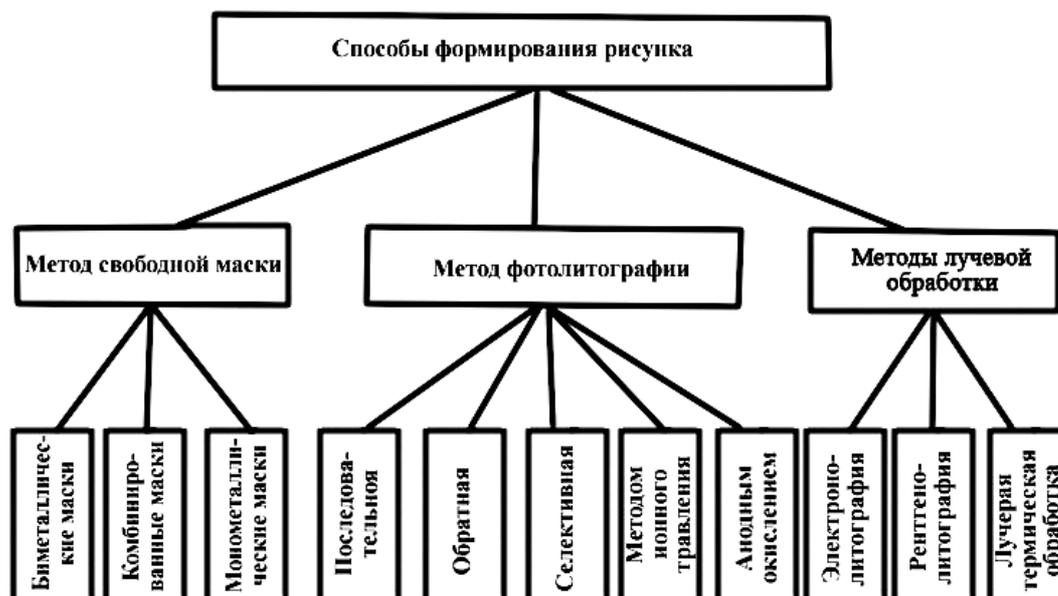


Рис. 3.26. Классификация методов создания конфигурации тонкопленочных элементов

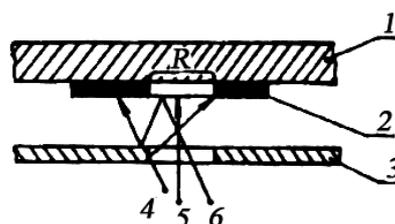


Рис. 3.27. Схема получения конфигурации тонкопленочного резистора с помощью свободной маски:

(1 – подложка, 2 – получаемая пленка, 3 – маска, 4 – 6 – источники атомов материала пленки, R – резистор)

Метод свободных масок широко используется при изготовлении пленочных и гибридных ИМС средней степени интеграции. С помощью свободных масок обеспечивается воспроизведение размеров элементов на подложке не хуже $\pm 25\%$ при их ширине порядка 200 мкм. Это обеспечивает допуск на электрические параметры элементов схемы в пределах $\pm 15\%$.

В отличие от свободной *контактная маска* не образует зазора с поверхностью подложки. Основным материалом для ее изготовления являются *резисты* – вещества, устойчивые к агрессивному воздействию кислот и щелочей, предназначенные для защиты отдельных участков слоев микросхемы и изменяющие свои свойства под воздействием ультрафиолетового (фоторезисты), электронного (электронорезисты), ионного (ионорезисты) или рентгеновского (рентгенорезисты) излучения. Технологический

процесс получения контактной маски на поверхности слоя микросхемы с помощью резиста называется *литографией* (соответственно фотолитография, электронно-лучевая литография и т. д.).

Фотолитография представляет собой совокупность фото- и физико-химических процессов, необходимых для получения заданных размеров и конфигурации элементов ИМС.

Способность резистивного слоя воспроизводить и передавать мелкие детали копируемого изображения называется *разрешающей способностью R*. Численно она определяется количеством параллельных линий одинаковой ширины на миллиметр длины рисунка, расположенных с зазором, равным ширине линии:

$$R = \frac{1000}{2 \cdot b} \left(\frac{\text{линий}}{\text{мм}} \right),$$

где b – ширина линии.

Основными стадиями фотолитографического процесса являются: разработка топологии слоев ИМС и фотошаблонов; изготовление оригиналов фотошаблонов; получение фотокопий с оригиналов; изготовление фотошаблонов; нанесение фоторезистивной пленки; совмещение и экспонирование; проявление и задубливание рисунка.

Увеличение быстродействия и степени интеграции ИМС для устройств вычислительной техники требует снижения характерных размеров элементов до долей микрометра. Этого позволяет достигать *электронно-лучевая литография* – комплекс технологических процессов, используемых для получения прецизионного рисунка на поверхности, в основе которых лежит применение электронных лучей.

Различают два варианта использования электронных лучей для изготовления элементов по планарной технологии: параллельное и последовательное экспонирование элементов рисунка. Параллельное экспонирование часто называют *проекционной электронно-лучевой литографией*. Метод основан на использовании фотоэмиссионных катодов. При этом проводят экспонирование сразу всей поверхности подложки, покрытой слоем электронного резиста. *Метод последовательного экспонирования* единичным пучком заключается в том, что обработка рисунка осуществляется от точки к точке по поверхности пластины.

Переход к новым источникам излучения (электронному лучу, рентгеновскому излучению) в процессе экспонирования рисунка микросхемы позволил существенно снизить минимально достижимые размеры элементов. Однако химическое травление задерживало дальнейшее развитие ли-

тографии, т. к. оно связано с использованием жидких травителей, отличающихся изотропным характером травления, зачастую вредных для здоровья, вносящих загрязнения в микросхемы и т. д.

Значительно расширять границы применимости литографии позволяют плазмохимические процессы, протекающие в объеме плазмы или на поверхности твердого тела в ее присутствии. Для проведения плазмохимических процессов в большинстве случаев применяется плазма высокочастотного (ВЧ) или сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда при давлении от 10^{-1} до 10^1 Па. Плазменная химия позволяет проведение фотолитографии с точностью $\pm 0,5$ мкм, в то время как при стандартной технологии на тех же фотошаблонах точность обычно не превышает $\pm 1 \dots 5$ мкм.

3.4.5. Технология тонкопленочных гибридных интегральных микросхем и микросборок

Тонкопленочные гибридные ИМС (ГИМС) представляют собой пленки толщиной $0,1 \dots 1,0$ мкм из резистивных, проводниковых, диэлектрических и других материалов, на основе которых получают на одной общей подложке элементы схемы и соединения между ними.

Подложка – основание микросхемы, играет существенную роль при изготовлении и эксплуатации микросхем. От ее материала, состояния поверхности в процессе образования на ней пленки зависит качество схемы. Материал подложки должен быть химически инертным, обладать высокой механической и достаточной электрической прочностью, теплопроводностью, термостойкостью и легко резаться на части. Поверхность подложки обрабатывается до 14-го класса шероховатости. Для получения приемлемых значений паразитной емкости пассивная подложка должна обладать низкой диэлектрической проницаемостью и являться хорошим изолятором с малой поверхностной проводимостью. Используются подложки из следующих материалов: стекло, керамика, ситалл, фотоситалл, поликор, синтетический сапфир.

Кроме подложки, к основным элементам тонкопленочной ИМС относится система пассивных элементов, включающая резисторы, индуктивности, проводники и контактные площадки.

Для получения резисторов с номиналами от нескольких единиц Ом до сотен МОм используется широкий спектр материалов: чистые металлы, их сплавы, микрокомпозиционные материалы, сплавы керамики и металлов (керметы), полупроводниковые материалы и т. д. Основными их ха-

рактическими являются удельное поверхностное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления.

Формы тонкопленочных резисторов даны на рис. 3.28. Для корректировки сопротивления резисторов используют высокотемпературный отжиг (при этом изменяется структура резистивного материала и его удельное сопротивление) или лазерное скрайбирование (изменяют коэффициент формы).

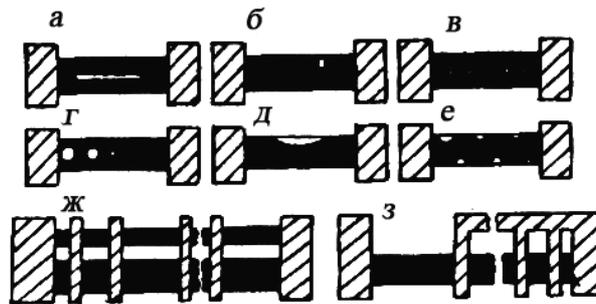


Рис. 3.28. Варианты подгонки тонкопленочных резисторов:
 а – е – удалением части резистивной пленки;
 ж – з – с помощью подгоночных секций

Тонкопленочные конденсаторы конструктивно представляют собой многослойную структуру, в простейшем случае состоящую из двух металлических обкладок, разделенных диэлектриком (рис. 3.29). Удельная емкость конденсатора может изменяться как за счет выбора материала диэлектрика, так и за счет подбора соответствующей толщины пленки. Для создания тонкопленочных конденсаторов используют в качестве диэлектрика слои оксидов: Ta_2O_5 , Al_2O_3 , SiO , SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , ZnO_2 , ZnS , GeO , Sb_2S и многослойные структуры (оксид тантала-оксид марганца).

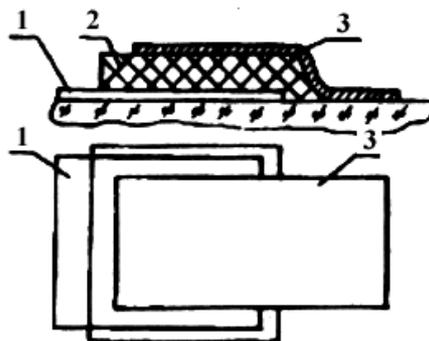


Рис. 3.29. Тонкопленочный конденсатор
 (1 – нижняя обкладка; 2 – диэлектрик; 3 – верхняя обкладка)

Неотъемлемой частью любой тонкопленочной ГИМС является ТТС. Пленочные проводники и контактные площадки должны с минимальными потерями подводить питание к элементам схемы, с минимальным искажением передавать сигналы, обеспечивать надежный, чаще всего невыпрямляющий контакт к элементам схемы.

Схема типового технологического процесса изготовления тонкопленочной части ГИМС представлена на рис. 3.30.



Рис. 3.30. Схема технологического процесса изготовления тонкопленочных ГИМС

После изготовления тонкопленочных элементов производят подсоединение методом пайки или сварки активных компонентов (транзисторов, диодов или полупроводниковых микросхем) и навесных пассивных компонентов к контактными площадкам.

3.4.6. Технология толстопленочных интегральных схем

Конструктивно толстопленочная ГИМС представляет собой керамическую подложку с пассивными элементами и активными компонентами, герметизированную в корпусе.

