

М.В. САВЕЛЬЕВ

КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

Допущено Министерством
образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению
подготовки дипломированных специалистов
«Информатика и вычислительная техника»



Москва
«Высшая школа» 2001

УДК 681.3
ББК 32.973
С 12

Рецензенты: кафедра вычислительной техники Таганрогского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой — доктор технических наук, профессор Ю. В. Чернухин); доктор технических наук, профессор С. В. Соколов (кафедра систем управления летательных аппаратов, Ростовского института ракетных войск)

Савельев М. В.

С 12 Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ:
Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк. 2001. — 319 с.: ил.

ISBN 5-06-004038-0

Изложены вопросы разработки средств вычислительной техники, создания конструкции, особенности конструирования; рассмотрена защита конструкций от механических, атмосферных, температурных влияний, временной нестабильности, электрических помех; дано описание технологии и экологии производства средств вычислительной техники, надежности конструкции, методов обработки изделий, защитных покрытий. Предложены основные меры по защите окружающей среды при производстве ЭВМ, которые выполняются с учетом источников и видов загрязнений; современная технология создания ЭВМ описана применительно для гибких производственных систем.

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети», «Информационно-измерительная техника и технологии», «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», «Конструирование и технология электронно-вычислительных средств», «Системы автоматизированного проектирования». Может быть полезно для студентов и аспирантов других электротехнических специальностей.

УДК 681.3
ББК 32.973

ISBN 5-06-004038-0 © ГУП «Издательство «Высшая школа», 2001

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства «Высшая школа», и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается.

Предисловие	6
ЧАСТЬ 1.....	7
КОНСТРУИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ	7
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	7
1.1. Основные понятия и определения	7
1.2. Факторы, влияющие на работоспособность ВТ	10
1.3. Показатели конструкции ВТ	11
2. РАЗРАБОТКА ВТ	13
2.1. Организационные вопросы разработки ВТ	13
2.2. Единая система конструкторской документации	15
3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИИ.....	18
3.1. Конструктивная преемственность	19
3.2. Технологичность	20
3.3. Точность.....	23
3.3.1. Выбор конструкций и ограничение их разнообразия	23
3.3.2. Ошибки параметров конструкций	23
3.3.3. Расчет отклонений параметров конструкции	24
3.3.4. Вероятностный метод расчета отклонения параметров	26
3.4. Надежность	27
3.4.1. Критерии надежности	27
3.4.2. Методы обеспечения и повышения надежности	29
3.4.3. Расчет надежности	30
3.5. Экономичность	31
3.6. Эргономичность и эстетичность	33
3.7. Патентоспособность	34
4. ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	36
4.1. Механические воздействия	36
4.1.1. Методы расчета и анализа вибраций	36
4.1.2. Метод расчета на виброустойчивость	39
4.1.3. Амортизация нестационарных ВТ	39
4.2. Охлаждение ВТ	42
4.2.1. Передача теплоты в электронных устройствах	44
4.2.2. Основные теплофизические задачи, возникающие при конструировании ВТ	48
4.3. Атмосферные воздействия	51
4.3.1. Защита покрытиями	51
4.3.2. Защита герметизацией	53
4.4. Воздействия электрического характера	54
4.4.1. Причины возникновения помех	57
4.4.2. Электрические связи между элементами в ВТ	58
4.4.3. Помехи при соединении элементов ВТ «короткими» связями	59
4.4.4. Помехи при соединении элементов «длинными» связями	61
4.4.5. Помехи в каналах связи	63
4.4.6. Методы снижения паразитных связей	65
4.4.7. Методы защиты от помех	70
4.5. Временная нестабильность	73
5. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ВТ	75
5.1. Современное состояние САПР электронных устройств	75
5.2. Функциональные возможности и структура системы P-CAD	77
5.3. Организация работы с системой P-CAD	82
Часть 2.....	87
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	87
1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ САПР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	87
1.1. Необходимость создания САПР	87
1.2. Принципы создания САПР	88
1.3. Виды обеспечения САПР	88
1.4. Классификация САПР	91
1.5. Стадии проектирования	92
1.6. Способы организации процесса проектирования	92
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР	96
2.1. Математические модели	96
2.2. Методика составления математической модели	97
2.3. Методы получения моделей элементов вычислительных систем	98
3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОГО ЭТАПА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВС	

.....	100
3.1. Математические модели схем	100
3.1.1. Модель схемы в виде неориентированного мультиграфа	101
3.1.2. Модель схемы в виде ориентированного мультиграфа	103
3.1.3. Представление схемы гиперграфом и ультраграфом	104
3.2. Математические модели монтажного пространства	107
3.3. Последовательные алгоритмы структурного синтеза	110
3.5. Задача размещения	112
3.6. Задача трассировки	113
3.7. Выбор критериев оптимальности	115
3.7.1. Частные критерии	116
3.7.2. Аддитивные критерии	116
3.7.3. Мультипликативные критерии	117
3.7.4. Минимаксные критерии	118
3.8. Оценка значений весовых коэффициентов	120
Заключение	122
Часть 3	124
ТЕХНИЧЕСКОЕ, ПРОГРАММНОЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	124
1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР	124
1.1. Организация технических средств САПР	124
1.2. Режимы работы КТС САПР	125
1.3. Технические средства машинной графики	126
1.4. Специализированные сопроцессоры	129
1.5. Речевые устройства для оперативной связи проектировщика	129
1.6. Вычислительные сети САПР	130
2. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР	132
2.1. Базы данных в САПР	132
2.2. Проектирование баз данных	135
2.3. Модели данных	138
2.3.1. Реляционная модель данных	138
2.3.2. Иерархическая модель данных	140
2.3.3. Сетевая модель данных	141
2.4. Система управления базами данных	143
2.4.1. Категории баз данных	144
2.4.2. Сетевая база данных	144
2.4.3. Реляционная база данных	145
3. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ САПР С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	148
3.1. Анализ современных требований к САПР	148
3.2. Архитектура интеллектуальных САПР	150
3.3. Количественные и качественные характеристики интеллектуальных САПР	152
3.4. Моделирующая интеллектуальная САПР	153
3.5. Синтезирующая интеллектуальная САПР	154
3.6. Методы структурного и параметрического синтеза	156
3.6.1. Общая характеристика методов синтеза	156
3.6.2. Методы структурного синтеза	157
3.6.3. Параметрический синтез	161
Заключение	163
Часть 4	164
ТЕХНОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ЭВМ	164
1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	164
1.1. Понятия и определения технологических процессов	164
1.2. Порядок проектирования технологического процесса	165
1.2.1. Виды технологических процессов	166
1.2.2. Виды технологических баз	166
1.2.3. Виды контроля	166
1.3. Технологическая документация	167
1.4. Технологическая подготовка производства	168
1.4.1. Технологичность элементов и деталей ЭВМ	169
2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ЭВМ	169
2.1. Электроэрозионные методы обработки	169
2.1.1. Электроискровая обработка	170
2.1.2. Метод электроискровой обработки непрофилированным (проволочным) электродом	171
2.1.3. Анодно-механическая обработка	172

2.2. Лучевые методы обработки.....	173
2.2.1. Электронно-лучевая обработка.....	173
2.2.2. Светолучевая обработка	174
2.3. Обработка ультразвуком	175
2.4. Электрохимическая обработка.....	176
2.4.1. Анодно-гидравлическая обработка в проточном электролите	176
2.5. Обработка плазмой	177
3. ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ.....	179
3.1. Виды покрытий	179
3.2. Металлические покрытия	179
3.3. Лакокрасочное покрытие.....	180
3.4. Контроль покрытий.....	181
4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	182
4.1. Механическая обработка печатной платы	182
4.2. Получение рисунка печатной платы	182
4.2.1. Фотопечать	182
4.2.2. Трафаретная печать (сеткографический метод)	183
5. ЭКОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ.....	184
5.1. Источники и виды загрязнений окружающей среды при производстве ЭВМ	184
5.1.1. Сточные воды при производстве ЭВМ	185
5.1.2. Энергетические загрязнения	185
5.2. Основные меры по защите окружающей среды	185
5.3. Защита атмосферы	186
5.4. Очистка сточных вод	188
5.5. Очистные сооружения предприятия.....	188
5.6. Обработка твердых отходов.....	189
6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭВМ И СИСТЕМ	190
6.1. Основные характеристики и параметры надежности	190
6.2. Структурная надежность	200
6.3. Структурные методы повышения надежности ЭВМ.....	207
6.4. Информационные методы повышения надежности ЭВМ.....	223
6.5. Повышение надежности передачи информации в ЭВМ с помощью волоконно-оптических линий связи	234
Часть 5 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ.....	244
1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА	244
1.1. Системные принципы создания гибких автоматизированных производств, общие направления автоматизации	244
1.2. Микропроцессорные вычислительные устройства в сенсорных системах роботов	251
1.2.1. Методы и алгоритмы видеоанализа	253
1.2.2. Программно-аппаратные средства реализации систем технического зрения на базе микроЭВМ	256
1.2.3. Специализированные видеопроцессоры для обработки и анализа изображений	258
Заключение	262
1.3. Промышленные роботы микроэлектроники.....	262
1.3.1. Манипуляторы промышленных роботов	266
2. ЛОКАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ В ГАП	269
2.1. Архитектура вычислительных систем для ГАП.....	269
2.2. Принципы построения малых ЛВС	271
2.3. Основы моделирования ЛВС	272
2.4. Общий критерий качества	273
2.5. Гибкие технологические системы изготовления и сборки элементов ЭВМ	274
2.5.1. Производственные системы изготовления печатных плат.....	275
2.5.2. Производственная система изготовления радиоэлектронных модулей.....	278
2.5.3. Промышленные роботы для автоматизированного производства	283
3. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПР	285
3.1. Системы управления ПР.....	285
3.1.1. Классификация системы управления ПР	287
3.2. Архитектура управляющих вычислительных комплексов.....	289
3.3. Программирование вычислительных устройств в РТК 3.3.1. Методы программирования ПР	290
3.3.2. Примеры робото-ориентированных языков программирования	291
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	293

ПРЕДИСЛОВИЕ

Темпы развития ЭВМ в значительной мере определяют уровень научно-технического прогресса. Этим объясняется растущая потребность в создании сложной вычислительной техники, которая находит все более широкое применение в сфере производственной и творческой деятельности.

Расширение круга задач, решаемых с помощью ЭВМ, вызывает ее постоянное усложнение, следствием которого является неизбежное удлинение сроков проектирования и производства при использовании традиционных методов. Сократить сроки до определенного предела можно, увеличив коллектив конструкторов и разработчиков. Однако такой путь не приводит к решению проблемы по следующим причинам: во-первых, за счет снижения производительности труда из-за трудностей эффективного управления; во-вторых, к ошибкам и неточностям, которые неизбежны при традиционном проектировании и производстве; и, в-третьих, количество людей, которые могут быть заняты в этой сфере человеческой деятельности, ограничено.

Ускорить и удешевить конструкторские и технологические работы возможно только применением прогрессивных методов автоматизированного проектирования и производства ЭВМ. Развитие методов проектирования осуществляется максимальной формализацией процессов конструирования. Прогресс в изготовлении элементов и блоков вычислительной техники связан с использованием робототехнических комплексов и станков с программным управлением.

Автор приносит глубокую благодарность сотрудникам Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ), Таганрогского радиотехнического университета, профессору С.В.Соколову, взявшим на себя труд рецензировать данную работу, за те замечания и советы, которые, несомненно, способствовали улучшению содержания книги.