Материал и конструкция подложки должны обеспечивать следующие характеристики: высокую прочность, заданную точность линейных размеров, хорошую теплопроводность, достаточную термо- и химическую

стойкость. В качестве подложки толстопленочных ГИМС чаще всего применяют керамику, в частности марки 22ХС (39,7 % MnO, 37,1 % TiO, 14,3 % Al₂O₃, 8,9 % SiO₂).

Технология толстопленочных ГИМС заключается в нанесении на подложку соответствующих паст в виде пленок толщиной более 10 мкм и последующем вжигании. Конфигурацию элементов толстопленочных ИМС формируют методом трафаретной печати.

Пассивные элементы толстопленочных ГИМС изготавливают путем последовательного нанесения на подложки паст соответствующего состава и дальнейшего их вжигания. Пасты делятся на проводящие, резистивные и диэлектрические. Как правило, пасты содержат основные химические компоненты (придающие необходимые физические свойства), вспомогательные (обеспечивают соответствие определенным конструктивно-технологическим требованиям, например, заданную адгезию), органические вещества и растворители. В связи с тем, что резистивные пасты очень чувствительны к высоким температурам, эти слои наносят в последнюю очередь. Общая схема технологического процесса изготовления толстопленочной микросхемы показана на рис. 3.31.

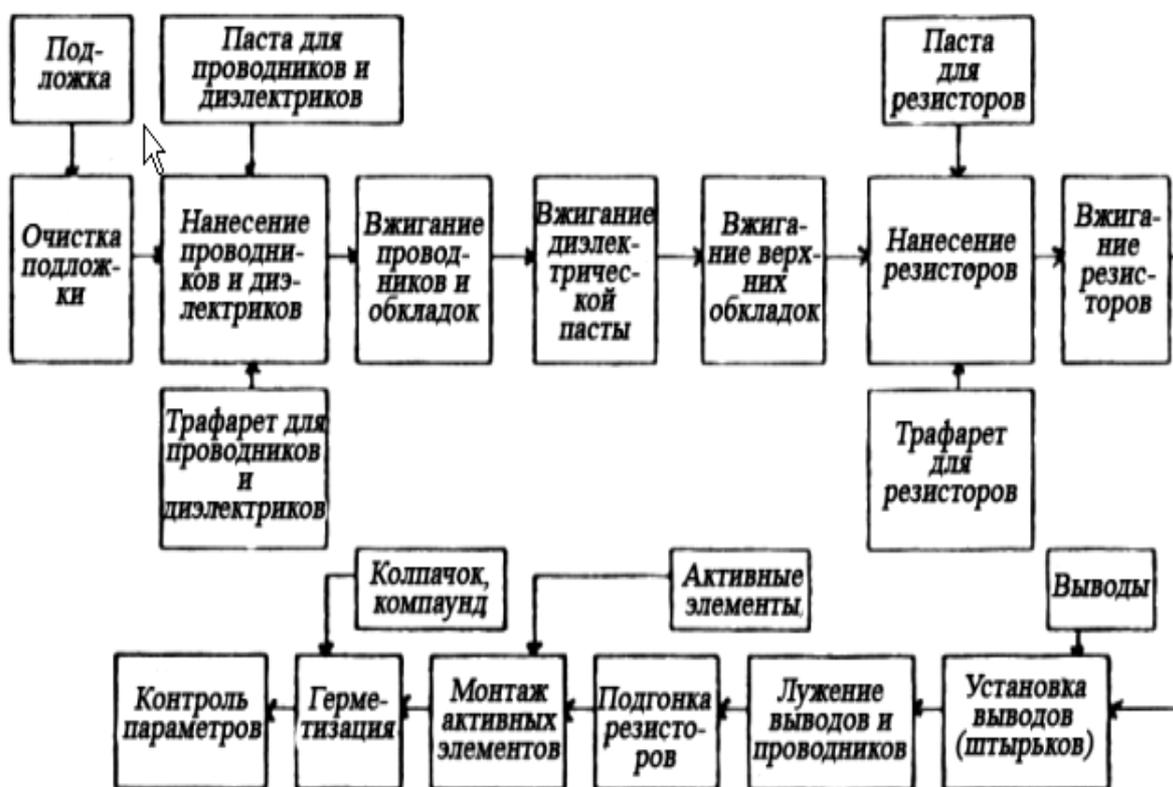


Рис. 3.31. Схема технологического процесса изготовления толстопленочных ГИМС

3.4.7. Пластины полупроводниковых интегральных микросхем и методы создания электронно-дырочных структур

Полупроводниковая ИМС имеет элементы, сформированные в объеме полупроводниковой пластины и на ее поверхности. В связи с этим полупроводниковая подложка должна обладать совершенно определенными электрофизическими и механическими свойствами, например, минимальную концентрацию примесей, в том числе и в виде дефектов кристаллической структуры типа дислокаций, вакансий и т. д. Для изготовления полупроводниковых ИМС применяют пластины из монокристаллического кремния, германия, арсенида галлия. Чаще всего используется кремний благодаря большой ширине запрещенной зоны. Германий и арсенид галлия имеют значительно большую подвижность носителей и поэтому применяются главным образом для создания СВЧ-приборов.

Для получения в полупроводнике областей с заданной концентрацией примесей применяют различные способы, такие, как легирование из расплава, сплавление, диффузия, эпитаксия, ионное легирование.

Наиболее широко в массовом производстве применяется *диффузия* – процесс переноса вещества из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией.

На рис. 3.32 показан профиль концентрации распределения примесей для р-п-р-структуры, полученной методом диффузии.

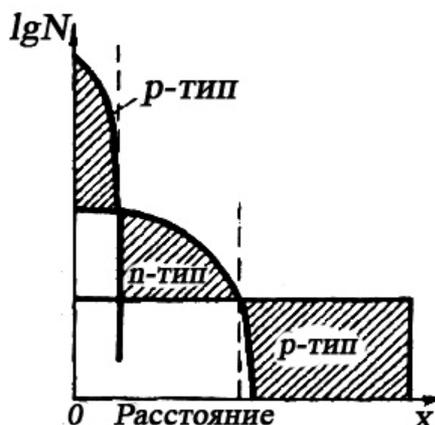


Рис. 3.32. Профиль концентраций для диффузионных р-п-р-структур

Глубина р-п-перехода определяется как расстояние от поверхности пластины до плоскости, на которой концентрация донорной примеси равна концентрации акцепторной примеси. Максимальная концентрация примеси, которая может быть достигнута при данной температуре, является свойством пары легирующий элемент – твердое тело и определяется их

растворимостью. Если профиль заданной концентрации в твердом теле требует поверхностной концентрации примеси, превышающей ее растворимость в твердой фазе при температуре диффузии, то такой элемент нельзя использовать в качестве диффузанта.

Диффузионные процессы проводятся при температуре 1273...1573 К по следующей схеме:

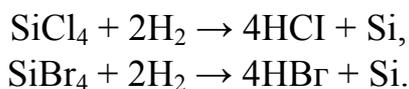
- 1) определение и регистрация исходных параметров полупроводникового материала;
- 2) установление требуемых параметров диффузионного слоя;
- 3) определение времени и температуры диффузии;
- 4) проверка и вывод параметров диффузионной печи на рабочий режим;
- 5) обработка пластин;
- 6) загрузка пластин в печь, диффузия, выгрузка;
- 7) регистрация глубины диффузии и удельного поверхностного сопротивления полученного слоя.

Эпитаксия служит для получения полупроводниковых структур с заданной концентрацией примеси путем послойного наращивания на полупроводниковой или диэлектрической подложке. Эпитаксия (от греч. *epi* – на, *taxis* – расположение, порядок) – это процесс ориентированного осаждения вещества на монокристаллическую подложку, при котором полученная пленка является продолжением структуры основания. Практическое значение имеют осажденные эпитаксиальные слои на полупроводниковых пластинах противоположного типа проводимости, причем на границе раздела пленка-пластина образуется p-n-переход.

При эпитаксиальном процессе атомы примеси вводят в полупроводник во время осаждения эпитаксиальной пленки. Отношение числа атомов примеси к числу атомов кремния можно легко регулировать в газовой фазе и получать пленки с заданной концентрацией примесей. Изменяя содержание примеси в газовой фазе или ее тип, можно изменять характеристики эпитаксиальной пленки и создавать резкие p-n-переходы без необходимости компенсации примесей противоположного знака.

Наибольшее распространение в промышленности получили процессы эпитаксии полупроводников из газовой фазы с помощью химических реакций. Для выделения кремния используют реакции двух типов: восстановление и пиролитическое разложение. Восстановление проводят из тет-

рахлорида кремния SiCl_4 , тетрабромида кремния SiBr_4 , трихлорсилана SiHCl_3 . При использовании двух первых соединений восстановление идет по следующим реакциям:



Для пиролитического разложения применяют силан:



Одновременно с осаждением кремния осаждают примеси (бор или фосфор) из газообразных соединений BCl_3 , BBr_3 , PCl_3 (в реакциях восстановления), диборан B_2H_6 и фосфин PH_3 (в реакциях пиролиза). Соотношение компонентов смеси должно обеспечивать заданную концентрацию примеси в эпитаксиальной пленке.

Ионное легирование (ионная имплантация) – это введение атомов в приповерхностный слой твердого тела путем бомбардировки ионами с энергией от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт.

Получение p-n-переходов ионным легированием обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с методом диффузии: сравнительно низкая температура обработки полупроводниковых пластин, точный контроль глубины и профиля распределения примесей, гибкость и универсальность, возможность полной автоматизации процесса.

Важным отличием ионного легирования от диффузии является то, что содержание внедренных атомов примеси определяется внешней системой и не ограничено растворимостью диффузанта в материале подложки. Внедряя ионы групп III и V в кремниевую пластину, можно получать p-n-переходы и n-p-переходы с достаточно широким диапазоном параметров.

При диффузии поверхностная концентрация и профиль распределения примеси определяются температурой процесса, а при ионном легировании эти два параметра можно изменять независимо друг от друга. Профиль определяется энергией ионов, а концентрация – дозой облучения.

Методом ионного легирования диодные структуры получают следующим образом. На кремниевых пластинах выращивают окисную пленку, которая после проведения фотолитографии служит маской для получения облученных участков нужной конфигурации. Зная требуемые параметры p-n-переходов, определяют энергию ионного пучка и дозу облучения, после чего проводят облучение при определенном ускоряющем напряжении, токе пучка и времени облучения. Для стабилизации структуры и уменьшения дефектов после ионной имплантации осуществляют высокотемпературный отжиг.

Транзисторные структуры, полученные ионным легированием, имеют лучшие характеристики, особенно при изготовлении СВЧ-приборов. Этот метод позволяет изготавливать области базы очень малой глубины ($h < 0,1$ мкм) с высокой концентрацией примесей и, следовательно, с малым сопротивлением по всей толщине базы, что позволяет улучшать предельную частоту усиления транзистора.

На рис 3.33 представлены профили концентрации в транзисторных структурах, изготовленных ионной имплантацией и диффузией.

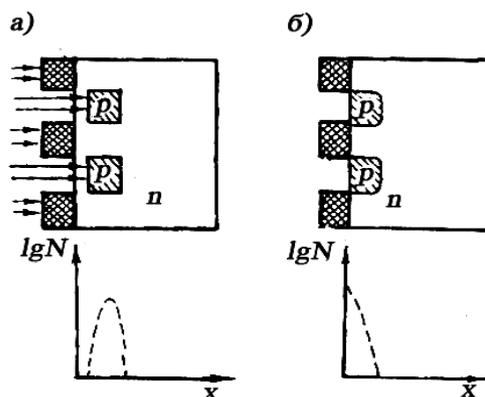


Рис. 3.33. Механизм образования и профили концентраций в транзисторных структурах: а – изготовленных имплантацией ионов бора; б – диффузией

3.4.8. Методы электрической изоляции элементов полупроводниковых ИС

Одним из основных требований, которое должно быть удовлетворено при производстве полупроводниковой ИМС, является сведение к минимуму паразитных связей между элементами. Его можно выполнять путем создания локальных хорошо изолированных друг от друга областей полупроводника.

Основные методы электрической изоляции элементов ИМС можно разделить на два класса: методы изоляции диффузионными областями и диэлектрическими областями (рис. 3.34, 3.35). Применяют также комбинированные методы изоляции.

К достоинствам методов изоляции диффузионными областями относятся высокая плотность размещения элементов схемы, сравнительная простота технологии, достаточно высокий процент выхода годных. Основным недостатком метода изоляции диффузионными областями: большая площадь изолирующей области. Наибольшее распространение благодаря простоте и технологичности нашел *метод изоляции обратносмещенным p-n-переходом*.

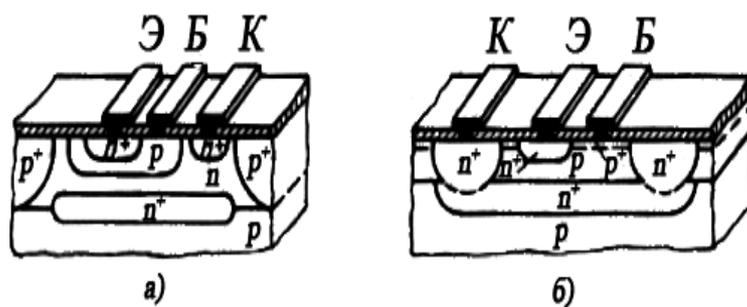


Рис. 3.34. Конструкция интегрального биполярного транзистора с изоляцией обратнo-смещенным р-п-переходом: а – изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии; б – по технологии коллекторной изолирующей диффузии

Для *диэлектрической изоляции* (рис. 3.35) используют пленки диоксида кремния, алюминия и нитрида кремния. Наиболее часто используют: эпокс-метод, VIP-процесс, структуру кремний в диэлектрике, кремний на диэлектрике.

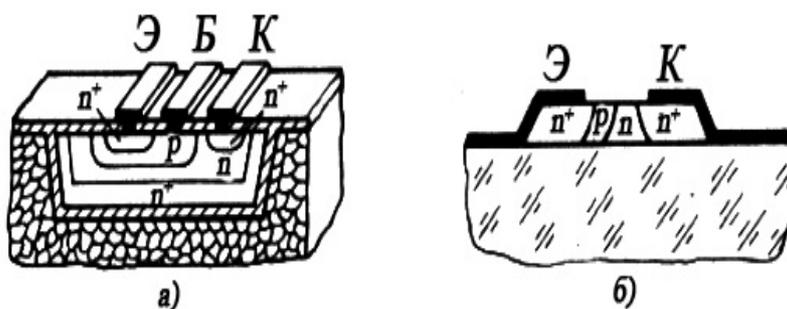


Рис. 3.35. Конструкция интегрального транзистора с изоляцией диэлектриком: а – структура кремний в диэлектрике (КВД); б – структура кремний на диэлектрике (КНД) со сформированном транзистором с вертикальными р-п-переходами

Основной недостаток конструкций с диэлектрической изоляцией элементов: сложный техпроцесс, малый выход годных микросхем, плохой отвод тепла от элементов микросхемы в подложку, трудность создания разводки, высокая плотность дефектов структуры в изолированных островках кремния и низкая воспроизводимость параметров элементов микросхем.

Комбинированная изоляция (рис. 3.36) сочетает технологичность изоляции р-п-переходом и высокие качества диэлектрической изоляции: элементы микросхемы со стороны подложки изолированы обратнo-смещенным р-п-переходами, а с боковых сторон – диэлектриком (оксидом, стеклом, керамикой, поликремнием и т. д.).

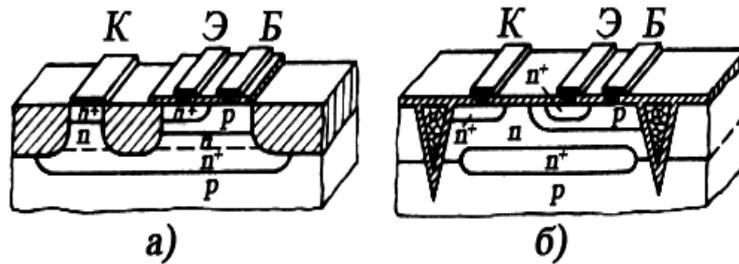


Рис. 3.36. Конструкция интегральных транзисторов с комбинированной изоляцией:

а – полученных локальным окислением кремния;

б – анизотропным травлением кремния с последующим окислением профилированной поверхности и заполнением окисленных канавок поликристаллическим кремнием

Конкретный метод изоляции элементов ИМС выбирается в зависимости от требований к схеме, а именно: плотности размещения элементов, частотного диапазона ее работы, рассеиваемой мощности и т. д.

3.4.9. Сборочные процессы в технологии интегральных микросхем

При типовой сборке микросхем выделяют следующие этапы: разделение пластины на отдельные кристаллы («чипы»), монтаж кристаллов в корпусе, герметизация и контрольные испытания. Для устранения вредного влияния влаги и пыли сборочные операции проводят в условиях микроклимата с низкой влажностью. Это достигается в специальных скафандрах, в которых воздух осушают хлористым кальцием. В скафандрах поддерживается относительная влажность около 1 %. Для препятствия проникновению воздуха в скафандр вводится очищенный и осушенный газ, а с целью устранения испарений с поверхности рук оператора применяются резиновые перчатки. Скафандры снабжаются микроскопами.

Основным методом разделения пластин на кристаллы является *скрайбирование* с последующим разламыванием. Скрайбирование заключается в нанесении царапин на подложку или пластину в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Под царапинами образуются напряженные области, и при небольшой механической нагрузке пластина разламывается на отдельные части вдоль линии скрайбирования. Операция осуществляется алмазным резцом, диском или лентой с алмазной крошкой. Столик с закрепленной на нем пластиной автоматически передвигается на требуемое расстояние. После нанесения царапин по всей площади пластины столик поворачивается на 90° и процесс повторяется. Разламывание пластин производят вручную или машинным способом. Подложки из керамики с высоким содержанием диоксида алюминия очень тверды, поэтому их скрайбируют до отжига, используя лазерное скрайбирование.

Для защиты кристаллов и подложек от климатических и механических воздействий служат корпуса ИМС. Корпус состоит из основания и крышки. Основание изготавливается из стекла, металла, керамики или их сочетаний. В основании монтируются конструктивные элементы, необходимые для монтажа кристаллов, и проводники, коммутирующие элементы микросхемы с платой. Корпуса в зависимости от используемых материалов подразделяют на металлостеклянные, металлополимерные, полимерные, стеклянные, керамические, пластмассовые.

Внешние выводы корпуса изготавливаются из материалов с высокой проводимостью и покрываются антикоррозионным покрытием (серебро, золото, олово).

Основными характеристиками корпуса являются герметичность, теплопроводность, электрическая и механическая прочность, габаритные и присоединительные размеры.

После разделения пластин на кристаллы и подготовки корпусов производится *монтаж кристалла* на основании корпуса и подсоединение выводов корпуса к контактным площадкам схемы. Наиболее часто для этих целей применяют проволочный монтаж или монтаж с помощью жестких выводов на ленточный носитель.

После того как проведен монтаж кристалла в корпусе, необходимо соединить контактные участки между собой (пластина – корпус ИМС или ленточный носитель – корпус ИМС). Соединение достигается пайкой, сваркой или комбинацией этих методов. В микроэлектронике применяются следующие виды сварки: холодная, термокомпрессионная, ультразвуковая, лазерная, электронно-лучевая.

Завершающей стадией изготовления ИМС является их *герметизация*. Выбор метода герметизации зависит от условий эксплуатации ИМС и типа корпуса.

Для герметизации ИМС в металлических корпусах используют сварку и пайку. Применяют *сварку* двух видов: контактную и холодную. При контактной сварке возможны выбросы металла, который может попадать в микросхему, выводя ее из строя. Холодная сварка применяется для получения вакуум-плотного шва при толщине контактируемых металлов до 0,3 мм. Кроме того, один из контактируемых металлов должен обладать высокой пластичностью.

Пайку осуществляют в специальных печах токами высокой частоты или инфракрасным излучением. Между корпусом и крышкой помещают прокладку из припоя. При нагреве припой расплавляется и корпус герме-

тизируется. Герметизацию осуществляют припоем марки ПОС-61 с флюсом или припоем типа золото-олово без флюса.

Бесфлюсовая герметизация позволяет получать более надежные схемы, т. к. при этом устраняется возможность попадания продуктов распада флюса в корпус микросхемы. Пайку без флюса при температуре до 673 К осуществляют в защитной среде. В этом случае контактирующие поверхности должны быть покрыты золотом, серебром или палладием.

Метод пайки инфракрасными лучами без применения флюса характеризуется большими достоинствами. Благодаря высокой плотности излучения появляется возможность сократить длительность нагрева зоны пайки до 3 мин, локализовать зону нагрева, исключить разогрев кристалла. Производительность процесса достигает десятков тысяч ИМС в час, выход годных изделий – до 98 %.

Пластмассовые корпуса намного дешевле других, однако схемы в них наиболее часто выходят из строя, поскольку такие корпуса недостаточно герметичны и обладают плохой теплопроводностью. Наиболее широко для герметизации схем в пластмассовых корпусах используют два метода: формовку заливкой и трансферную прессовку.

Керамические корпуса герметизируют тремя способами. В первых двух способах, применяемых при металлостеклянной герметизации, стекло используется в виде тонкого слоя, сплавленного с керамикой, или как составная часть керамики. В этом случае выводы фиксируются в процессе отжига корпуса. По третьему способу корпуса изготавливают со скрытыми проводящими слоями, нанесенными на места необожженной керамики, а затем конструкцию отжигают при температуре 1773 К. Проводящие слои образуют внутренние и внешние контакты.

3.4.10. Основные направления функциональной микроэлектроники

В развитии микроэлектроники наметились два направления:

- 1) *интегральная микроэлектроника*, которая основана на создании в полупроводниковом кристалле областей, идентичных дискретным приборам;
- 2) *функциональная микроэлектроника*, направленная на создание схем, работающих за счет физических явлений в активной среде.