Автор

ЧАСТЬ 1

КОНСТРУИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В первой части учебника изложены вопросы разработки средств измерительной и вычислительной техники (ВТ), создания конструкции, особенности конструирования с учетом конструктивной преемственности, технологичности, экономичности, надежности. Защита конструкции от внешних воздействий рассмотрена от механических, атмосферных, температурных влияний, временной нестабильности, электрических помех. Применение методов автоматизации в задачах конструирования позволяет эффективно выполнять компоновку и трассировку электронных устройств.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Конструирование является составной частью процесса разработки ВТ и представляет собой комплекс взаимосвязанных работ, при выполнении которых необходимы учет разносторонних требований к конструкции устройства, знание технологии. Каждое поколение ВТ имело новый тип элементной базы, что изменяло правила и положения теории и практики конструирования. Но характерным всегда являлось и является разбиение конструкции и общей схемы ВТ на отдельные, часто повторяющиеся устройства, оформляемые в виде элементов (блоков).

Рост степени интеграции микросхем увеличивает число типов таких элементов (блоков) и снижает их тиражирование в пределах одного ВТ. Секционированные и с фиксированной разрядностью микропроцессоры, однокристалльные микроЭВМ расширили область применения ЭВМ. Отдельные элементы (блоки) ЭВМ схемотехнически различны и, как правило, не повторяются. Диапазон использования ВТ очень широк: они используются для управления объектами как бытовыми, так и космического назначения, поэтому конструирование ВТ на основе интегральных схем становится все более сложным процессом и разнообразным.

Перед разработчиками ВТ 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 ВТ требуется решение задач противодействия климатическим, механическим и радиационным факторам с целью обеспечения теплового режима работы отдельных элементов и устройства в целом, помехоустойчивости и нормальных электрических режимов работы, механической прочности, надежной и безопасной работы ВТ, нормальной работы оператора и охраны окружающей среды.

Разработка — это процесс всестороннего исследования (подготовки), предназначенный для получения заданных результатов. Обычно разрабатывают научно-исследовательские темы, конструкции, технологическую

документацию, нормали, стандарты, системы, планы, графики и т. п.

В конструкциях ВТ заданные для них основные целевые функции обеспечиваются не только пространственными и силовыми, но и электрическими, магнитными и электромагнитными полями между отдельными элементами. Поэтому в связи с появлением микроминиатюрных конструкций и использованием интегральных схем деление разработки на механический и электрический этапы стало нецелесообразным.

Проектирование есть разработка основных показателей (конечного продукта) и путей их практического осуществления. Результатом проектирования является совокупность данных, которая может лечь в основу разработки рабочих технических документов, необходимых для выполнения конечного продукта (системы, устройства, прибора и т. п.).

Конструирование — это процесс выбора структуры пространственных и энергетических взаимосвязей и связей с окружающей средой и объектами физических тел, их материалов и обработки, установление значений величин (норм), пользуясь которыми можно изготовить изделие, отвечающее заданным требованиям. Конечным результатом является комплект технических документов, который отображает всю совокупность задаваемых норм на вновь разрабатываемое изделие. Назначение, область применения и условия эксплуатации ВТ налагают определенные требования на его конструкцию и должны учитываться в процессе конструирования.

Конструкция ВТ (системы) — совокупность электрически и механически связанных элементов и деталей, в которой реализуется электрическая схема ВТ (системы). Исходные данные для конструктора — принципиальная схема ВТ и техническое задание на разработку конструкции. Конструктор должен определить форму, материалы, размеры конструктивных деталей и сборочных единиц, способы механического и электрического соединения; обеспечить помехоустойчивость, тепловой режим, защиту от внешних воздействий.

Объектом называют любое физическое тело или их совокупность в виде устройства, изделия или их частей (самолет, корабль, ракеты и т. д.).

Изделием называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

Устройство — любая совокупность взаимодействующих физических тел, рассчитанная на выполнение заданных функций.

Аппарат представляет собой эксплуатационно-автономное изделие, предназначенное для преобразования по заранее предписанному закону энергии одного вида в энергию другого вида или в энергию того же вида, изменяющуюся по заданному закону.

Прибор представляет собой эксплуатационно-автономное изделие, выполняющее фиксацию, измерение или регистрацию заданных величин (измерительные приборы, осциллографические индикаторы, записывающие приборы и т. п.).

Деталь — изделие, изготовленное из одного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций.

Сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии сборочными операциями.

Типовые нормализованные сборочные единицы (универсальные по применению) обычно называют *типовыми изделиями*. Например, резисторы, диоды, транзисторы, реле и т. д. Типовые изделия общего применения или любое другое изделие, используемое для сложной сборочной единицы, блока, прибора, устройства называют *полуфабрикатом*. Например, типовые резисторы, конденсаторы, реле и т. п. на предприятиях, где они используются, называют полуфабрикатами.

Блок является эксплуатационно-неавтономной частью изделия и предназначается, как правило, для выполнения одной или нескольких целевых функций. Разделение изделия на блоки необходимо для упрощения его конструирования, процесса изготовления и эксплуатации.

Сложный блок может состоять из нескольких более простых блоков, которые целесообразно называть *подблоками* или *субблоками*. Крупные блоки называют по роду выполняемых ими частных функций: блок цифро-аналогового преобразования, измерительный блок, блок источника опорного напряжения и т. п.

Модулями называют конструктивные части (приборы, блоки, сборочные единицы или детали) с такими формами и геометрическими размерами, пользуясь которыми при наименьшем их разнообразии, можно получить максимальное количество форм и размеров различных устройств. Использование модулей позволяет получать изделие с лучшей ремонтпригодностью и технологичностью. Простое разделение на модули, без учета особенностей конкретных условий, не дает никакого технико-экономического эффекта, а в ряде случаев может его ухудшить по сравнению с другими техническими решениями.

Комплекс — два или более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями (например, датчики, преобразователи, измерительная аппаратура, средства управления), но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций.

Информационно-измерительная система, представляющая собой совокупность взаимодействующих устройств, предназначена для восприятия величин, характеризующих параметры объекта измерения (например, термопара воспринимает температуру объекта и выдает электрический сигнал, который можно измерить), для выполнения измерительных операций, обработки результатов измерения и для хранения (в случае необходимости) и выдачи информации потребителю в требуемом виде.

Комплект — два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (комплект запчастей, комплект инструмента, комплект измерительной аппаратуры).

Технология — это процесс изготовления изделия заданного качества в установленном производственной программой количестве при наименьшей себестоимости.

1.2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВТ

Условия эксплуатации ВТ имеют различную физико-химическую природу и изменяются в широких пределах. Факторы условно разделяют на климатические, механические и радиационные. *Климатические* факторы обусловлены изменением температуры и влажности окружающей среды, тепловым ударом, увеличением или уменьшением атмосферного давления, наличием движущихся потоков пыли (песка), присутствием активных веществ в окружающей атмосфере, наличием солнечного облучения (грибковых образований, микроорганизмов, насекомых, грызунов), взрывоопасной и воспламеняющейся атмосферы, дождя или брызг.

Механические факторы — это воздействие вибрации, ударов, линейного ускорения, акустического удара; наличие невесомости.

Радиационные факторы представляют собой космическую радиацию, ядерную радиацию от реакторов, атомных двигателей, облучение потоком гамма-фотонов, быстрыми нейтронами, бета-частицами, альфа-частицами, протонами.

Характер и интенсивность воздействия климатических, механических и радиационных факторов зависят от условий использования и назначения объекта установки ВТ. Поэтому ВТ разделяют на стационарные и транспортируемые.

Стационарные ЭВМ эксплуатируют в помещениях (подвалах, бункерах, цехах), на открытом воздухе. Это могут быть многомашинные вычислительные комплексы, большие универсальные, управляющие, настольные и встраиваемые ЭВМ и микрокалькуляторы. Условия эксплуатации: от -50 до +50 °С, влажность до 90%, вибрация до 120 Гц при 4—6g, одиночных ударов — до 75g, воздействие дождя интенсивностью до 3 мм/мин и соляного тумана с дисперсностью капель до 10 мкм и содержанием воды до 3 г/м³.

Транспортируемые ЭВМ устанавливают и эксплуатируют на автомобилях, железнодорожном и гусеничном транспорте. Специфика работы этого вида ЭВМ предопределяет повышенное воздействие механических факторов (вибрации и ударов). Каждый вид транспорта имеет собственные вибрационные характеристики.

Для предупреждения повреждения ВТ необходимо, чтобы она вся и ее отдельные части имели собственные резонансные частоты, лежащие вне диапазона частот вибрации транспортного средства, на котором ВТ эксплуатируется и перевозится. На автомобильных ВТ воздействует вибрация до 200 Гц и удары, вызванные дорогой. При движении железнодорожного транспорта возможны внезапные толчки, как следствие изменения скорости движения (до 40g). Биение колес о стыки рельсов вызывает вибрацию с частотой до 400 Гц при ускорении до 2g. На гусеничном транспорте во время движения частота вибрации достигает до 7000 Гц. Удары, вызванные неровностью дороги, отдачей орудия при выстреле, попаданием снаряда, могут иметь большую силу и сопровождаться вибрацией. Также воздействует акустический шум (удар) до 150 дБ. Если ВТ находится на оружейной площадке, то наибольшую опасность для нее представляет ударная волна.

Морские ЭВМ устанавливают на больших и малых судах, тихих и

быстроходных, на подводных лодках и на орудийных площадках береговой артиллерии. Характерные условия работы — это наличие вибрации, ударных нагрузок и морской среды. Вибрация на судне возникает от работы винтов, двигателей, гребного вала, биения волн о борт корабля, качки (до 25 Гц). Амплитуда вибрации на кораблях зависит от места установки ВТ на борту. Морская среда содержит большое количество различных активных веществ, постоянно действующих на ее работоспособность, поэтому ВТ должна обладать высокой коррозионной стойкостью, плеснестойкостью, водо- и брызгозащищенностью.

Бортовую ВТ устанавливают на борту самолетов, ракет, искусственных спутников Земли (ИСЗ), космических аппаратов. Бортовые ВТ могут быть управляющими и устанавливаемыми в беспилотные объекты, которые заменяют оператора, и связаны со всем комплексом технических средств объекта через систему датчиков и исполнительных механизмов. Получая информацию от датчиков, ВТ обрабатывает ее и выдает команды исполнительным механизмам. Аппаратура, устанавливаемая в самолетах, подвергается шуму и вибрации в 130—150 дБ с частотой 50—10000 Гц (ЭВМ в роли автомата). ВТ на борту ИСЗ входит в систему управления движением, которая решает задачи ориентации и стабилизации объекта в пространстве и наведения (навигации) его при перемещении в космическом пространстве, выхода на околопланетные орбиты, маневрирования с целью сближения с другими объектами и при посадке на поверхность планет. Бортовая ВТ на ИСЗ в процессе свободного полета (при неработающем двигателе) не подвергается воздействию механических нагрузок. Но при выходе на орбиту или при работе двигателей ВТ подвергается воздействию вибрации, ударов и ускорений. Частота вибрации может быть от 100 до 3000 Гц при 20g. Шум в момент запуска ракеты достигает 150 дБ.

Портативные ЭВМ, транспортировку которых осуществляет человек, эксплуатируют в условиях среды обитания человека.

1.3. ПОКАЗАТЕЛИ КОНСТРУКЦИИ ВТ

Конструкция ВТ любого назначения может быть охарактеризована показателями, отражающими ее качество. По этим показателям проводится сравнительная оценка выбора средств ВТ, выпускаемых промышленностью. К этим показателям относятся:

- 1) Сложность конструкции ВТ, рассчитываемая по формуле

$$C_{\text{ЭВМ}} = k_1 \cdot (k_2 N_3 + k_3 M_c),$$

где N_3 — число элементов, составляющих ВТ;

M_c — число соединений;

k_1 , k_2 , k_3 — коэффициенты масштабный и весовые. Это выражение связывает число элементов, составляющих ВТ (микросхем, полупроводниковых приборов, пассивных компонентов, элементов коммутации), с числом разъёмных и неразъёмных соединений между ними, что определяет массу, габаритные размеры, надёжность и другие параметры ВТ.