В интегральной микроэлектронике сохраняется основной принцип дискретной электроники – разработка электрической схемы по законам теории цепей. В этом случае по мере усложнения схемы растет число элементов и межсоединений. На современном этапе развития интегральной микроэлектроники создаются БИС 6-й степени интеграции ($N = 10^6$ элементов).

Дальнейшее увеличение степени интеграции ограничено физическими факторами. Первой существенной проблемой является трудность отвода теплоты от структуры, второй – снижение размеров ТТС, что ведет к увеличению сопротивления и росту энергетических потерь, третьей – повышение эффекта электромиграции с ростом плотности тока. Кроме того, для обеспечения высокой надежности ЭВМ необходимо применять многократное резервирование, что приводит к увеличению количества элементов.

Таким образом, перед интегральной технологией возникли те же проблемы, которые ранее стояли перед технологией, основанной на дискретных элементах: проблемы «тирании» количеств, организации межсоединений и повышения надежности.

Интеграция свыше нескольких сотен тысяч элементов в одном кристалле является экономически нецелесообразной и технологически трудноосуществимой. Поэтому необходимо отказаться от традиционных принципов построения схем путем набора и компоновки определенного количества элементов в кристалле. Например, можно использовать физические свойства твердого тела и других активных сред. Устройства, которые построены на основе такого принципа, называются *функциональными приборами*. В них невозможно выделить какую-либо область, выполняющую функцию ЭРЭ. Для переработки информации можно использовать эффекты, не связанные с электропроводностью (оптические и магнитные явления в диэлектриках, законы распространения упругих колебаний и т. д.).

В настоящее время разрабатываются такие направления функциональной микроэлектроники, как молекулярная электроника, оптоэлектроника, акустоэлектроника, магнитоэлектроника, криогенная электроника, теплоэлектроника, хемотроника, биоэлектроника и др.

Молекулярная электроника – область электроники, в которой функциональные электронные компоненты и устройства организованы на уровне отдельных молекул и их комплексов. Например, эффект выпрямления в молекулярном выпрямителе реализуется на уровне молекулы, один конец которой – акцептор – легко захватывает электрон, а другой – донор – отдает. В такой системе ток может проходить только в одном направлении – от акцептора к донору. Работа молекулярного запоминающего устройства (ЗУ) основана на наличии или отсутствии в донорах либо акцепторах двух избыточных электронов, что можно использовать для отображения нуля или единицы. Быстродействие таких структур определяется временем перемещения электронов вдоль молекулы и составляет около 10...15 сек.

Оптоэлектроника базируется на электронно-фотонных методах получения, передачи и хранения информации. Используя оптические связи, можно обеспечить полную электрическую изоляцию элементов, малый уровень шумов и высокую надежность. Одним из первых приборов оптоэлектроники были оптроны, преобразующие электрические сигналы в оптические, и наоборот. Их быстродействие достигает нескольких наносекунд при ширине полосы частоты 5 МГц.

Оптрон (рис. 3.37) является основной структурной единицей оптоэлектроники. Простейший оптрон – это четырехполюсник из трех элементов: фотоизлучателя, световода и фотоприемника. Поданный на вход электрический сигнал преобразуется в световой поток. Поток по световоду подается в фотоприемник, на выходе которого образуется электрический импульс. В таком оптроне внутренняя связь – фотонная, а внешняя – электрическая.

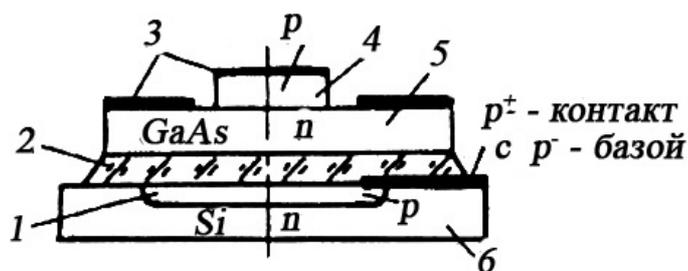


Рис. 3.37. Разрез твердотельного оптрона с иммерсионным световодом (1 – слой планарной диффузии; 2 – селеновое стекло; 3 – оптические контакты; 4 – диффузионная мезаструктура; 5 – источник света; 6 – приемник света)

В качестве источников света – фотоизлучателей – широко используют светодиоды. Они имеют достаточно высокое быстродействие (не хуже 0,5 мкс), но потребляют сравнительно большой ток (до 30 А/см²). КПД их низок < 1...3 %). Наиболее перспективными фотоизлучателями являются инжекционные лазеры, например, арсенид-галлиевые.

Фотоприемники – преобразователи оптических сигналов в электрические. Для этих целей используют фотодиоды, фототранзисторы, резисторы, тиристоры и т. д.

Передача оптических сигналов происходит по световодам – тонким нитям стекла или пластмассы. Их изолируют светоизолирующим материалом.

Большие перспективы открывает лазерное направление, которое основывается на взаимодействии света и твердого тела. Реализация этого направления – оптические ЗУ, устройства распознавания объектов и т. д. Основной метод построения оптических ЗУ – топографический.

В микроэлектронике широко используются оптоэлектронные ИМС. К ним относятся быстродействующие переключатели, коммутаторы аналоговых сигналов и т. д.

Акустоэлектроника использует эффекты, связанные с возбуждением, распространением в твердых телах и приемом ультразвуковых волн частотой от десяти до нескольких мегагерц. Принцип работы акустоэлектронных устройств основан на преобразовании электрического сигнала в упругие волны, которые распространяются на пять порядков медленнее электромагнитных. К настоящему времени уже созданы устройства на поверхностных волнах: линии задержки (от долей микросекунды до десятков миллисекунд) (рис. 3.38), усилители, фильтры, и т. д.

Криогенная электроника использует явление сверхпроводимости при низких температурах. Значительного прогресса ожидают от перевода вычислительных устройств на сверхпроводящие элементы. При этом рассчитывают повысить быстродействие до 10^{-11} сек и снизить расходуемую мощность до 10^{-18} Дж. В основе работы таких элементов лежит эффект Джозефсона. Серьезный недостаток – необходимость поддержания низкой температуры порядка 20...40 К. Однако уже разработаны сверхпроводники на основе керамики, работающие при более высоких, чем указанные, температурах.



Рис. 3.38. Ультразвуковая линия задержки
(1 – входной преобразователь; 2 – звукопровод; 3 – выходной преобразователь)

Теплоэлектроника основана на передаче тепловых сигналов. Структурно электротепловое устройство состоит из электрической части, электротеплового и теплоэлектрического преобразователя, тепловода. Такие устройства представляют большой интерес для создания функциональных блоков, работающих на низких частотах.

Вопросы для самопроверки по теме 3.4

1. Дайте определение ИМС.
2. Приведите классификацию ИМС.
3. Назовите конструкторско-технологические особенности ИМС.
4. Приведите основные принципы конструирования полупроводниковых ИМС.

5. Назовите основные элементы полупроводниковых ИМС.
6. Приведите классификацию биполярных транзисторов.
7. Приведите структуру планарно-диффузионного транзистора и назовите ее особенности.
8. Приведите структуру планарно-эпитаксиального транзистора и назовите ее особенности.
9. Приведите структуру МДП-транзистора и назовите особенности .
10. Приведите структуры и схемы диодного включения планарно-эпитаксиальных транзисторов.
11. Приведите структуру диффузионного резистора, сформированного на основе базового слоя.
12. Приведите структуру МДП-конденсатора.
13. Приведите классификацию методов создания конфигурации тонкопленочных элементов.
14. Сравните методы создания конфигурации элементов ИМС (методы свободной и контактной маски).
15. Дайте определение разрешающей способности техпроцесса фотолитографии.
16. Раскройте сущность, достоинства, перспективы применения электронно-лучевой литографии.
17. Что представляет собой тонкопленочная гибридная ИМС?
18. Из каких материалов делают подложки ГИМС?
19. Назовите материалы, из которых делают тонкопленочные резисторы.
20. Приведите конструкцию тонкопленочного конденсатора. Назовите материалы для создания тонкопленочных конденсаторов.
21. Приведите схему техпроцесса изготовления тонкопленочной ГИМС.
22. Назовите материалы, использующиеся в качестве подложки толстопленочных ГИМС.
23. Приведите схему техпроцесса изготовления толстопленочных ГИМС.
24. Какие материалы применяются для изготовления полупроводниковых ИМС? Обоснуйте случаи их применения.
25. Что такое диффузия? Приведите профиль концентраций для диффузионных р-п-р-структур.
26. Приведите схему проведения диффузионного процесса.
27. Какие химические процессы применяются для выделения кремния при проведении процесса эпитаксии?

28. Назовите особенности проведения процесса ионного легирования.
29. Приведите профили концентраций в транзисторных структурах, полученных имплантацией и диффузией.
30. Назовите основные методы изоляции полупроводниковых структур.
31. Приведите конструкцию интегрального биполярного транзистора с изоляцией обратно-смещенным р-п-переходом, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии.
32. Приведите конструкцию интегрального транзистора с изоляцией диэлектриком (структура кремний на диэлектрике).
33. Приведите конструкцию интегральных транзисторов с комбинированной изоляцией, полученных локальным окислением кремния и анизотропным травлением кремния с последующим окислением профилированной поверхности и заполнением окисленных канавок поликристаллическим кремнием.
34. Перечислите этапы проведения техпроцесса сборки ИМС.
35. В чем заключается метод скрайбирования? Назовите особенности метода.
36. Охарактеризуйте основные типы корпусов ИМС. Перечислите характеристики корпусов.
37. Приведите основные способы герметизации корпусов ИМС.
38. Назовите основные направления в развитии микроэлектроники. Охарактеризуйте их.
39. Как реализуется эффект выпрямления в молекулярном выпрямителе?
40. Приведите структуру твердотельного оптрона с иммерсионным световодом. Назовите особенности его работы.
41. На чем основан принцип работы акустоэлектронных устройств?
42. Какое явление использует криогенная электроника?
43. На чем основана работа термоэлектронных устройств?

Тема 3.5. Базовые технологические процессы изготовления интегральных микросхем

3.5.1. Понятие о технологическом процессе и его содержание

Производственный процесс изготовления ЭВМ представляет собой совокупность действий, в результате которых сырье, материалы, полуфабрикаты и комплектующие изделия, поступающие на предприятие, превращаются в готовую продукцию. Он включает не только изготовление изделий, но и подготовку производства, планирование, материально-техни-

ческое снабжение, ремонт оборудования, транспортирование, финансирование и т. д. Производственный процесс делится на основной (изготовление запланированной предприятием основной продукции) и вспомогательный (изготовление технологической оснастки и товаров народного потребления, ремонт оборудования и прокладка коммуникаций, охрана окружающей среды, хранение и транспортирование изделий).

Технологический процесс (ТП) – это часть производственного процесса, включающая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства. Он состоит из двух этапов: изготовления деталей и сборки (электронных модулей, периферийных устройств, ЭВМ).

Основные элементы ТП:

- технологическая операция (ТО),
- установ,
- технологический переход,
- вспомогательный переход,
- позиция.

Технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Она является основной единицей производственного планирования и учета.

Установ – часть ТО, выполняемой при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки или собираемой сборочной единицы.

Технологический переход – законченная часть ТО, которая характеризуется постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образующихся при обработке или соединяемых при сборке.

Вспомогательный переход включает ту законченную часть ТО, состоящую из действий человека и (или) оборудования, которая не сопровождается изменением формы, размеров, состояния поверхности или взаимного расположения деталей, а необходима для выполнения технологического перехода.

Позиция – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операций.

По степени универсальности и применяемости в производстве все технологические процессы разделяются на единичные и унифицированные. *Единичный ТП* относится к изделию одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства. Технологический процесс, составленный для группы деталей или изделий с общими конструктивно-технологическими или только технологическими признаками общности, называется *унифицированным*.

Унифицированные процессы делятся на *типовые* и *групповые* .

Типовые процессы разрабатываются для группы изделий, объединенных на основе признаков конструктивно-технологической общности, и характеризуются единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для объектов всей группы.

Групповой технологический процесс в отличие от типового разрабатывается для группы изделий более широкой номенклатуры, которые могут не иметь геометрического подобия. Они объединяются в группу по наличию признаков технологической общности, что выражается в общности технологической наладки на ту или иную операцию для последующей совместной обработки.

При разработке унифицированных ТП все детали и сборочные единицы предварительно классифицируются по признакам конструктивной и технологической общности. Эти операции легко выполняются на ЭВМ при использовании конструкторских и технологических классификаторов. Для каждого из систематизированных классов деталей и сборочных единиц разрабатывается единый унифицированный ТП, по которому может быть изготовлено любое изделие этого класса. Следовательно, унификация ТП совместно с унификацией изделий позволяет привести в систему существующие ТП, значительно сократить сроки и затраты на технологическую подготовку производства, поставить на научную основу разработку новых ТП, автоматизировать проектирование ТП, внедрить передовые и экономичные методы труда и технологическое оснащение. Типовые ТП эффективны в условиях крупносерийного и массового производства, а групповые ТП – в условиях мелкосерийного и серийного производства.

По основному назначению технологические процессы разделяются на рабочие и перспективные.

В зависимости от типа производства разрабатывают:

- маршрутные ТП,
- маршрутно-операционные ТП,
- операционные ТП.

Маршрутный ТП – процесс, выполняемый по документации, в которой содержание операций излагается без указания переходов и детализации режимов обработки. В *маршрутно-операционном* и *операционном* ТП содержание отдельных наиболее сложных и важных (или всех) операций соответственно конкретизируется с указанием содержания переходов и режимов обработки.

Технологический процесс реализуется с помощью универсального и специального технологического оснащения (СТО), к которому относятся оборудование и оснастка. Технологическим оборудованием называют ору-

для производства, в которых для выполнения определенной части технологического процесса размещаются материалы или заготовки, средства воздействия на них, технологическая оснастка и при необходимости источники энергии. Технологическая оснастка представляет собой орудие производства, добавляемое к технологическому оборудованию для выполнения определенной части ТП (например, режущий инструмент, штампы, пресс-формы и др.).

3.5.2. Понятие о типах производства

Для каждого промышленного предприятия устанавливается так называемая программа выпуска, включающая в себя перечень изготавливаемых или ремонтируемых изделий с указанием объема выпуска (т. е. количества изделий определенных наименований, типоразмеров и исполнений) по каждому из наименований на планируемый период времени.

По типу производства подразделяются на:

- единичное,
- серийное,
- массовое.

Единичное производство характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление которых, как правило, не предусматривается.

Серийное производство отличается изготовлением и ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями.

Для *массового* производства характерен большой объем выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

Одной из основных характеристик производства является *коэффициент закрепления операций* K_{ξ} , представляющий собой отношение числа всех технологических операций N_T , выполненных или подлежащих выполнению в течение планового периода, равного одному месяцу, к числу рабочих мест N_P :

$$K_{\xi} = \frac{N_T}{N_P}.$$

При массовом и крупносерийном производстве $1 \leq K_{\xi} \leq 10$, при среднесерийном $10 < K_{\xi} \leq 20$ и при мелкосерийном $20 < K_{\xi} \leq 40$. При единичном производстве K_{ξ} не регламентирован.

3.5.3. Технологическая подготовка производства

Технологическая подготовка производства (ТПП) – это совокупность организационно-технических мероприятий и инженерно-технических работ, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных сроках, объемах выпуска и затратах.

Для постановки на производство новых изделий на каждую тысячу деталей требуется свыше 15 тыс. единиц различной технической документации и до 5 тыс. различных видов оснастки и инструмента. Выполняют эту работу проектно-конструкторские и технологические службы предприятия, цехи машиностроительного производства и аналогичные службы предприятий-смежников (рис.3.39).

ТПП решает следующие основные задачи:

- обеспечение технологичности конструкции изделий;
- разработка технологического процесса (маршрутно-операционного и операционного);
- проектирование СТО;
- управление процессом ТПП.

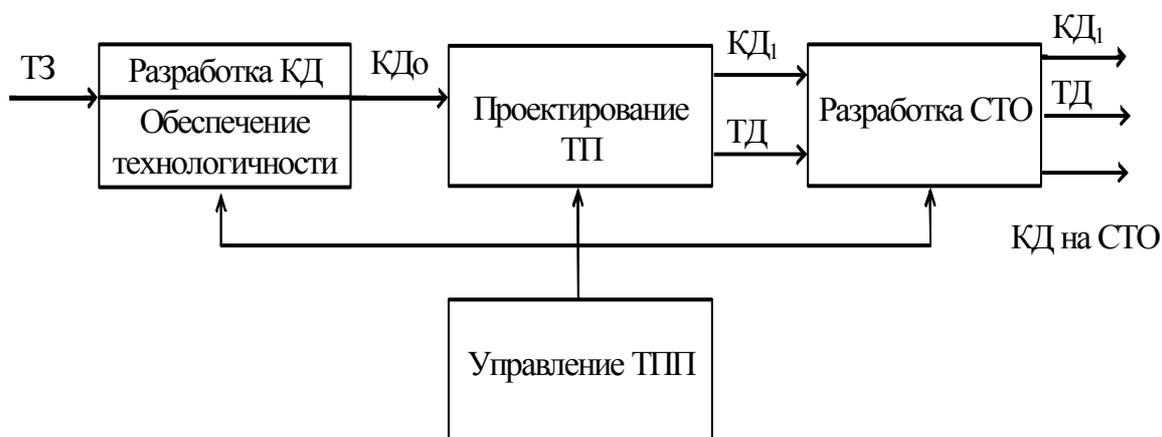


Рис. 3.39. Структурная схема ТПП

Значительный вклад в решение проблемы сокращения сроков подготовки производства внесла Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП), которая обобщила и регламентировала (в стандартах) с научных и методических позиций передовые инженерные решения в области ТПП. Достижению этой же цели способствует применение экономико-математических методов и средств вычислительной техники.

ЕСТПП – установленная государственными стандартами система организации и управления процессом ТПП, предусматривающая широкое применение прогрессивных унифицированных ТП, стандартной техноло-

гической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ.

Повышение качества принимаемых технологических решений может быть достигнуто лишь за счет технико-экономического обоснования путем рассмотрения большого числа вариантов и выбора наилучшего. Это возможно в рамках автоматизации ТПП ЭВМ.

Автоматизированная система ТПП (АСТПП) – человеко-машинная система ТПП, в основу которой положен комплекс экономико-математических методов и моделей, организационных форм, электронно-вычислительной и организационной техники с соответствующим оборудованием и программно-математическим обеспечением. АСТПП рассматривают с трех взаимосвязанных сторон (структурной, информационной и функциональной), каждой из которых соответствует своя модель.

Структурная модель системы отражает состав входящих в нее частей, их назначение, взаимосвязь и место в общем процессе проектирования. Информационная модель отображает информационные связи между подсистемами и преобразование в них входной и справочно-нормативной информации в выходную. Функциональная модель системы (с помощью управляющей программы) устанавливает логическую связь (прямую и обратную) между отдельными подсистемами и направление хода проектирования в различных ситуациях.

Для реализации основных функций АСТПП необходимо техническое, математическое, программное, информационное, лингвистическое, методическое и организационное обеспечение.

Разработка ТП осуществляется на основе ЕСТПП, которая в свою очередь включает комплекс работ, связанных с технической готовностью предприятия к выпуску нового изделия заданной программы и номенклатуры. Исходные данные для разработки ТП:

- технические условия (ТУ) на изделие;
- комплект конструкторской документации (КД) на изделие;
- программа выпуска изделия (N , шт.);
- плановые сроки освоения производства ($T_{пл}$);
- отраслевые, внутризаводские типовые ТП, руководящие технические материалы (РТМ);
- технологические классификаторы деталей, каталоги оборудования и оснастки;
- материальные и трудовые нормативы.

3.5.4. Технология изготовления конструктивных модулей на основе печатных плат

Конструкции модулей ЭВМ на основе печатных плат (типовые элементы замены (ТЭЗ), ячейки, блоки элементов и т. п.) являются основными конструктивно-технологическими единицами ЭВМ, позволяющими унифицировать как схемно-конструкторские, так и технологические решения.

Типовая структура технологического процесса изготовления ТЭЗ включает следующие операции:

- входной контроль ЭРЭ и печатных плат;
- подготовка их к монтажу;
- установка комплектующих элементов на плату;
- нанесение флюса и его сушка;
- пайка (сварка);
- очистка ТЭЗ от остатков флюса;
- контрольно-регулирующие работы;
- технологическая тренировка;
- маркировка;
- герметизация;
- приемо-сдаточные испытания.

Рассмотрим технологические особенности выполнения основных операций.

Входной контроль – это технологический процесс проверки поступающих на завод-потребитель ЭРЭ, ИМС и печатных плат по параметрам, определяющим их работоспособность и надежность перед включением этих элементов в производство. Необходимость входного контроля вызвана ненадежностью выходного контроля на заводе-изготовителе, а также воздействием различных факторов при транспортировании и хранении, приводящих к ухудшению качественных показателей готовых изделий.

Входной контроль комплектующих элементов может быть как 100 %-м, так и выборочным. Объем выборки определяется в зависимости от принятого уровня вероятности, закона распределения погрешностей и заданной точности расчетов. Обычно устанавливается правило: если при выборочном контроле окажутся бракованными элементы и их количество превышает приемочное число, то проверке подлежит удвоенное количество изделий. В случае выявления при проверке удвоенного количества элементов хотя бы одного бракованного проверке подлежит вся партия.

Интегральные микросхемы, ЭРЭ и печатные платы должны пройти *подготовку к монтажу*. Они поступают на участок сборки уже подготовленными, с удостоверенным уровнем качества. Подготовка ЭРЭ и ИМС включает распаковку элементов, выпрямление, зачистку, формовку, обрезку и лужение выводов, размещение элементов в технологической таре в количестве, достаточном для выполнения производственного задания.