- 2) Число элементов, составляющих ВТ, рассчитываемое по формуле

$$N_3 = \sum_{i=1}^{k_n} \sum_{j=1}^{N_y} n_{ij},$$

где N_y , k_n , n_{ij} — соответственно число устройств ВТ, типов элементов, элементов i -го типа, входящих в j -е устройство.

3) Объем ВТ

$$V = V_N + V_{Mc} + V_n + V_{yt},$$

где V_N — общий объем всех интегральных схем (ИС), дм^3 ;

V_{Mc} — объем соединений, дм^3 ;

V_n — объем несущей конструкции, обеспечивающей прочность и защиту ВТ, дм^3 ;

V_{yt} — объем теплоотводящего устройства, дм^3 .

4) Отношение $q_n = V_N / V$, характеризующее степень использования физического объема ВТ элементами, несущими полезную функциональную нагрузку, т. е. непосредственно определяющими электрическую схему ВТ, и называемое коэффициентом интеграции или коэффициентом использования физического объема ($q_n < 1$, и $q_n = 1$, если применяется однокристалльная ЭВМ).

5) Общая масса ВТ, определяемая суммой масс всех входящих в нее устройств,

$$m = m_N + m_{Mc} + m_n + m_{yt}.$$

(составляющие те же, что и в третьем показателе).

6) Общая мощность, потребляемая ВТ, которая находится из равенства

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

где P_i — мощность потребления i -го устройства. Для цифровых устройств потребляемая ими мощность зависит от средней мощности потребления интегральной схемой. Известно, что 80—90% мощности потребления рассеивается в виде теплоты и определяет тепловой режим ВТ и соответствующие перегревы элементов конструкции.

7) Общая площадь, занимаемая ВТ,

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

где Q_i — площадь, требуемая для эксплуатации i -го устройства ВТ, м^2 ;

N_y — число устройств, составляющих ВТ.

8) Собственная частота колебаний конструкции

$$f_0 = [1/(2\pi) \cdot \sqrt{k_{ж}/m}]^{-1}$$

где $k_{ж}$ — коэффициент жесткости конструкции;

m — масса конструкции, кг.

Эффективность защиты конструкции ВТ от вибрации и ударов оценивается:

для амортизированной аппаратуры — коэффициентами виброизоляции и удароизоляции:

$$\gamma_1 = 1/[1 - (f/f_0)^2], \quad \gamma_2 = n_{\max}/n_{T3}$$

для неамортизированной аппаратуры — коэффициентами динамичности на низких и высоких частотах внешних воздействий:

$$\mu_n = (2\pi f_0)^2 \cdot A/(n_g g), \quad \mu_v = 2\pi f_0 v/(n_g g)$$

где f_0 / f — соотношение вынужденной f и собственной частоты f_0 конструкции;

$n_{\max}$ — возможная максимальная перегрузка при ударе;

n_{T3} — допустимая нагрузка при ударе (указывается в техническом задании (ТЗ));

A — допустимое значение максимального перемещения, мм;

v — допустимая скорость перемещения, мм/с ;

g — ускорение свободного падения, мм/с².

Для амортизированной аппаратуры следует как можно больше уменьшить собственную частоту f_0 , а для неамортизированных ЭВМ, наоборот, увеличить f_0 , приближая ее к верхней границе возмущающих воздействий или превышая ее.

9) Степень герметичности конструкции, определяемая истечением газа из определенного объема блока за известный отрезок времени

$$D = v_6 \cdot \Delta p / \tau_{cl}$$

где v_6 — объем блока, дм³;

Δp — избыточное давление газа в блоке, Па;

τ_{cl} — срок службы блока, с.

10) Вероятность безотказной работы ВТ — параметр, определяющий надежность ВТ.

Перечисленные показатели конструкции определяются элементной базой, на основе которой создается ВТ.

2. РАЗРАБОТКА ВТ

2.1. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ВТ

В разработке ВТ принимают участие большие коллективы специалистов различного профиля и многие организации. Организация, заказывающее изделие, называется «Заказчик». «Исполнителем» является организация, которая реализует требования заказчика в виде конструкторско-технологической документации на серийное изготовление заказных изделий, а завод выпускает их в заданном объеме.

Взаимоотношения между организациями регламентируются договорами — юридическими документами, определяющими взаимоотношения на различных стадиях разработки и изготовления ВТ. В договоре предусматриваются взаимные обязательства сторон по объему, поэтапным срокам проводимых работ и их финансированию.

Заказчик формулирует технические требования (ТТ) к ВТ и осуществляет приемку разработанного изделия. ТТ определяют показатели назначения ВТ, а также содержат требования к конструкции; наименование и назначение основных частей; габаритные, установочные и присоединительные размеры;

требования по взаимозаменяемости, стандартизации и преемственности.

В ТТ входят также требования по охране окружающей среды, помехозащищенности, безопасности работы, эргономике, эстетике и условиям эксплуатации. Исполнитель на основании ТТ разрабатывает техническое задание (ТЗ), в котором содержатся экономические, производственные и другие требования, определяющие порядок разработки и приемки изделия. Субподрядчик решает для исполнителя частные вопросы, такие, как разработка и поставка новых материалов, элементов, технологических процессов, отработка на соответствие требованиям эргономики и т. д.

Процесс разработки ВТ можно разбить на две стадии: научно-исследовательская работа (НИР) и опытно-конструкторская работа (ОКР). Каждая работа состоит из нескольких этапов. *Этапом* разработки называется четко очерченная часть всей работы, результаты которой оцениваются самостоятельно при подведении итога группы решенных вопросов. Этап разработки ограничивается сроками и заканчивается составлением отчетных материалов. Число этапов зависит от сложности и новизны разработки и согласуется с заказчиком.

Основными этапами проведения НИР являются предпатентный поиск; разработка и согласование с заказчиком технического задания; теоретические и экспериментальные исследования новых принципов построения ВТ; обобщение результатов и оценка выполненной НИР (составление карты технического уровня); приемка НИР; обсуждение и согласование задания на проведение ОКР. Этапы ОКР: техническое задание; техническое предложение; эскизный проект; технический проект; разработка рабочей документации.

Техническое задание составляется исполнителем на основании технических требований заказчика, в нем указываются:

- 1) назначение ВТ и область применения;
- 2) условия эксплуатации, хранения и транспортировки (для измерительных преобразователей указываются объекты, с которыми они должны сопрягаться, условия стыковки и т. д.);
- 3) основные технические характеристики (класс точности, пределы измерения, быстродействие, конструктивные параметры, надежность, стоимость), общетехнические требования (пределы температуры, влажность, тряска, вибрации, колебания напряжения сети, помехозащищенность и т. д.).

Техническое предложение (ГОСТ 2.103—68, ГОСТ 2.118—73) — это этап разработки, на котором обосновывается принципиальная возможность создания ВТ с заданными по ТЗ характеристиками и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ. На этом этапе составляют частные ТЗ для различных предприятий. Большое внимание на стадии технического предложения уделяют анализу алгоритмов, определяющих структуру ЭВМ, последовательность выполнения логических и других операций. Основное на этом этапе — построение общей структурной схемы изделия, из которой должна быть ясна картина взаимодействия всех основных узлов и блоков ВТ.

Эскизное проектирование (ГОСТ 2.119—73) — это этап, когда принимаются принципиальные, схемные и конструктивные решения, которые

отличны от технического предложения более детальной проработкой устройства в соответствии с ТЗ. На этом этапе проводится разработка схем, испытание, расчет и проверка рабочих режимов, выполняется предварительный расчет надежности отдельных блоков и всего изделия, проверяются варианты ВТ на патентную чистоту и конкурентоспособность, рассматривается соответствие требованиям техники безопасности и производственной санитарии. На основании эскизного проекта разрабатывается технический проект.

На этапе *технического проектирования* (ГОСТ 2.120—73) детально отрабатываются схемные и конструкторские решения, а также уточняются технические характеристики. В отработку конструкторских решений входят:

- 1) создание чертежей на все элементы, узлы и блоки;
- 2) решение вопросов надежности, ремонтпригодности и защиты изделий от внешних воздействий;
- 3) согласование работы всех устройств;
- 4) определение органов управления и функций оператора;
- 5) разработка методики сборки, наладки и испытаний ВТ.

При этом уточняется технология изготовления всех составляющих частей изделия и его стоимость. Правильность принятых решений по принципу действия, схеме и конструкции проверяется на макетных образцах ВТ.

На стадии *рабочего проектирования* производится окончательная корректировка электрических схем, разрабатывается полный комплект временной конструкторско-технологической документации и изготавливаются опытные образцы ВТ. По рабочему проекту выпускаются следующие конструкторские документы: схемы структурные, функциональные, принципиальные, электромонтажные, соединений, кинематические; чертежи детальные, сборочные, габаритные; спецификации; технические условия на блоки, платы; технические описания; инструкции по настройке и регулировке; паспорт; патентный формуляр; ведомости запасных инструментов и элементов, комплектующих и покупных изделий; таблицы проверки режимов работы электронных и полупроводниковых элементов; наружные виды; перечень чертежей; производственно-технологическая документация; программы и методики испытаний.

После окончания испытаний и устранения замечаний комиссии разработчик передает техническую документацию заводу-изготовителю, который приступает к подготовке серийного или массового производства.

2.2. ЕДИНАЯ СИСТЕМА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Единая система конструкторской документации (ЕСКД), ГОСТ 2.001—93, — комплекс стандартов, устанавливающих взаимосвязанные нормы и правила по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой на всех стадиях жизненного цикла изделий (при проектировании, изготовлении, эксплуатации, ремонте и др.).

Основное назначение стандартов ЕСКД состоит в установлении единых оптимальных правил выполнения, оформления и обращения конструкторской

документации, которые обеспечивают:

- применение современных методов и средств при проектировании изделий;
- возможность взаимообмена конструкторской документацией без ее переоформления и с оптимальной комплектностью;
- механизацию и автоматизацию обработки конструкторских документов и содержащейся в них информации;
- высокое качество изделия с учетом его безопасности для жизни и здоровья потребителей и окружающей среды;
- возможность расширения унификации и стандартизации при проектировании изделий;
- упрощение форм конструкторских документов и графических изображений;
- возможность создания единой информационной базы автоматизированных систем (САПР, АСУП и др.).

Установленные стандартами ЕСКД правила и положения по разработке, оформлению и обращению документации распространяются:

- а) на все виды конструкторских документов;
- б) на учетно-регистрационную документацию и документацию на внесение изменений в конструкторские документы;
- в) на нормативно-техническую и технологическую документацию, а также научно-техническую и учебную литературу в той части, в которой они могут быть для них применены и не регламентируются специальными стандартами и нормативами, например форматы и шрифты для печатных изданий и т. п.

Обозначение стандартов ЕСКД производится по ГОСТ 1.0—92. Номер стандарта составляется из цифры 2, присвоенной классу стандартов ЕСКД, одной цифры (после точки), обозначающей классификационную группу стандартов, двухзначного числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двух последних цифр (после тире), указывающих две последние цифры года утверждения стандарта.

ГОСТ 2.101—68 устанавливает виды изделий всех отраслей промышленности при выполнении конструкторской документации на детали, сборочные единицы, комплексы, комплекты. Изделия, в зависимости от наличия или отсутствия в них составных частей, делят на не специфицированные (детали) — не имеющие составных частей; на специфицированные (сборочные единицы, комплексы, комплекты) — состоящие из двух и более составных частей.