Для проведения подготовительных операций резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов и ИМС разработано множество типов технологического оборудования и оснастки. Выбор конкретного типа определяется условиями производства, производительностью и стоимостью. В условиях мелкосерийного производства подготовка осуществляется пооперационно с ручной подачей элементов, при массовом производстве – на установках комплексной подготовки, объединяющих две и более операции с автоматической подачей элементов в зону обработки.

Для повышения производительности сборочных аппаратов элементы упаковывают в технологические магазины, кассеты (для ИМС) или липкую ленту. Подача из магазинов является более дешевым способом, но подача с ленты более универсальна. Элементы могут клеиваться в ленту одного номинала (для автоматических линий) или разных номиналов и типоразмеров по программе (для отдельных автоматов). В последнем случае применяются комплектующие автоматы переклейки элементов (секвенсеры), их производительность в зависимости от типа колеблется от 2 до 14 тыс. эл/ч.

Установка элементов на печатные платы в зависимости от характера производства может выполняться вручную, механизированным и автоматизированным способами. При ручной сборке без индексации адреса подготовленные элементы раскладываются по номиналам в технологические кассеты, объединенные в кассетницы, а печатная плата с нанесенными со стороны установки маркировочными знаками, определяющими место элемента, его полярность и направление сборки, закрепляется в держателе с помощью быстрозажимных фиксаторов.

Установка дискретных ЭРЭ не требует вспомогательных средств, при установке ИМС используются специальные механические держатели, обеспечивающие заданное положение всех выводов, или вакуумные захваты. После сопряжения элементов с поверхностью платы их положение фиксируется одним из следующих методов: подгибкой или расплющиванием выводов у пассивных элементов, подгибкой двух диагонально расположенных выводов или путем установки в специальные кассеты ИМС со штыревыми выводами, приклеиванием к плате флюсом, клеем, липкой лентой ИМС с планарными выводами.

Основными методами выполнения электрических соединений при изготовлении модулей первого и второго уровней ЭВМ являются пайка и сварка. Для обеспечения высокого качества паяных соединений применяется ряд вспомогательных операций: *нанесение и подсушка флюса, предварительный нагрев платы и ЭРЭ*. Нанесение флюса на плату может осуществляться различными способами, выбор которых определяется составом флюса, технологической схемой процесса пайки, способом закрепления выводов элементов в отверстиях платы и требуемой степенью автоматизации. На практике получило распространение флюсование кистью, погружением, протягиванием, накатыванием, распылением, вращающимися щетками, пенное и волной.

Более надежное нанесение флюса на поверхность платы при уплотненном монтаже достигается использованием волнового флюсования. Нанесенный слой флюса перед пайкой подсушивается при температуре 353...375 К, а плата и ЭРЭ подогреваются.

Пайкой называется процесс соединения металлов в твердом состоянии путем введения в зазор припоя, взаимодействующего с основным металлом и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва. Достоинства паяных электрических соединений: низкое и стабильное электрическое сопротивление, универсальность и легкость автоматизации, контроля и ремонта. Недостатки метода пайки: высокая стоимость используемых цветных металлов и флюсов, длительное воздействие высоких температур, коррозионная активность остатков флюсов, выделение вредных веществ.

Выбор метода пайки зависит от программы выпуска изделий, особенностей конструкции, требований к качеству. При монтаже ПП в условиях единичного и мелкосерийного производства, во всех случаях проводного монтажа, при макетных, ремонтных и регулировочных работах эффективно применение индивидуальной пайки. *Групповая пайка* элементов со штыревыми выводами производится волной припоя на автоматизированных установках модульного типа, которые оснащаются конвейерами с постоянным или регулируемым углом наклона относительно зеркала припоя. В зависимости от типа модуля ширина конвейеров составляет 230, 300, 380, 455, 610 мм. Из этих модулей komponуются монтажные линии. Включение в состав линии модуля обрезки выводов позволяет упрощать процесс подготовки ЭРЭ к пайке.

Сварка – это процесс получения неразъемного соединения материалов под действием активизирующей энергии теплового поля, деформации, ультразвуковых колебаний или их сочетаний. По сравнению с пайкой сварка характеризуется следующими преимуществами: более высокой механической прочностью соединений, отсутствием присадочного материала, незначительной дозированной тепловой нагрузкой ЭРЭ, возможностью уменьшения расстояний между контактами. К недостаткам метода следует отнести: критичность при выборе сочетаний материалов, увеличение переходного сопротивления из-за образования интерметаллидов, невозможность группового контактирования соединений, сложность их ремонта. Для образования сварных монтажных соединений в настоящее время наиболее часто используются следующие виды диффузионной сварки в твердой фазе: ультразвуковая, термокомпрессионная, термозвуковая, косвенным импульсным нагревом, расщепленным электродом.

Отмывка ТЭЭ. После пайки на поверхности плат остается некоторое количество флюса и продуктов его разложения, которые способны вызвать коррозию контактных соединений и ухудшить диэлектрические характеристики используемых материалов. Поэтому после монтажа предусматривается очистка плат, способ проведения которой определяется степенью и характером загрязнений, требуемой надежностью выполнения операции. Обычно применяют отмывку в различных моющих средах. Технологически просто происходит удаление остатков водорастворимых флюсов путем промывки плат в проточной горячей воде с использованием мягких щеток или кистей. Следы канифольных флюсов удаляются промывкой в течение 0,5...1,0 мин в таких растворителях, как спирт, смесь бензина и спирта (1 : 1) или фреона и ацетона (7 : 1), трихлорэтилен, четыреххлористый углерод и др.

Выходной контроль ТЭЭ можно условно разделить на три последовательных этапа:

- 1) визуальный контроль правильности сборки и качества паяных соединений;
- 2) контроль правильности монтажа и поиск неисправностей;
- 3) функциональный контроль.

При визуальном контроле проверяется соответствие установленных ЭРЭ и ИМС требованиям конструкторской и технологической документации на тип, номинал, маркировку, форму изгиба выводов, полярность, место на плате. Установленные элементы не должны иметь надломов выводов, трещин или царапин корпуса, повреждений используемых изоляционных трубок, маркировочных знаков и т. д. Качественные паяные соедине-

ния характеризуются «скелетной» формой, при которой через тонкий слой припоя хорошо просматриваются контуры паяемых элементов, гладкой блестящей поверхностью без пор, раковин, вздутий, пузырей, посторонних включений. Визуальный контроль соединений обычно дополняется выборочной проверкой их механической прочности, а при производстве ответственных изделий – просвечиванием паек рентгеновскими лучами или тепловизионным контролем соединений.

При выпуске ТЭЗ крупными сериями применяют автоматические универсальные или специализированные тестеры, модульные измерительные системы. Методика автоматического контроля состоит в том, что к контролирующему прибору подключаются все точки на плате, где впаяны элементы, и все контакты разъемов, далее проверяются все межсоединения и сами элементы. Контрольная система управляется ЭВМ, а для каждого типа модулей разрабатывается свой тест.

Повышение технологичности конструкции модулей ЭВМ с точки зрения контроля предполагает стандартизацию их габаритных размеров, разъемных соединителей, шин питания, контрольных точек в модуле.

3.5.5. Особенности технологии поверхностного монтажа

Развитие монтажно-сборочных работ при изготовлении ТЭЗ обусловило переход от монтажа компонентов с выводами в отверстия к поверхностному монтажу безвыводных компонентов в микрокорпусах или компонентов с планарными выводами. Монтаж этого вида по сравнению с традиционным методом имеет ряд преимуществ. Он обеспечивает:

- 1) повышение плотности компоновки, ввиду того что многие элементы, предназначенные для монтажа, имеют шаг расположения контактных площадок (КП), равный 1,25 или 0,625 мм, и поэтому их можно автоматически монтировать на двух сторонах платы;
- 2) уменьшение габаритов и веса ТЭЗ;
- 3) снижение затрат на изготовление ПП вследствие устранения операций сверления монтажных отверстий, их очистки, металлизации и контроля;
- 4) повышение быстродействия и улучшение электрических характеристик элементов;
- 5) исключение таких подготовительных операций при сборке, как выпрямление, обрезка, формовка выводов;
- 6) повышение надежности межсоединений;
- 7) снижение стоимости монтажа.

Внедрение поверхностного монтажа связано с переводом всей элементной базы на новый вид исполнения, повышением требований к ПП (согласование с компонентами и кристаллодержателями по ТКР, улучшение теплоотвода, отсутствие коробления, геометрическая стабильность, уменьшение ширины проводников и зазоров между ними и т. п.), разработкой новых ТП и созданием необходимого количества производительного оборудования.

Безвыводные микроэлементы для монтажа на поверхность поступают с предприятий-изготовителей в упаковке, удобной для загрузки в высокопроизводительные автоматы сборки. Наибольшее распространение получила автоматизированная упаковка в ленту с профилированными ячейками. Для изготовления ленты используется специально обработанная бумага с низким электрическим сопротивлением или проводящая виниловая пластмасса, что исключает повреждение элементов электростатическими зарядами. После автоматической загрузки в ячейки предварительно ориентированных элементов лентоноситель заклеивается (заваривается) дополнительной пленкой с антистатическим покрытием и сматывается в катушки. Для более точной фиксации упаковки в сборочном автомате в лентоносителе предусмотрена одно- или двухсторонняя перфорация. Кроме указанного способа, микроэлементы могут поступать на сборку в специальных трубчатых магазинах или россыпью.

Монтаж на поверхность ПП может быть выполнен в трех основных конструктивных вариантах, каждый из которых имеет свою технологию сборки и пайки.

Вариант 1. Предусматривается размещение на одной стороне ПП только компонентов, монтируемых в сквозные отверстия, а на второй – компонентов для поверхностного монтажа. Процесс сборки платы включает следующие операции: нанесение на нижнюю ее сторону клея дозатором или через сетчатый трафарет, установку безвыводных микрокомпонентов, отверждение клея под действием ультрафиолетового излучения, поворот платы на 180° , установку ЭРЭ с выводами в монтажные отверстия, нанесение флюса, сушку, пайку и отмывку. Соединение элементов с платой чаще всего осуществляется путем пайки волной припоя.

Однако обычная волна припоя оказывается неэффективной для монтажа микрокорпусов, так как припой не может «подтекать» под них и достигать экранированных корпусами контактных площадок. В случае двойной волны обеспечивается высокое качество соединений по всему периметру. Первая интенсивная волна приводит к хорошему смачиванию при-

поем металлизированных участков, а вторая слабая волна – к удалению избытка припоя с монтажных соединений. Эффективность смачивания контактных площадок ПП и элементов повышается также при переходе от обычной параболической волны к омега-волне. Это достигается заменой ламинарного движения припоя в первом случае на турбулентное во втором. Волновая пайка возможна, если поверхностно монтируемые элементы (ПМЭ) выдерживают температуру расплавленного припоя в течение 3 – 5 с.