ГОСТ 2.102—68 устанавливает виды и комплектность конструкторских документов на изделия всех отраслей промышленности.

Чертеж: детали — документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля. *Сборочный чертеж* — документ, содержащий изображение, сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки (изготовления) и контроля. *Чертеж общего вида* — документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его

основных составных частей и поясняющий принцип работы изделия. *Теоретический чертеж* — документ, определяющий геометрическую форму (обводы) изделий и координаты расположения составных частей. *Габаритный чертеж* — документ, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами. *Монтажный чертеж*: — документ, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения.

Схема — документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделий и связи между ними.

Спецификация — документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта. *Ведомость спецификаций* — документ, содержащий перечень всех спецификаций составных частей изделия с указанием их количества.

Пояснительная записка — документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений.

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.

Патентный формуляр — документ, содержащий сведения о патентной чистоте объекта, а также о созданных и использованных при его разработке отечественных изобретениях.

Документы в зависимости от стадии разработки подразделяются на проектные (техническое предложение, эскизный проект и технический проект) и рабочие (рабочая документация). При определении комплектности конструкторских документов на изделие следует различать:

а) основной конструкторский документ для деталей — чертеж детали, для сборочных единиц, комплексов и комплектов — спецификация;

б) основной комплект конструкторских документов изделия — конструкторские документы, относящиеся ко всему изделию, например сборочный чертеж, принципиальная электрическая схема, технические условия, эксплуатационные документы;

в) полный комплект конструкторских документов, состоящий из основного комплекта конструкторских документов на данное изделие и основных комплектов конструкторских документов на все составные части данного изделия, применяемых по своим основным конструкторским документам.

По виду элементов, входящих в состав изделия, связей между ними и назначения схемы подразделяют на виды и типы по ГОСТ 2.701—84 (табл.2.1).

Структурные схемы определяют основной состав изделия и его функциональные части, их назначение и взаимосвязи. *Функциональные схемы* поясняют процессы, происходящие в отдельных функциональных узлах и частях изделия или в изделии в целом. *Принципиальные схемы* определяют полный состав элементов и связей между ними и дают детальное представление

о принципе работы изделия. *Схемы соединений* показывают соединения составных частей изделия и определяют провода, жгуты, кабели и другие соединительные изделия, а также места их присоединения и ввода. *Схемы подключений* показывают внешние подключения изделия. *Общие схемы* определяют составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. *Схемы расположения* устанавливают взаимное расположение отдельных составных частей комплекса, а при его необходимости и соединяющих их жгутов, проводов, кабелей. На *схеме электрической структурной* (Э1) показывают все функциональные части ЭВМ и основные взаимосвязи между ними. На *схеме электрической функциональной* (Э2) показывают функциональные части устройства, участвующие в процессе, иллюстрируемом схемой, и связи между этими частями. На *схеме электрической принципиальной* (Э3) указывают все элементы, необходимые для построения ЭВМ, связи между элементами и элементы, которые заканчивают входные и выходные цепи. На *схеме электрической соединений* (Э4) изображают либо внешние соединения устройств, входящих в состав ВТ, либо соединения между элементами внутри устройств и блоков устройства.

Таблица 2.1 Схемные обозначения

Вид схемы	Обозначение	Тип схемы	Обозначение
Электрическая	Э	Структурная	1
Гидравлическая	Г	Функциональная	2
Пневматическая	П	Принципиальная	3
Кинематическая	К	Монтажная (соединений)	4
Оптическая	Л	Подключений	5
Комбинированная	С	Общая	6
Энергетическая	Р	Расположения	7
		Совмещения	0

3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИИ

При разработке новой ВТ необходимо, чтобы она удовлетворяла ряду требований, к которым относятся *эксплуатационные* (качество выполнения ВТ основных функций, надежность, ремонтпригодность, устойчивость к старению, габариты, масса), *конструктивно-технологические* (защита от внешних факторов, конструктивная преемственность и технологичность), *экономические* (затраты времени, труда, материальных и денежных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию), *художественно-эстетические* (эстетичность и эргономичность). Все эти требования взаимосвязаны и оптимальное их удовлетворение представляет собой сложную инженерную

задачу.

3.1. КОНСТРУКТИВНАЯ ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ

Применение в разрабатываемой ВТ деталей и сборочных единиц, освоенных в промышленности, называется *конструктивной преемственностью*. Чем выше уровень преемственности ВТ, тем легче ее разработать и освоить в производстве. К конструктивной преемственности относится также установление ограничительных рядов чисел параметров (размеров и т. д.). Система предпочтительных чисел (ГОСТ 8032—84) создает известное ограничение при конструировании ВТ, основанное на применении ограниченного количества предпочтительных значений параметров, а не любых, получаемых в результате расчета. Расчетные значения округляются до ближайшего числа, предпочтительного с конструкторской или технологической точки зрения.

Использование конструктивной преемственности дает большой экономический эффект за счет исключения дополнительных затрат на разработку, освоение и изготовление ряда деталей, блоков и т. п. Преемственность дает преимущества как конструкторские, так и технологические. Для конструирования преемственность обеспечивает переход от конструирования по принципу «все заново» к конструированию на основе синтеза из готовых типовых изделий. Для технологии преемственность является предпосылкой применения методов крупносерийного производства к малым масштабам выпуска ВТ. Полное обновление конструкции и всей материальной оснастки технологических процессов оправдано только в тех случаях, когда устаревшая конструкция должна быть заменена принципиально новой. Формами конструктивной преемственности являются: унификация, нормализация и стандартизация.

Унификация есть процесс уменьшения числа конструкций, предназначенных для выполнения одних и тех же или сходных по характеру функций. Унификации могут подвергаться все структурные части конструкции ВТ (от детали до блока) и материалы. Однако унификация может охватывать конструкции только данного изделия или небольшой их группы одинакового или близкого по характеру назначения.

Нормализация — это ограничение разнообразия конструкций, предписываемое конструктору данного предприятия или отрасли промышленности. Требования нормализации состоят в применении уже разработанных, а в ряде случаев освоенных и выпускающихся деталей, сборочных единиц и блоков, в ограничении номенклатуры (для данного предприятия или отрасли) материалов, полуфабрикатов и типовых изделий.

Стандартизация — есть метод обязательного ограничения разнообразия и регламентирование единства качественных показателей промышленной продукции, классификации, терминологии, кодирования, технических требований, методов испытаний, требований к упаковке, транспортировке и т. п. Стандартизация устанавливает обязательные нормы на параметры продукции или производственный процесс с целью приближения качества изделий к уровню лучших образцов, обеспечивает однородность, взаимозаменяемость и

снижает трудоемкость производства. В соответствии с единой государственной системой стандартизации в промышленности действуют стандарты трех категорий: государственные стандарты (ГОСТ), отраслевые стандарты (ОСТ) для изделий унифицированных в отрасли, и стандарты предприятий (СТП) для изделий, унифицированных на предприятии. ГОСТ как высшая форма стандартизации распространяется на все отрасли народного хозяйства. ОСТ обязателен для отдельных отраслей промышленности. СТП помимо установления унифицированных изделий имеют значение ограничителей применимости материалов и комплектующих изделий.

Кроме государственных стандартов существуют международные стандарты, облегчающие развитие международной торговли, научных, технических и культурных связей. Международные стандарты, принятые при участии России, обязательны для конструктора. В прогрессивной идее конструктивной преемственности есть кажущаяся опасность консерватизма, когда новые, более совершенные конструктивные решения не будут применяться. Это действительно может иметь место, но до тех пор, пока не будет обоснован отказ от устаревшего фонда в связи с перспективностью предлагаемого нового конструктивного решения. Новое решение должно быть началом новой ветви преемственности.

3.2. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ

Под *технологичностью конструкции* следует понимать такое сочетание конструктивно-технологических требований, которое обеспечивает наиболее простое и экономичное производство изделий при соблюдении всех технических и эксплуатационных требований. Стандартами Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП), ГОСТ 14.201—83, перед разработкой технологических процессов предусмотрена обязательная отработка конструкций на технологичность. Основная задача такой отработки на технологичность состоит в повышении производительности труда, снижении материальных затрат и сокращении времени на проектирование, технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия при обеспечении его высокого качества. Оработка конструкции на технологичность ведется конструкторами и технологами на всех стадиях разработки и изготовления изделия.

Главными факторами, определяющими требование к технологичности конструкции изделия, являются: вид изделия (деталь, сборочная единица, комплекс, комплект), который определяет его главные конструктивно-технологические признаки; объем выпуска и тип производства, характеризующие степень технологического оснащения, механизации и автоматизации технологических процессов.

Оценка технологичности конструкции может быть качественной и количественной. *Качественная оценка* характеризуется технологичностью конструкции обобщенно, на основании опыта специалистов-исполнителей (экспертов). Количественная оценка выражается показателем, численное значение которого характеризует степень удовлетворения требованиям технологичности конструкции. *Количественная оценка* рациональна только в

зависимости от признаков, которые существенно влияют на технологичность рассматриваемой конструкции.

Для оценки технологичности конструкции используются относительные частные показатели K_i и комплексный показатель K , рассчитываемый по частным показателям с учетом коэффициентов φ_i , характеризующих весовую значимость частных показателей, т. е. степень их влияния на трудоемкость изготовления изделия.

Значения K_i находятся в пределах $0 < K_i \leq 1$, при этом рост показателя соответствует более высокой технологичности изделия. Коэффициент φ_i зависит от порядкового номера основных показателей технологичности, ранжированная последовательность которых устанавливается экспертно, и рассчитывается по формуле

$$\varphi_i = i/2^{i-1}$$

где i — порядковый номер показателя в ранжированной последовательности.

Все сборочные единицы ВТ в зависимости от конструктивно-технологических особенностей условно разбиваются на следующие группы:

а) электронные блоки (логические, аналоговые, индикаторные, блоки оперативной памяти, генераторы сигналов, приемно-усилительные блоки и т. д.);

б) радиотехнические блоки (вторичные и стабилизированные источники питания, выпрямители и т. д.);

в) электромеханические и механические блоки (механизмы привода, кодовые преобразователи, волноводные блоки и т. д.);

г) коммутационно-распределительные блоки (коммутаторы, распределительные коробки, переключатели и т. д.).

Расчет комплексных показателей технологичности каждой группы изделий (сборочных единиц) ведут по конструктивным и технологическим базовым показателям, состав которых (не более семи) для каждого изделия согласно ГОСТ 14.201—83 устанавливается отраслевыми документами.

В качестве примера рассмотрим состав базовых показателей по весовой значимости и расчетные формулы для серийного производства электронных блоков.

1. Коэффициент использования микросхем

$$K_{\text{имс}} = H_{\text{имс}} / H_{\text{эрэ}}, \quad \varphi_1 = 1,$$

где $H_{\text{имс}}$ — количество микросхем;

$H_{\text{эрэ}}$ — общее количество элементов радиоэлектроники (ЭРЭ).

2. Коэффициент автоматизации и механизации монтажа

$$K_{\text{ам}} = H_{\text{ам}} / H_{\text{м}}, \quad \varphi_2 = 1,$$

где $H_{\text{ам}}$ — число монтажных соединений, которые выполняются механизированным или автоматизированным способом;

$H_{\text{м}}$ — общее число монтажных соединений.

3. Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу

$$K_{\text{мп эрэ}} = H_{\text{мп эрэ}} / H_{\text{эрэ}}, \quad \varphi_3 = 0,75,$$

где $H_{\text{мп эрэ}}$ — количество ЭРЭ, которые подготавливаются к монтажу

механизированным или автоматизированным способом (в это число включаются ЭРЭ, не требующие специальной подготовки к монтажу — микросхемы, реле, разъемы и т. д.).

4. Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки электрических параметров

$$K_{\text{мкн}} = H_{\text{мкн}} / H_{\text{кн}}, \quad \varphi_4 = 0,5,$$

где $H_{\text{мкн}}$ — число операций контроля и настройки, выполняемых механизированным или автоматизированным способом;

$H_{\text{кн}}$ — общее число операций контроля и настройки.

5. Коэффициент повторяемости ЭРЭ

$$K_{\text{повт эрэ}} = 1 - H_{\text{т эрэ}} / H_{\text{эрэ}}, \quad \varphi_5 = 0,31,$$

где $H_{\text{т эрэ}}$ — количество типоразмеров ЭРЭ в изделии.

6. Коэффициент применяемости ЭРЭ

$$K_{\text{п эрэ}} = 1 - H_{\text{т ор эрэ}} / H_{\text{т эрэ}}, \quad \varphi_6 = 0,187,$$

где $H_{\text{т ор эрэ}}$ — количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ в изделии.

7. Коэффициент прогрессивности формообразования деталей

$$K_{\text{ф}} = D_{\text{пр}} / D, \quad \varphi_7 = 0,11,$$

где $D_{\text{пр}}$ — число деталей, заготовки которых или сами детали получены прогрессивными методами формообразования (штамповкой, прессованием, порошковой металлургией, литьем по выплавляемым моделям, под давлением, пайкой, сваркой, склеиванием, из профилированного материала);

D — общее число деталей.

Технологичность конструкции изделия оценивается комплексным показателем, определяемым на основе базовых показателей

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \varphi_i / \sum_{i=1}^n \varphi_i,$$

где K_i — расчетный базовый показатель соответствующего класса блоков;

φ_i — весовой коэффициент;

i — порядковый номер показателя;

n — число базовых показателей.

Уровень технологичности разрабатываемого изделия при известном нормативном $K_{\text{н}}$ оценивают отношением достигнутого комплексного показателя к нормативному. Это отношение должно удовлетворять условию

$$K / K_{\text{н}} \geq 1$$

Нормативный комплексный показатель технологичности электронных блоков АСУ и ВТ $K_{\text{н}} = 0,5 - 0,8$.

В качестве изделий-аналогов для определения нормативного комплексного показателя принимают наиболее современные конструкции, разработанные с учетом новейших достижений науки и техники и выпускаемые серийно. К основным способам повышения технологичности конструкции изделий можно отнести:

а) сокращение числа деталей изделия без усложнения их конструкции;

б) максимальное использование деталей и сборочных единиц, ранее освоенных в производстве;

- в) расчленение изделий на возможно большее число самостоятельно собираемых и взаимозаменяемых сборочных единиц;
- г) соответствие параметров точности изготовления, и качества поверхности деталей эксплуатационным требованиям изделий;
- д) компоновку, обеспечивающую удобство и простоту сборки изделия, а также доступ к его элементам при монтаже и ремонте;
- е) широкое внедрение деталей, изготавливаемых из дешевых и недефицитных материалов, а также изготавливаемых прогрессивным методом.

3.3. ТОЧНОСТЬ

3.3.1. ВЫБОР КОНСТРУКЦИЙ И ОГРАНИЧЕНИЕ ИХ РАЗНООБРАЗИЯ

При конструировании, как правило, приходится встречаться с двумя видами процессов (событий, величин): детерминированными и вероятностными. Так как полностью изученных процессов не существует, то в реальных условиях любой детерминированный процесс имеет определенную вероятностную часть. Удельный объем случайных процессов и величин при разработке конструкций бывает довольно большой, поэтому без их учета нельзя добиться желаемых результатов.

При конструировании необходимо учитывать следующее.

- а) процесс конструирования связан с ограничением разнообразия (факторов и параметров) конструкций;
- б) число возможных вариантов конструкций уменьшается с увеличением количества ограничивающих факторов;
- в) несмотря на большое количество ограничивающих факторов, число возможных конструкций, обеспечивающих заданные требования, обычно велико;
- г) выбор некоторых параметров конструкции ограничивается противоречивыми условиями их обеспечения. Поэтому необходимо стремиться получить наилучшие значения основных параметров за счет допустимого ухудшения менее существенных;
- д) выбор некоторых параметров ограничивается их реальной физической осуществимостью.

3.3.2. ОШИБКИ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ

Разность между приближенным и точным значениями любой физической величины называют ошибкой. Все виды ошибок можно разделить на три основные группы: систематические, случайные и грубые.

Систематическими называют ошибки, которые входят с неизменным значением и постоянным знаком во все результаты расчета, наблюдения, измерения и т. п. или изменяются по известному закону. Эти ошибки можно разделить на две группы:

- а) ошибки для данного типа изделия. Эти ошибки можно устранить или уменьшить либо путем внесения необходимых исправлений в конструкцию, либо путем введения соответствующих компенсирующих устройств;
- б) ошибки для единичного изделия, но случайные для множества изделий данного типа. В данном случае требуется индивидуальное определение размера ошибки и ее устранение.

Случайными называют непостоянные по значению и знаку ошибки, числовые значения и знак которых нельзя заранее установить. Они характерны и для множества изделий данного типа и для единичного экземпляра. Такие ошибки в большинстве случаев компенсировать невозможно. Предупредить их можно главным образом в процессе конструирования и отработки изделия в образцах.

Грубыми называют такие ошибки, которые существенно выделяются среди других ошибок.

Причины возникновения ошибок в конструкциях изделий могут быть следующие:

а) ошибки выбранных закономерностей являются результатом неправильного выбора физических закономерностей;

б) ошибки приближения являются результатом выбора для анализа и расчета приближенных закономерностей вместо точных;

в) ошибки расчета являются результатом использования приближенных методов расчета, данных таблиц, графиков и других подобных материалов;

г) ошибки технической документации являются результатом неточности отображения технических данных в технических условиях, чертежах, графиках, таблицах, инструкциях;

д) ошибки технологического процесса являются результатом многочисленных неточностей, сопровождающих изготовление деталей и изделия в целом;

е) ошибки установления выходных параметров готового изделия являются результатом неточности: методики, измерительных установок, приборов и инструментов;

ж) ошибки, возникающие при хранении и транспортировке (результат изменения параметров как за счет внутренних сил, так и в результате внешних воздействий);

з) ошибки, возникающие при эксплуатации (результат несоблюдения условий, на которые рассчитано изделие, и наличия условий, которые не были учтены в процессе разработки изделия).

Тщательный анализ всех видов данных ошибок позволит конструктору многие из них предупредить, а другие сделать малосущественными. Параметры любой конструкции в той или иной степени зависят от времени. Если эта зависимость известна, то, в принципе, всегда можно установить характер и размер ошибки, причиной которой является время.

3.3.3. РАСЧЕТ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ

Для определения отклонения выходного параметра A блока или изделия необходимо знать исходную зависимость этого параметра от независимых параметров $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$:

$$A = f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n). \quad (3.1)$$

Необходимо также знать отклонения независимых параметров, входящих в блок или данное изделие деталей или блоков: $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3, \dots, \Delta A_n$. Тогда предполагая, что отклонения параметров малы по сравнению с самими параметрами, для определения *максимального абсолютного отклонения*

функции нескольких переменных (3.1) необходимо просуммировать абсолютные значения произведений частных производных этой функции по каждому аргументу на абсолютное отклонение соответствующего аргумента:

$$\Delta A = \Delta A_1 \cdot \partial A / \partial A_1 + \Delta A_2 \cdot \partial A / \partial A_2 + \Delta A_3 \cdot \partial A / \partial A_3 + \dots + \Delta A_n \cdot \partial A / \partial A_n. \quad (3.2)$$

Наиболее показательным является представление об отклонении параметров, когда оно дано в относительных единицах. Тогда выражение (3.2) для относительного отклонения параметра δ можно представить в следующем виде:

$$\delta = \delta_1 (A_1 / A) \cdot \partial A / \partial A_1 + \delta_2 (A_2 / A) \cdot \partial A / \partial A_2 + \delta_3 (A_3 / A) \cdot \partial A / \partial A_3 + \dots + \delta_n (A_n / A) \cdot \partial A / \partial A_n. \quad (3.3)$$

где $\delta_1 = \Delta A_1 / A_1$, $\delta_2 = \Delta A_2 / A_2$, $\delta_3 = \Delta A_3 / A_3$, ..., $\delta_n = \Delta A_n / A_n$

Из выражения (3.3) видно, что:

а) отклонение искомого параметра выражается через сумму слагаемых, каждое из которых является функцией отклонения только одного независимого параметра;

б) каждое слагаемое этого выражения содержит кроме отклонения независимого параметра еще и сомножитель, который определяет степень влияния отклонения данного независимого параметра на искомое отклонение. Это влияние называют коэффициентом влияния или весовым коэффициентом. Эти коэффициенты раскрывают степень и форму взаимосвязи между искомым и независимым параметрами. Они не только позволяют определить отклонения параметров, но и раскрывают сущность взаимосвязи элементов в конструкции. Поэтому выражение (3.3) можно представить в виде

$$\delta = \sum_{i=1}^{i=n} k_i \delta_i, \quad (3.4)$$

где $k_i = (A_i / A) \cdot \partial A / \partial A_i$; $\delta_i = \Delta A_i / A_i$. Таким образом, с помощью выражений (3.2) и (3.3) можно определить абсолютное и относительное отклонение выходных параметров, если известны отклонения независимых параметров и их функциональная связь с исследуемым параметром.

Для определения отклонения выходного параметра конструкции пользуются тремя видами значений:

- а) предельным абсолютным;
- б) предельным относительным;
- в) вероятным (среднеквадратическим отклонением).

Предельное абсолютное значение отклонения в основном используется для определения и установления размеров геометрических параметров конструкций. Предельное абсолютное значение отклонения определяется при помощи формулы (3.2) с учетом знаков независимых параметров, но так, чтобы обеспечить максимальное значение отклонения (например, все знаки «+»).

Для простейших и часто встречающихся функций отклонения выходного параметра определяют таким образом:

- а) для суммы параметров $A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 + \dots + \Delta A_n;$$
- б) для произведения параметров $A = A_1 A_2 A_3 \dots A_n$

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta A_i \cdot \partial A / \partial A_i = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta A_i \cdot \left(\prod_{i=1}^{i=n} A_i \right) / A_i.$$

Предельное относительное значение отклонения используется чаще всего в определении и установлении электрических параметров элементов и составленных из них электрических цепей. Предельные относительные отклонения параметров определяют при помощи формулы (3.3) с учетом знаков независимых параметров:

- а) для суммы параметров $A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$
 $\delta = \delta_1 A_1 / A + \delta_2 A_2 / A + \delta_3 A_3 / A + \dots + \delta_n A_n / A;$
- б) для произведения параметров $A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dots \cdot A_n$
 $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n.$

Вероятное значение отклонения (среднеквадратическое отклонение) является важным для анализа конструкции и производственного процесса. Оно позволяет определить, какое вероятное количество продукции может быть выпущено с данным конкретным отклонением. Этим можно достичь наиболее эффективного экономического результата, варьируя широтой допускаемого отклонения независимых параметров составляющих конструкции (изделия).

3.3.4. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Принципиальной основой вероятностного метода анализа погрешностей является квадратичное суммирование величин, характеризующих рассеивание погрешности, с учетом степени влияния каждого комплектующего параметра на выходной параметр функционального узла и корреляционных связей между комплектующими параметрами.

Этот метод предполагает следующие допущения: отклонение параметров от номинального значения не является случайной функцией времени, закон распределения отклонений комплектующих параметров нормальный. Данные допущения хорошо выполняются для изделий, изготавливаемых в условиях массового и серийного производства. Поле рассеивания выходного параметра функционального узла определяется вероятностным методом по формуле

$$\delta_N = \frac{1}{K_\Sigma} \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 K_i^2 \delta_i^2 + \sum_{x,y} 2r_{xy} A_x K_x \delta_x A_y K_y \delta_y},$$

где δ_N — половина поля отклонения выходного параметра N ;

$K_i = 3\sigma_i / \delta_i$ — коэффициент относительного рассеивания параметра i -го элемента;

n — количество комплектующих параметров;

δ_i — среднеквадратическое отклонение параметра i -го элемента;

r_{xy} — коэффициент корреляции x и y параметров;

A_i — коэффициент влияния i -го параметра;

K_Σ — коэффициент относительного рассеивания выходного параметра

N .

Наличие корреляционных связей между параметрами объясняется

технологическими факторами процесса производства и конструктивными особенностями каждого конкретного изделия. Достаточно сильные корреляционные связи существуют между параметрами полупроводниковых приборов. Коэффициент корреляции r_{xy} является численной характеристикой линейной корреляционной зависимости и вычисляется по статистическим данным, полученным при испытании изделия. Коэффициент влияния A_i определяет степень влияния i -го комплектующего параметра на ошибку выходного параметра. Методы определения коэффициентов влияния в зависимости от сложности функционального узла могут быть расчетными или экспериментальными.

3.4. НАДЕЖНОСТЬ

3.4.1. КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ

Расширение выполняемых функций и повышение точности работы аппаратуры ВТ, как правило, приводит к ее усложнению, а это ведет к увеличению числа различных элементов, и, как следствие, к снижению надежности работы. Для электронной аппаратуры характерно то, что неисправность одного элемента влечет за собой отказ всего устройства.

Под надежностью устройства или его отдельных блоков понимают способность устройства выполнять заданные функции в течение требуемого интервала времени при определенных условиях эксплуатации. Надежность является важнейшим техническим параметром аппаратуры ВТ, поэтому значение надежности необходимо указывать в технических условиях.

Используя теорию вероятности и математическую статистику для оценки надежности, еще нельзя с абсолютной точностью установить надежность конкретного устройства или время его безотказной работы, но можно предвидеть вероятность безотказной работы в течение определенного времени, интенсивность отказов и т. д.

Отказ — это такое событие, которое ведет к невозможности использования рабочих свойств изделия. Отказы бывают внезапные и постепенные. При внезапных отказах происходит скачкообразное изменение одного или нескольких параметров до уровня, при котором нарушается нормальная работа аппаратуры (это обрыв провода, пробой транзистора, диода и т. д.). Постепенные отказы происходят в результате развития процессов износа и старения. Постепенные отказы носят не случайный, а закономерный характер, и их появление можно заранее предвидеть и предотвратить. Наряду с внезапными и постепенными отказами необходимо учитывать сбои и перемежающиеся отказы.

Сбои — это отказы, возникающие однократно (влияние различных помех и т. д.). Перемежающиеся отказы — это сбои, появляющиеся внезапно, но способные появиться вновь (замыкание электродов электровакуумных приборов в результате их нагрева).

Интенсивность отказов называют отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, которые продолжают работать,

$$\lambda(t) = n / N_{cp}(t) \cdot t,$$

где n — число изделий, отказавших за время t ;

$N_{cp}(t) = (N_1 + N_2) / 2$ — среднее число изделий, исправно работающих в интервале времени t ;

N_1 — число исправно работающих изделий в начале интервала времени;

N_2 — число изделий, исправно работающих в конце интервала времени.

Средним временем исправной работы изделий называют среднее арифметическое время исправной работы каждого образца.

Если имеется N образцов, время исправной работы которых соответственно равно $t_1, t_2, \dots, t_N$, то среднее время исправной работы

$$T_{cp} = (t_1 + t_2 + \dots + t_N) / N.$$

Так как установить момент выхода из строя каждого испытуемого образца очень сложно, то на практике T_{cp} определяют следующим образом:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^m n_i t_{cpi} / N,$$

где n_i — число образцов, вышедших из строя в i -м интервале;

m — число интервалов времени;

t_{cpi} — среднее время интервала.

Значение T_{cp} часто используют для характеристики надежности устройств, не подлежащих ремонту, т. е. при $\lambda = \text{const}$. Между интенсивностью отказов и средним временем работы существует обратно пропорциональная зависимость, т. е.

$$\lambda = 1 / T_{cp}.$$

Удобным на практике критерием надежности является среднее число часов работы между двумя соседними отказами, обычно называемое *наработкой на отказ*. Таким образом, если аппаратура проработала суммарное время T_p часов и имела при этом n отказов в работе, то наработка на отказ

$$T_o = T_p / n.$$

Продолжительность времени исправной работы t между любыми двумя соседними отказами является величиной случайной и ее точное значение определить невозможно. Поэтому используется усредненная статистическая величина T_o , определяемая по данным специальных испытаний на надежность.

Общее время работы аппаратуры T_p за определенный календарный срок равно сумме интервалов рабочего времени t_i между соседними отказами

$$T_p = t_1 + t_2 + \dots + t_n = \sum_{i=1}^n t_i$$

Тогда

$$T_o = \sum_{i=1}^n t_i / n,$$

где n — число отказов за время испытания;

t_i — время исправной работы между $i = 1$ и i -ми отказами аппаратуры.

Практически установлено, что минимальное число отказов для выявления значения T_o должно быть не менее десяти. При экспоненциальном законе распределения надежности наработка на отказ равна среднему времени безотказной работы, т. е. $T_o = T_{cp}$.

Под *безотказной работой аппаратуры* понимают такую ее работу, когда в заданном интервале времени t при определенных режимах и условиях эксплуатации не произойдет ни одного отказа.

Для аппаратуры, в которой происходят *внезапные отказы* (действует экспоненциальный закон распределения — закон Пуассона), вероятность безотказной работы до первого отказа в течение времени t определяется по формуле

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-t/T_{cp}).$$

Для аппаратуры, в которой происходят постепенные отказы, вероятность безотказной работы

$$P(t) = (2\pi)^{-1/2} \sigma \int_t^{\infty} \exp\left[-(t-T)^2/(2\sigma^2)\right] dt,$$

где σ^2 — дисперсия среднего времени исправной работы различных экземпляров аппаратуры,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (T_i - T)^2 / N(N-1),$$

где T_i, T — соответственно среднее время безотказной работы i -го и всех экземпляров;

N — количество экземпляров аппаратуры.

Так как аппаратура ВТ состоит из конечного числа блоков (или элементов), то вероятность безотказной работы устройства $P_{общ}(t)$ определяется вероятностями безотказной работы ее элементов $P_i(t)$. Если предположить, что отказы в элементах независимы друг от друга, то справедливо выражение

$$P_{общ}(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t),$$

где N — число элементов устройства или системы,

$$P_{общ} = \exp(-n_1 \lambda_1 t) \cdot \exp(-n_2 \lambda_2 t) \cdot \dots \cdot \exp(-n_m \lambda_m t) = \exp(-\sum n_i \lambda_i t).$$

Сумма произведений числа элементов и, на интенсивность отказов называется *интенсивностью отказов системы*

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^m n_i \lambda_i.$$

Таким образом, $P_{сист}(t) = \exp(-\lambda_c t)$ или $\exp(-t/T_{срс})$, где $T_{срс}$ — среднее время исправной работы системы.

3.4.2. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Методы обеспечения надежности делятся на общие и специальные.

Общие методы реализуются на стадиях проектирования и производства и

осуществляются следующими путями: максимальным упрощением принципиальной схемы с одновременным уменьшением числа элементов с невысокой надежностью; ослаблением влияния внешних воздействий герметизацией, амортизацией, охлаждением и т. д.; использованием унифицированных блоков, проверенных и отработанных в условиях массового производства и имеющих высокую надежность.

Специальные методы реализуются путем облегчения режима работы элементов схем и конструкции, предварительной тренировки элементов, резервированием и др. Облегчение режима работы схемных элементов снижает интенсивность отказов. Для учета нагрузки и тепловых режимов элементов используют коэффициент нагрузки K_H , представляющий собой отношение рабочих мощностей, напряжений или токов к их номинальным значениям. Практика показывает, что при проектировании аппаратуры ЭВМ следует применять для элементов следующие коэффициенты нагрузки:

транзисторы и диоды	0,3—0,5
резисторы	0,4—0,6
конденсаторы	0,3—0,5
реле, переключатели, выключатели	0,5—0,8

Тренировка элементов обеспечивает сокращение этапа приработки, который характеризуется повышенной опасностью отказов.

Резервирование является наиболее эффективным методом повышения надежности дополнительных элементов, блоков, узлов и устройств, включаемых в работу при отказе основных. Отношение числа резервных элементов к числу основных называется *кратностью резервирования*. Различают резервирование замещением и постоянное резервирование. При резервировании замещением резервный блок включается в работу переключением вручную или автоматически. При постоянном резервировании резервные элементы включены и работают одновременно с основными, а при отказах нагрузка перераспределяется. Например, при резервном последовательном включении конденсаторов и параллельном включении резисторов.

Особенно целесообразно использовать резервирование в аппаратуре многократного применения, так как при этом среднее время работы аппаратуры повышается в сотни и даже в тысячи раз. Однако применение резервирования часто ограничивается габаритными размерами и мощностью источников питания.

3.4.3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Расчет надежности чаще всего сводится к определению числовых значений наработки на отказ T_o и вероятности безотказной работы $P(t)$ по известным интенсивностям отказов элементов. Методы расчета делят на две группы: приближенный или ориентировочный и полный или окончательный.

Для выполнения *приближенного расчета* необходимо знать усредненные значения интенсивностей отказов λ_i типовых элементов и число N_i элементов определенного типа в каждой группе. В группу объединяются элементы, которые имеют примерно одинаковую интенсивность отказов. Для *полного*

расчета надежности необходимо иметь данные о реальных режимах работы элементов устройства и о зависимостях интенсивностей отказов элементов от температурных, электрических и других режимов и нагрузок.

В практике приближенный и полный расчет надежности обычно выполняют для периода нормальной эксплуатации аппаратуры, т. е. в предположении, что интенсивности отказов элементов и системы постоянны во времени.

При приближенном расчете надежности аппаратуры по среднегрупповым интенсивностям отказов в качестве исходных данных используются значения интенсивностей отказов λ_i элементов различных групп и число N_i элементов каждой группы, входящих в систему. Сущность расчета состоит в определении наработки на отказ T_o и вероятности безотказной работы $P(t)$.

Рекомендуется следующий порядок расчета:

1) Элементы проектируемой системы разбивают на группы с примерно одинаковыми интенсивностями отказов и подсчитывают число N_i элементов в каждой группе.

2) По таблицам устанавливают значения интенсивностей отказов λ_i элементов в каждой группе.

3) Вычисляют произведения $N_i \lambda_i$, которые характеризуют долю отказов, вносимых элементами каждой группы.

4) Определяют общую интенсивность отказов системы

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^m N_i \lambda_i$$

5) Вычисляют наработку на отказ $T_o = 1/\lambda_c$.

6) Определяют вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp(-t/T_o).$$

Для полного расчета надежности аппаратуры необходимо иметь данные об условиях ее эксплуатации и знать режимы работы всех элементов, составляющих аппаратуру, а также иметь зависимости поправочных коэффициентов α_i интенсивности отказов от условий эксплуатации $\alpha_i = f(t; ^\circ C; K_H)$.