Вариант 2. При смешанном расположении компонентов на одной стороне ПП и ПМЭ на второй технологический процесс сборки усложняется. Сначала монтируют элементы в микрокорпусах на одной стороне ПП оплавлением припоя, а затем (см. вариант 1) устанавливают остальные элементы с выводами и без них и паяют волной припоя. Для оплавления припоя применяют индивидуальные и групповые паяльники, конвейерные печи, нагрев в газовой среде, электросопротивлением.

Вариант 3. Предусматривается установка элементов только на поверхность ПП. Подготовительный этап изготовления предусматривает нанесение дозированного количества клея (на нижнюю сторону) и припойной пасты через сетчатый трафарет. Клей после установки ПМЭ отверждается под действием ультрафиолетового излучения. Для электрического монтажа таких плат используется пайка в паровой фазе (конденсационная), сфокусированным световым лучом или инфракрасным излучением. Конденсационная пайка основана на расплавлении припоя на контактных площадках ПП и микрокорпусах в атмосфере насыщенного пара, образуемого кипением фторсодержащей жидкости. Пар, имеющий температуру кипения жидкости, полностью обволакивает плату и начинает на ней конденсироваться, отдавая скрытую энергию парообразования. Метод обеспечивает высокую чистоту среды и не требует специальной системы для поддержания температуры. К недостаткам метода относятся высокая стоимость оборудования и используемого вещества, необходимость специальных систем шлюзования для исключения потерь теплоносителя.

Более экономичной является пайка ИК нагревом. Разделение зоны обработки на два участка (в первом производится предварительный нагрев и выравнивание температур платы и компонентов, а во втором – пайка под действием мощного импульса энергии) позволяет уменьшить брак из-за возникновения в соединениях больших внутренних напряжений. Для ограничения зоны нагрева и снижения термического влияния излучения на ЭРЭ применяют защитные маски из металла.

3.5.6. Технология сборки блоков и внутриблочного монтажа

Изготовленные ТЭЗ с удостоверенными показателями качества поступают на сборку и монтаж блоков. Механическое крепление отдельных деталей и изделий электротехники производится с помощью разъемных и неразъемных соединений. Основным видом разъемных соединений является резьбовое, с помощью которого крепятся панели, каркасы, направляющие, переключатели, тумблеры, переменные резисторы, ручки, трансформаторы, электроизмерительные приборы и др.

В условиях крупносерийного и массового производства целесообразно применять автоматическое оборудование, в котором сопряжение собираемых деталей, подача и ориентация крепежа, выполнение соединений осуществляются механизмами в едином технологическом цикле. Однако такое оборудование достаточно сложно, имеет низкую надежность и высокую стоимость.

Неразъемные механические соединения выполняются пайкой, сваркой, развальцовкой, заклепками, склеиванием, обжимкой, опрессовкой или запрессовкой.

Монтаж блоков ЭВМ производится одиночными проводами, экранированными и плоскими кабелями, жгутами и коммутационными жесткими и гибкими платами (печатными, проводными, ткаными).

При монтаже одиночными проводами прокладка трасс осуществляется по кратчайшим расстояниям, что обеспечивает минимальные паразитные связи между электрическими цепями. Процесс монтажа выполняется пайкой или накруткой. Однако такой монтаж характеризуется низкой производительностью из-за последовательного проведения работ, низкой вибропрочностью, широким разбросом параметров линий связи. Поэтому изолированные провода, проложенные в одном направлении, в ряде случаев объединяют в жгуты. Это позволяет вести подготовительные операции параллельно со сборкой, использовать автоматизированное оборудование или линии изготовления жгутов, обеспечивать механическую прочность и стабильность параметров при повышенных вибрационных и ударных нагрузках.

Широко используется монтаж плоскими ленточными кабелями. Плоские кабели представляют собой одно- или многослойную структуру, состоящую из многожильных ленточных проводов или гибких печатных токопроводящих шин и различных по конструкции соединителей (специальных разъемов, коммутационных плат), с помощью которых кабели соединяются друг с другом и с остальными элементами монтажа.

В ЭВМ используют кабели с числом жил 60 и более. Для выполнения связей плоским кабелем применяют кабельные соединители, которые представляют собой отрезок кабеля со специальными разъемными соединителями на обоих концах. Разъемные соединители содержат контактную розетку, многослойную печатную плату и элементы крепления кабеля к плате. Для подключения кабельного соединителя на панели предусматривают контактные вилки.

При электрическом монтаже плоскими кабелями их укладывают в кабельные каналы и закрепляют зажимами.

3.5.7. Технология общей сборки ЭВМ

Отдельные детали, сборочные единицы (ТЭЗ, ячейки) и блоки, прошедшие контроль, поступают на общую сборку и монтаж ЭВМ. Сюда входят следующие основные операции:

- изготовление жгутов и кабелей;
- сборка несущего основания (панели, рамы, стойки);
- межблочный монтаж с помощью жгутов;
- выходной контроль;
- регулировка;
- испытания.

Изготовление жгутов. Исходя из конструкции монтируемой ЭВМ, жгуты разделяют на плоские и объемные. Для их изготовления применяются монтажные медные провода с изоляцией различного типа: волокнистой из шелковых нитей или стекловолокна, полихлорвиниловой и волокнисто-полихлорвиниловой. При повышенной температуре (до 523 К) и влажности используют провода с фторопластовой изоляцией, для аппаратуры, работающей при 203 К – провода в шланговой оболочке из морозостойкой резины. Сигнальные цепи для защиты от электромагнитных помех коммутируют экранированными проводами с обязательным заземлением каждого экрана в одной (при длине до 100 мм) или двух (при длине свыше 100 мм) точках.

Процесс изготовления жгутов состоит из следующих операций: снятие изоляции, скручивание оголенных концов, флюсование и лужение, маркировка. Сборка жгутов в соответствии с чертежом и таблицей монтажных соединений производится вручную, с применением электрифицированного шаблона или на станках с ЧПУ. В условиях серийного производства используется автоматическое оборудование с ЧПУ. Современные

модели оборудования позволяют изготавливать жгуты на шаблонах размером 550 × 1250 мм двадцатью проводами разных цветов. В ряде конструкций широко используются многожильные плоские кабели.

После сборки жгутов и кабелей осуществляют *сборку и монтаж несущего основания*. Несущее основание собирают с применением разъёмных и неразъёмных соединений. На его плоскостях укладываются, согласно монтажной схеме, жгуты и кабели, устанавливаются разъёмы, контактные колодки. Жгуты на каркасе крепятся металлическими скобами с установкой под ними изоляционных трубок или прокладок из лакоткани. Расстояние между скобами (200...500 мм) зависит от диаметра жгута. При размещении жгутов учитывают требования технологичности машины при ремонте. Одновременно с укладкой жгута разводят концы одиночных проводов и кабелей к соответствующим контактам с последующей коммутацией пайкой или накруткой. Допускается наложение жгутов или их участков друг на друга. Для предохранения жгутов из неэкранированных проводов от механических повреждений в местах их прокладки через отверстия в стенках металлических шасси или экранов предусматривают изоляционные трубки.

В смонтированный каркас рамы или стойки ЭВМ последовательно вставляются отдельные блоки и соединяются через разъёмы с остальными элементами схемы. После выполнения монтажных работ блок закрепляется на каркасе с помощью винтовых соединений. Заканчивается общая сборка закреплением регулировочных элементов, установкой кожухов и разъёмов питания.

Собранное изделие подвергается техническому *выходному контролю*, который состоит из визуального контроля монтажа, автоматического контроля правильности монтажа, функционального и системного контроля.

При внешнем осмотре заготовленных монтажных проводов проверяют марку, сечение, длину, способ и качество заделки концов, маркировку, отсутствие надразов жил и качество их лужения, отсутствие загрязнений и повреждений изоляции. Путём внешнего осмотра и сравнения с образцами проверяют тип, номинальное значение, маркировку, длину, форму изгиба и качество лужения выводов, отсутствие царапин, сколов, трещин корпуса и повреждения надписей, резких изгибов и надломов выводов навесных ЭРЭ, подготовленных к монтажу. Визуально проверяют правильность раскладки проводов в жгутах, длину ответвлений и качество вязки жгута, и определяют путём прозвонки соответствие изготовленного жгута схеме раскладки.

Крепление деталей, сборочных единиц и прочность паек контролируют внешним осмотром. Одновременно проверяют целостность проводов в местах пайки. При осмотре паек следят, чтобы изоляция проводов подходила вплотную к контакту, не имела ожогов. Механическую прочность крепления деталей, сборочных единиц и монтажа проверяют на специальных вибростендах. Режимы испытаний и их продолжительность определяются техническими условиями на ЭВМ.

Контроль правильности электрических соединений является необходимой операцией перед настройкой. В единичном и мелкосерийном производствах эту операцию выполняют вручную с помощью универсальной измерительной аппаратуры по картам сопротивлений и монтажной схеме. В массовом производстве для этих целей широко применяют автоматические тестеры, работающие по принципу схем неуравновешенного моста. На заключительном этапе контроля в условиях массового производства применяют специальные технологические стенды контроля.

Особо важной технологической операцией является *регулировка* аппаратуры. Она включает комплекс работ по доведению параметров сборочных единиц, блоков и всего устройства до значений, соответствующих требованиям технических условий, стандартов или параметров образцов, принятых за эталон. Регулировка состоит в том, чтобы, не изменяя схемы и конструкции, получить заданные параметры. Ее осуществляют путем целенаправленного изменения параметров регулировочных элементов (переменных резисторов, сердечников катушек индуктивности и т. д.) и методом подбора специальных предусмотренных схемой элементов (резисторов, конденсаторов).

Для правильной организации процесса регулировки необходимы соответствующая измерительная аппаратура и инструмент. Точность применяемой измерительной аппаратуры, как правило, должна на порядок превышать заданную точность настройки.

Регулировку аппаратуры в зависимости от вида организации производства осуществляют универсальной измерительной аппаратурой или специальной заводской оснасткой, которая представляет собой различные имитаторы, эквиваленты нагрузок, пульта управления и автоматические стенды.

При регулировке ЭВМ используются в основном два метода:

1) регулировка по измерительным приборам (инструментальная регулировка);

2) регулировка путем сравнения настраиваемого прибора с образцом (метод электрического копирования).

Испытания – это процесс определения по установленным методикам количественных и качественных параметров и характеристик изделий ЭВМ с целью оценки их соответствия требованиям технических условий (технических заданий, документации и т. п.). Основная задача испытаний состоит в проверке качества материалов, элементной базы, деталей и сборочных единиц изделий; в контроле точности и устойчивости технологического процесса; в проверке работоспособности изделий при воздействующих внешних факторах. Различают физические испытания изделий ЭВМ или их макетов и испытания с использованием моделей.

При производстве ЭВМ испытаниям могут подвергаться как образцы, так и серийно изготавливаемые изделия. Цели испытаний меняются в зависимости от этапов проектирования, производства и эксплуатации ЭВМ. Испытания включают контроль параметров изделия при нормальных условиях и воздействии определенных внешних факторов в течение заданного промежутка времени. Их разделяют на электрические, климатические, механические и специальные.