3.5. ЭКОНОМИЧНОСТЬ

Экономичность конструкции ЭВМ определяется затратами на ее разработку, производство и эксплуатацию. При разработке решающим является время, так как изделие может оказаться устаревшим ранее, чем закончится разработка. В свою очередь быстро разработанная конструкция может потребовать большого времени и средств на освоение и производство.

Экономические характеристики сборочных единиц, блоков и всего изделия ВТ во многом зависят от схемы, так как она определяет взаимосвязь входящих в нее элементов и их параметров. Общие показатели функциональной схемы, влияющие на экономические характеристики ВТ, следующие:

а) возможность ее разделения на такие блоки, которые могут получиться конструктивными, технологичными и эксплуатационными

автономно;

б) возможность использования недорогих материалов, полуфабрикатов и типовых изделий.

Влияние схемы блока и ее параметров на экономические характеристики определяется числом различных функций, выполняемых схемой; точностью выполнения заданных функций и их взаимосвязью; степенью всех взаимозависимостей элементов и их режимов.

Точность выходных параметров блока зависит от точности параметров первичных элементов. При увеличении точности параметров первичных элементов увеличиваются затраты на разработку и производство.

Наибольший экономический эффект получают при использовании хорошо проверенной схемы. Применение новых схем связано с дополнительными затратами, которые тем больше, чем сложнее схема и чем меньше сведений о ней имеется. Эти затраты могут увеличиться в 5—10 раз по сравнению с затратами при работе с известными схемами. Кроме того, экономические характеристики блока определяются условиями использования типовых изделий и их новизной (микросхемы, транзисторы, резисторы и т. д.). Дорогие и дефицитные типовые изделия и полуфабрикаты также влияют на увеличение стоимости блока, поэтому целесообразно их использовать только в том случае, если они дают заметные технические преимущества.

На экономические характеристики большое влияние оказывают конструктивные и технологические особенности ВТ. Если ВТ сложна, то применяют блочную конструкцию, которая имеет ряд особенностей:

а) возможна параллельная разработка, а это уменьшает время создания всего изделия ВТ;

б) упрощается защита от внешних воздействий;

в) можно широко использовать конструктивную преемственность;

г) усложняются межблочные соединения, увеличивается число деталей за счет соединительных элементов конструкции, а это уменьшает надежность изделия.

С технологической точки зрения блочная конструкция имеет ряд преимуществ, к которым можно отнести возможность параллельного выполнения сборочных работ, а, следовательно, упрощения процесса сборки; взаимозаменяемость и возможность улучшения технологичности всей конструкции.

Взаимозаменяемость влияет на экономические характеристики ВТ как при производстве, так и при эксплуатации. Взаимозаменяемость деталей, сборочных единиц, блоков уменьшает расходы на сборку, наладивание, регулировку и ремонт. В то же время она требует повышенной точности изготовления, что связано с дополнительными затратами. Однако эти затраты быстро окупаются в крупносерийном и массовом производстве.

Материал является основой любой конструкции. Качественные характеристики конструкции зависят в значительной мере от свойств материала. Чем более высокими качествами обладает материал, тем обычно выше его стоимость и он более дефицитен.

Стоимость ВТ зависит от материалов и полуфабрикатов как

непосредственно (от стоимости), так и косвенным образом: от конструктивных, технологических, конъюнктурных факторов.

Конструкция зависит от многих материалов, так как ее функциональные показатели обеспечиваются не одним материалом, а сочетанием различных, что приводит к увеличению количества деталей и т. д.

Экономические характеристики технологического процесса зависят в большей степени от технологических свойств материалов, что определяет метод изготовления деталей, применяемое оборудование, инструмент и т. д.

Конъюнктура снабжения играет огромную роль в экономических показателях производственного процесса. Поэтому даже кратковременные срывы сроков получения материалов могут дезорганизовать производство и вызвать большие потери времени и материальных средств. Избежать этого можно только уменьшением номенклатуры применяемых материалов.

3.6. ЭРГОНОМИЧНОСТЬ И ЭСТЕТИЧНОСТЬ

Рассматривая промышленные изделия, можно предъявить к ним следующие требования: функциональные, утилитарные (эксплуатационные) и эстетические. Функциональными требованиями являются характеристики сигналов и их преобразований, определяемых принципиальной схемой. Эксплуатационными требованиями будут те, которые характеризуют удобства управления, наблюдения. Эстетические требования определяются композиционным решением, формой изделия, его цветом и т. д., гармонически связывающими изделие с интерьером (окружающей средой).

Художественное конструирование базируется на эргономике и технической эстетике. *Эргономика* — это наука, изучающая функциональные возможности человека в трудовых процессах с целью создания для него оптимальных условий труда, обеспечения необходимых удобств в работе, сохранения сил, здоровья и трудоспособности при высокой производительности труда (ГОСТ 12.2.049—80). Эргономические требования к изделиям должны учитывать следующие параметры:

а) гигиенические (освещенность, вентиляция, температура, влажность, давление воздуха, напряженность электрического и магнитного полей, запыленность, радиация, вибрации перегрузки и ускорения на объекте носителя ВТ и др.);

б) антропометрические (соответствие форме, размерам тела человека и распределению его массы);

в) физиологические и психофизиологические (соответствие силовым, скоростным и энергетическим возможностям человека и возможностям его зрительного, слухового и осязательного анализаторов);

г) психологические (соответствие закрепленным и вновь формируемым навыкам человека и его возможностям по восприятию, переработке и выработке сигналов управления).

Техническая эстетика — это наука, занимающаяся изучением закономерностей, возникающих при создании человеком промышленной техники по законам красоты и функциональности. Требования технической эстетики к техническим средствам (ТС) вычислительной техники можно

представить как совокупность требований к композиции и гармонии (ГОСТ 24750—81).

Требования к *композиции* заключаются в том, что ТС должны быть построены на основе единых конструктивно-технологических решений; ТС и детали их внешнего оформления должны быть спроектированы с учетом обеспечения стилового единства; форма ТС должна соответствовать их назначению, конструктивной организации, применяемым материалам, внутренней компоновке функциональных объемов, частей и блоков ТС; связи объемов, плоскостей и очертаний формы ТС должны подчеркивать целостность композиции.

Требования к *гармонии* состоят в построении ТС по модульному принципу; ТС, кроме того, должны обладать информативностью формы; для защитно-декоративного покрытия ТС используется гармоническое сочетание цветов с учетом психофизиологического воздействия цвета на человека; допускается выделять цветом элементы ТС или их отдельные части в композиционных и функциональных целях.

3.7. ПАТЕНТОСПОСОБНОСТЬ

При разработке ВТ необходимо учитывать *патентность* — свойство технических разработок находиться под охраной международного авторского права, если они обладают новизной, полезностью и юридически соответственно оформлены.

Процесс конструирования ВТ тесно связан с *изобретательством*, изучением патентной информации и отбором патентных материалов. Такое патентно-информационное исследование носит название «Патентный поиск». Тщательно проведенный патентный поиск предотвращает дублирование творческой работы и напрасную трату усилий на поиски решений, разработанных ранее. Кроме того, патентный поиск имеет целью охрану государственных и авторских интересов в области научно-технического творчества, интенсификацию внедрения достижений отечественной и зарубежной технической мысли. Может оказаться, что в результате патентных исследований будет показана нецелесообразность проведения разработки.

Изобретению предоставляется правовая охрана, если оно является новым, имеет изобретательский уровень и промышленно применимо. Изобретение является новым, если оно не известно из уровня техники. Изобретение имеет изобретательский уровень, если оно для специалиста явным образом не следует из уровня техники. Уровень техники определяется по всем видам сведений, общедоступных в России или зарубежных странах до даты приоритета изобретения. Изобретение является промышленно применимым, если оно может быть использовано в промышленности, сельском хозяйстве, здравоохранении и других отраслях народного хозяйства страны.

Объектами изобретений могут являться устройство, способ, вещество, штамм микроорганизма, культуры клеток растений и животных, а также применение известного ранее устройства, способа, вещества, штамма по новому назначению. *Устройства* — машины, аппараты, установки, приборы, инструменты, агрегаты, приспособления и их детали; устройство

характеризуется пространственным протяжением, конструктивными признаками. *Способы* — процессы обработки сырья, материалов, изготовления химических и других веществ, выращивания различных культур, лечения болезней и т. д. Способ не имеет объемных показателей, он состоит в установлении нового порядка, очередности применения определенных действий (приемов, операций), необходимых для достижения искомого результата. *Вещества* (краски, растворы, сплавы, эмульсии и т. д.) характеризуются всеми входящими в его состав ингредиентами как новыми, так и ранее известными и их количественным соотношением.

Новое применение известного ранее устройства, способа, вещества, штамма состоит в том, что известное техническое средство предлагается использовать с иной целью для решения задачи, которая не имела в виду ни автором, ни другими специалистами, когда впервые стало применяться данное устройство, способ или вещество. Не признаются изобретениями научные теории; методы организации и управления хозяйством; условные обозначения, расписания, правила; методы выполнения умственных операций; алгоритмы программ для вычислительных машин; проекты и схемы планирования сооружений, зданий, территорий; предложения, касающиеся лишь внешнего вида изделий, направленных на удовлетворение эстетических потребностей.

Автором изобретения признается гражданин, творческим трудом которого оно создано. Если оно создано совместным творческим трудом нескольких граждан, все они признаются соавторами изобретения.

Право на изобретение охраняется государством и удостоверяется *патентом*, который действует в течение 20 лет, считая с даты приоритета. Объем правовой охраны, представляемой патентом, определяется формулой изобретения.

Патент на изобретение выдается: автору изобретения; гражданину или юридическому лицу (при наличии договора), которое указано автором изобретения в заявке; наследнику автора изобретения; Государственному фонду изобретений России, если исключительное право на использование изобретения передается автором государству. Исключительное право на использование изобретения принадлежит обладателю патента, которое предоставляет ему возможность использования изобретения по своему усмотрению, если это не нарушает прав других патентообладателей. Однако патентообладатель должен использовать права, предоставленные патентом, без ущерба интересам государства и общества.

Ограничения прав патентовладельца по территории и по срокам является важным условием при установлении патентной чистоты. Патентная чистота есть юридическое свойство объекта, заключающееся в том, что он не попадает под патенты, действующие в определенной стране. Наряду с этим существует понятие патентоспособность — возможность технического решения быть запатентованным в качестве изобретения в определенных странах.

Проверка патентной чистоты необходима не только при экспортных поставках, но и во всех случаях разработки нового и усовершенствования старого изделия ВТ. Документом, подтверждающим патентную чистоту изделия, является патентный формуляр, который входит в состав технической

документации. Он составляется разработчиком с самого начала разработки и предъявляется на всех стадиях рассмотрения и утверждения технической документации на все объекты независимо от того, предназначены они для экспорта или для потребления внутри страны. Нельзя считать, что, если объект поставляется на экспорт в течение длительного времени и до сих пор не предъявлялось исков со стороны иностранных патентовладельцев, то можно продолжать поставки без проверки патентной чистоты. В зарубежной патентной практике по патентным спорам известны случаи, когда патентовладельцы выжидали по семь и более лет с предъявлением иска, так как рассчитывали, что за это время их предполагаемые убытки возрастут и, следовательно, увеличится размер иска.

4. ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

4.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Основная особенность эксплуатации ВТ на подвижных объектах — повышенное воздействие механических факторов (вибраций, ударов, линейных ускорений). *Вибрации* характеризуются частотой, амплитудой, ускорением. *Ударные перегрузки* характеризуются числом одиночных ударов, длительностью ударного импульса, перемещением соударяющихся тел. *Линейные ускорения* характеризуются ускорением, длительностью, знаком воздействия ускорения.