Электрические испытания включают проверку соответствия указанным в документации значениям входных и выходных электрических параметров изделий ЭВМ, электрической прочности и электрического сопротивления, проверку общей работоспособности изделия.

Климатические испытания предусматривают проверку изделий на устойчивость к циклическому изменению температур, тепло-, холодо- и влагоустойчивость, устойчивость к повышенному и пониженному давлению, к воздействию инея, морского тумана и т. п.

Механические испытания предусматривают проверку изделий на вибропрочность, виброустойчивость, на ударную устойчивость и прочность, устойчивость к центробежному ускорению, воздействию звукового давления и т. д.

К *специальным* относятся, например, испытания на воздействие радиации, солнечного излучения, биологических факторов и т. д.

По продолжительности испытания подразделяются на ускоренные (форсированные) и нормальные. По результату воздействия на изделие различают разрушающие и неразрушающие испытания.

Изделия, изготавливаемые серийно, обычно подвергают приемосдаточным, периодическим и типовым испытаниям.

При проведении испытаний обязательно разрабатывается программа испытаний. Она предусматривает установление целей испытаний, объема, объекта и методики проводимых экспериментов, порядка, условий, места и сроков проведения испытаний, оформление протоколов и отчетов.

Таким образом, испытания являются одним из важнейших факторов поддержания качества производственного процесса создания ЭВМ.

Вопросы для самопроверки по теме 3.5

1. Дайте определение производственного процесса. Что он включает?
2. Дайте определение технологического процесса.
3. Назовите основные элементы технологического процесса.
4. Приведите классификацию технологических процессов.
5. Назовите отличительные черты маршрутного, маршрутно-операционного и операционного техпроцессов.
6. Сравните различные типы производства (единичного, серийного, массового).
7. Дайте определение коэффициента закрепления операций. Приведите его значение для различных типов производства.
8. Дайте определение технологической подготовки производства.
9. Приведите структурную схему ТПП.
10. Перечислите основные задачи, решаемые ТПП.
11. Что такое ЕСТПП?
12. Что представляет собой АСТПП?
13. Назовите исходные данные для разработки технологического процесса.
14. Перечислите основные операции техпроцесса изготовления ТЭЗ.
15. Обоснуйте необходимость операции входного контроля.
16. В чем заключается операция подготовки к монтажу ИМС, ЭРЭ, ПП?
17. Перечислите и охарактеризуйте способы установки элементов на ПП.
18. Сравните способы выполнения электрических соединений (пайка, сварка).
19. Зачем необходима технологическая операция отмывки ТЭЗ?
20. Назовите и охарактеризуйте основные этапы выходного контроля ТЭЗ.
21. Перечислите преимущества поверхностного монтажа.

22. Перечислите и сравните основные варианты монтажа на поверхность ПП.
23. Какие виды пайки применяются при поверхностном монтаже ПП?
24. Как осуществляется механическое крепление деталей и изделий ЭВМ?
25. Перечислите способы монтажа блоков ЭВМ?
26. Перечислите основные операции техпроцесса общей сборки и монтажа ЭВМ?
27. Назовите основные разновидности жгутов, применяемых при монтаже ЭВМ, и приведите операции техпроцесса их изготовления.
28. Приведите особенности технологической операции сборки и монтажа несущего основания.
29. В чем заключается операция выходного контроля?
30. Какие работы выполняются при регулировке аппаратуры?
31. Какие виды испытаний ЭВМ проводятся?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уровень научно-технического прогресса в значительной мере определяется темпами развития ЭВМ. Средства вычислительной техники используются при решении конструкторско-технологических, экономических, управленческих, творческих и других задач. Непрерывное расширение круга задач, решаемых с помощью ЭВМ, вызывает их постоянное усложнение, ужесточение требований к надежности, быстродействию, габаритам, весу.

Перед разработчиком ЭВМ стоит ряд задач, решение которых зависит от полного учета факторов, влияющих на процесс измерения, обработки и хранения информации. Эти факторы имеют различную физическую природу. При создании ЭВМ требуется решение задач противодействия климатическим, механическим и радиационным факторам с целью обеспечения теплового режима отдельных элементов и устройств в целом, помехоустойчивости и нормальных электрических режимов работы, механической прочности, надежной и безопасной работы ЭВМ, нормальной работы оператора и охраны окружающей среды.

От современного специалиста, занимающегося разработкой электронных вычислительных машин, требуется знание основных стадий производства отдельных деталей, узлов и ЭВМ в целом, свойств используемых материалов, методов их обработки, путей снижения материалоемкости, микроминиатюризации элементной базы.

Разработанный учебно-методический комплекс поможет студентам в успешном изучении дисциплины «Конструирование и технология производства ЭВМ», позволит ориентироваться в современных конструкциях и технологиях производства ЭВМ, расширить их кругозор.

РЕЙТИНГОВЫЙ КОНТРОЛЬ (для студентов дневной формы обучения)

Рейтинговая система контроля в процессе изучения дисциплины «Конструирование и технология производства ЭВМ» включает следующие направления оценки успешности обучения:

1. Оценка отношения студента к выполнению своих обязанностей на этапе изучения дисциплины.
2. Текущий контроль успешности изучения дисциплины.
3. Оценка активности и творческого отношения студента к овладению выбранной специальностью при изучении дисциплины.

Для оценки отношения студента к выполнению своих обязанностей на этапе изучения дисциплины используется контроль посещаемости занятий: за каждое посещение лекционного занятия начисляется 3 балла, и 5 баллов за своевременную защиту лабораторной работы. За пропуски без уважительной причины лекционных занятий и несвоевременную защиту лабораторной работы соответствующее количество баллов вычитается из общей суммы баллов, набранных студентом за учебный семестр.

Таким образом, за учебный семестр по этому виду оценки студент может набрать 74 балла.

Текущий контроль успешности изучения дисциплины заключается в выполнении выходных тестов по каждому блоку и защите лабораторных работ. За учебный семестр проводятся две контрольные работы на 6-той и 12-той неделе.

Полное знание материала каждой учебной темы максимально оценивается в 50 баллов, защита лабораторной работы – 20 баллов.

Таким образом, максимальное количество баллов, которое студент может заработать в процессе семестра по данному виду деятельности, составляет 630 (550 за теоретический материал по 11 темам и 80 за 4 лабораторные работы).

Оценка активности и творческого отношения студента к овладению выбранной специальностью при изучении дисциплины осуществляется в соответствии со следующей шкалой:

Вид активности студента	Баллы рейтинга
Выступление с докладом	до 30
Участие в создании лабораторной базы дисциплины	до 30
Подготовка НИРС по тематике дисциплины	до 50

По итогам работы в семестре рассчитывается рейтинг студента путем суммирования набранных им баллов. Если в течение семестра студент набрал менее 440 баллов, он не допускается к сдаче экзамена. Если рейтинг студента составил более 440 баллов, то студент считается выполнившим учебный план по дисциплине и имеет право на автоматическое получение оценки в соответствии со следующей шкалой:

Баллы рейтинга	Оценка
700 – 734	8
650 – 700	7
600 – 650	6
550 – 500	5
450 – 500	4
440 – 450	3

Для получения итоговой 10-бальной оценки по дисциплине (включая 6 баллов, полученных в процессе семестра и максимального количества баллов на экзамене – 4) студент должен:

- иметь систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- проявлять самостоятельную творческую работу на лабораторных занятиях;
- активно участвовать в групповых обсуждениях, выступать с самостоятельно подготовленными докладами по тематике учебного курса;
- иметь выраженную способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- показывать полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, в том числе научных публикаций;
- участвовать в научной работе и работе, проводимой по созданию лабораторной базы по дисциплине.

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР: Учеб. пособие для вузов / И.Г. Мироненко, В.Ю. Суходольский, К.К. Холуянов; Под ред. И.Г. Мироненко. – М.: Высш. шк., 2002.
2. Алексеев В.Ф. Принципы конструирования и автоматизации проектирования РЭУ: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 2003.
3. Достанко А.П., Пикуль М.И., Хмыль А.А. Технология производства ЭВМ: Учебник. - Мн.: Высш. шк., 1994.
4. Каленкович Н.И., Фастовец Е.П., Шамгин Ю.В. Механические воздействия и защита РЭА: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1989.
5. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для студентов специальности «Конструирование и технология радиоэлектронных средств». / Н.С. Образцов, В.Ф. Алексеев, С.Ф. Ковалевич и др.; Под ред. Н.С. Образцова. – Мн.: МРТИ, 1984.
6. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990.
7. Пикуль М.И., Русак И.М., Цырельчук Н.А. Конструирование и технология производства ЭВМ: Учеб. – Мн.: Выш. шк., 1996.
8. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976.
9. Савельев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и систем: Учеб. для вузов по спец «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». - М.: Высш. шк., 1989.
10. Технология поверхностного монтажа: Учеб. пособие. / С.П. Кундас., А.П. Достанко., Л.П. Ануфриев. и др. – Мн.: Армита-маркетинг, - менеджмент., 2000.
11. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: Учеб. / А.П. Достанко, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль и др. – Мн.: Выш. шк., 2002.
12. Ханке Х.И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1980.

Дополнительная литература

13. AutoCAD 2000 / Э.Т. Романычева., Т.Ю. Трошина. – М.: ДМК, 1999.
14. Конструирование и расчет больших гибридных интегральных схем, микросборок и аппаратуры на их основе: Учеб. пособие для вузов / Г.В. Алексеев и др.; Под ред. Б.Ф. Высоцкого. – М.: Радио и связь, 1981.
15. Куземин А.Я. Конструирование и микроминиатюризация электронно-вычислительной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1985.
16. Кундас С.П., Ланин В.Л., Ануфриев Л.П. Моделирование технологических процессов производства РЭС и ЭВС. – Мн.: БГУИР, 2000.
17. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: Справочник / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликова и др. – М.: Радио и связь, 1989.
18. Русак И.М., Луговский В.П. Технические средства ПЭВМ / Под ред. И.М. Русака: Справочник.– Мн.: Выш. шк., 1996.
19. Соловьев В.В., Разумеев Р.А., Сульжиц В.И. Работа в системе автоматизированного проектирования PCAD. Ч. 1. Проектирование принципиальных схем. – Мн.: БГУИР, 1994.
20. Соломахо В.Л., Томилин Р.И., Цитович Б.В., Юдовин Л.Г. Справочник конструктора-приборостроителя. – Мн.: Выш. шк., 1983.
21. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ: Учеб. для студ. вузов по спец. «Вычислительные машины, комплексы и сети». – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991.

Учебное издание

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
для студентов специальности 1-40 02 01

Составитель

МОЛОДЕЧКИНА Татьяна Викторовна

Редактор М.В. Хартова

Дизайн обложки И.С. Васильевой

Подписано в печать 26.12.05. Формат 60×84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 13,69. Уч.-изд. л. 12,6. Тираж 60. Заказ 1468.

Издатель и полиграфическое исполнение –
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 ЛП №02330/0133128 от 27.05.04
211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29