Возникающие при вибрациях, ударах и ускорениях перегрузки оценивают соответствующими коэффициентами. Для защиты от вибрации и ударов применяют амортизаторы или демпферы. Амортизаторы от линейных перегрузок не защищают.

4.1.1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ВИБРАЦИЙ

В общем случае конструкция ВТ представляет собой сложную колебательную систему, состоящую из конечного числа простых механических узлов, обладающих массой m_i , закрепленных на пружинах с жесткостью k_i (рис. 4.1).

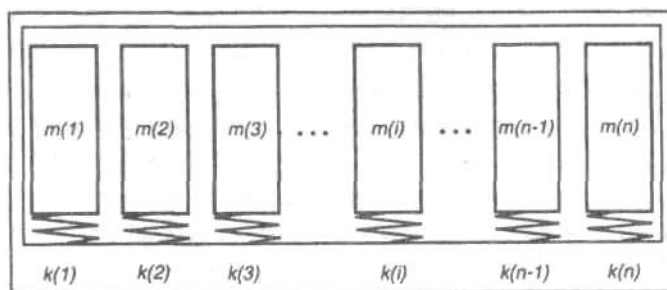


Рис. 4.1. Схема колебательных систем

Эта разбивка конструкции ВТ на простые колебательные системы упрощает методику расчета и анализа воздействия вибраций и является правомерным, так как передвижная ВТ выполняется из блоков, которые жестко укреплены на шасси и связаны гибкими соединениями. Для простой колебательной системы с одной степенью свободы движение под воздействием приложенных сил определяется изменением во времени одной координаты

(рис. 4.2).

Такая система состоит из груза массой m , пружины жесткостью k и демпфера с коэффициентом демпфирования β . По принципу Даламбера уравнение движения такой системы относительно положения статического равновесия должно учитывать все силы, действующие на систему, в том числе и силу инерции:

$$mx'' + \beta x' + kx = P_0 \sin \omega t \quad (4.1)$$

где первое слагаемое в левой части — сила инерции, второе — сила демпфирования, третье — сила упругости пружины; правая часть представляет собой возмущающую силу P , действующую извне на колебательную систему. Разделив правую и левую части уравнения на m , получим:

$$x'' + 2\delta_0 \omega_0 x' + \omega_0^2 x_{cm} \sin \omega t \quad (4.2)$$

где $\delta_0 = \beta / (2\sqrt{mk})$ — параметр, пропорциональный коэффициенту демпфирования;

$\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — круговая частота собственных колебаний системы;

$x_{cm} = P_0 / k$ — удлинение (сжатие) пружины, которое она получила бы при статическом воздействии на нее силы P_0 .

Решим уравнение для свободных и вынужденных колебаний механической системы. Для свободных колебаний правая часть уравнения (4.2) обращается в ноль. Допустим, что в начальный момент времени $t = 0$ массе m была сообщена мгновенная скорость v , а затем система начала совершать свободные колебания. Для начальных условий ($x''(0) = 0$; $x'(0) = v$; $x(0) = 0$) при отсутствии демпфирования ($\delta_0 = 0$) решение уравнения (4.2) имеет вид

$$x = (v / \omega_0) \sin \omega_0 t = A \sin \omega_0 t ,$$

т. е. возникает периодическое синусоидальное движение с собственной частотой $\omega_0 = \sqrt{k/m}$. С увеличением массы частота уменьшается, а с увеличением жесткости пружины k частота увеличивается. Любая реальная система имеет демпфирование ($\delta_0 = 0,02 - 0,25$). Так как $\delta_0^2 \approx 0$, то решение уравнения (4.2) имеет следующий вид:

$$x = (v / \omega_0) \exp(-\delta_0 \omega_0 t) \sin \omega_0 t .$$

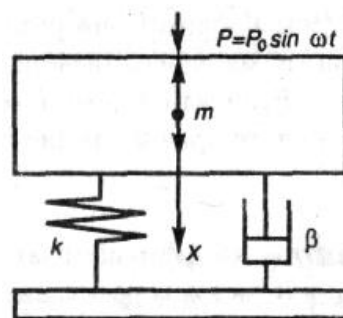


Рис. 4.2. Схема амортизации

Отсюда следует, что при наличии демпфирования δ_0 множитель $\exp(-\delta_0 \omega_0 t)$ с течением времени стремится к нулю и колебательный процесс прекращается.

Если на колебательную систему воздействует внешняя сила P , то правая часть уравнения (4.1) становится равной $P = P_0 \sin(\omega t)$. В этом случае решение уравнения (4.2) приобретает вид

$$x = A \exp(-\delta_0 \omega_0 t) \sin(\omega_0 t - \varphi_0) + \mu x_{cm} \sin(\omega t - \varphi). \quad (4.3)$$

Здесь первое слагаемое в правой части уравнения — решение уравнения свободных колебаний, а второе — частное решение, соответствующее гармонической силе P . При этом

$\varphi = \arctg[2\delta_0 \alpha / (1 - \alpha^2)]$ - начальная фаза,

$$\alpha = \omega / \omega_0, \text{ а } \mu = 1 / \sqrt{4\delta_0^2 \alpha^2 + (1 - \alpha^2)^2}.$$

В уравнении (4.3) только A и φ_0 зависят от начальных условий. С течением времени ($t \rightarrow \infty$) колебания системы устанавливаются

$$x_{t \rightarrow \infty} = \mu x_{cm} \cdot \sin(\omega t - \varphi_0)$$

Установившиеся под воздействием внешней гармонической силы колебания называются *вынужденными*. Характерной особенностью таких колебаний является то, что их амплитуда зависит не только от параметров системы и возмущающей силы, но и от ее частоты ω . Если частота возмущающей силы ω совпадает с собственной частотой системы ω_0 , то наблюдается *резонанс*. В этом случае решение уравнения (4.1) при нулевых начальных условиях и отсутствии трения будет иметь вид

$$x = -(\omega_0 x_{cm} t / 2) \cos \omega_0 t = -\xi t \cos \omega_0 t,$$

т. е. амплитуда колебаний линейно зависит от времени t и частоты собственных колебаний системы. Чем меньше коэффициент ξ , тем медленнее нарастает амплитуда резонансных колебаний. Отсюда следует, что при быстром прохождении резонансной частоты амплитуда колебаний будет достигать меньшего значения, чем при медленном прохождении резонанса.

Если на систему в момент времени $t = 0$ действуют затухающие колебания, то уравнение движения системы принимает вид

$$x'' + \omega_0^2 x = \omega_0^2 x_{cm} e^{-\gamma t} \cos \omega t, \quad (4.4)$$

где γ — коэффициент затухания ($\gamma \ll \omega_0$)

Решением уравнения (4.4) будет равенство

$$x = [\omega_0 x_{cm} / (2\gamma)] \cdot [1 - \exp(-\gamma t)] \sin \omega t.$$

Тогда амплитуда установившихся вынужденных колебаний на резонансной частоте

$$A_{po} = \omega_0 x_{cm} / (2\gamma).$$

Для системы с трением $\beta \neq 0$ амплитуда колебаний при резонансе может быть определена по выражению

$$A_{po} = x_{cm} / (2\delta_0)$$

Основные параметры, которыми обычно характеризуют гармонические колебания блоков, следующие: f — частота, Гц; A_x — амплитуда перемещения, мм; A_v — амплитудное значение скорости, м/с; A_ω — амплитудное значение ускорения, м/с²; A_η — скорость нарастания ускорения или динамическая

перегрузка, м/с^3 . Все эти параметры связаны между собой соотношениями:

$$A_\eta = \omega A_\omega = \omega^2 A_v = \omega^3 A_x,$$

где $\omega = 2\pi f$.

Движение системы, имеющей n степеней свободы, описывается совокупностью уравнений вида (4.1):

$$Mx'' + Bx' + Kx = P(t),$$

где M — матрица коэффициентов инерции (масс);

B — матрица коэффициентов демпфирования;

K — матрица сил упругости;

$P(t)$ — n -мерный вектор-столбец обобщенных возмущающих сил;

x — обобщенная координата.

4.1.2. МЕТОД РАСЧЕТА НА ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ

Расчет на виброустойчивость рассмотрим на примере печатной платы, которая под воздействием вибраций ведет себя как упругая пластина, подверженная усталостному разрушению, особенно при возникновении резонанса. Усталостные отказы чаще всего появляются в виде обрыва проводников, разрушения паяных соединений и нарушения контактов в разъемах. Эти усталостные отказы можно предотвратить, обеспечив разные частоты собственных колебаний для плат и шасси. Печатная плата должна обладать значительной усталостной долговечностью при воздействии вибраций, для этого необходимо, чтобы минимальная частота собственных колебаний платы удовлетворяла условию

$$f_{\min} \geq 3 \sqrt[3]{\left(\frac{\gamma(f_0) g j_{\max}}{0,003b} \right)^2} \quad (4.5)$$

где $j_{\max}$ — вибрационные перегрузки в единицах g ;

b — размер короткой стороны платы, мм;

$\gamma(f_0)$ — безразмерная постоянная, числовое значение которой зависит от значения частоты собственных колебаний и воздействующих ускорений.

При ускорениях $j = (3-10)g$ значения $\gamma(f_0)$ следующие:

f_0 , Гц.....	50—100	100—400	400—700
$\gamma(f_0)$	17,5	25,0	35,0.

Выражение (4.5) получено из условия обеспечения значительной усталостной долговечности.

4.1.3. АМОРТИЗАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВТ

Эффективный способ повышения надежности ВТ, функционирующей в условиях интенсивных механических воздействий, — виброизоляция. Энергия механических колебаний поглощается или отражается специальными приспособлениями — амортизаторами. Энергия в амортизаторах поглощается за счет трения, отражение части механической энергии происходит в случае, если частота собственных колебаний амортизированной механической системы меньше нижней границы диапазона воздействующих колебаний (амортизатор

работает как механический фильтр нижних частот).

При выполнении этого расчета конструкцию ВТ целесообразно считать твердым телом (рис. 4.3), которое имеет шесть степеней свободы, столько же связанных колебаний и собственных частот $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_6$. В общем случае необходимо исследовать шесть расчетных моделей. Рассмотрим линейную систему амортизации однонаправленного нагружения, в которой действие возмущающих сил и перемещение ВТ возможно вдоль оси амортизатора.

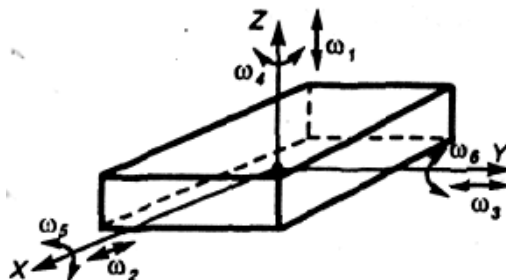


Рис. 4.3. Линейные перемещения и колебания по трем осям

Основная цель при проектировании системы амортизации — обеспечение уровня виброускорений меньше допустимого. Качество амортизации характеризуется коэффициентом передачи (виброизоляции), равным отношению виброускорения, воздействующего на объект, к виброускорению основания, на котором он установлен, в функции от параметра

$$\alpha = \omega / \omega_0,$$

где ω — частота воздействующего виброускорения,
 ω_0 — собственная частота амортизированной системы.

При малом демпфировании (раскачивании), что характерно для большинства систем амортизации, $\alpha > 2$, коэффициент передачи (виброизоляции) описывается выражением

$$\mu = 1 / [(\omega_i / \omega_0)^2 - 1]$$

Эффективная амортизация обеспечивается, если $2\omega_0 \leq \omega_n$, т. е. если собственная частота системы в 2—3 раза меньше нижней граничной частоты воздействующего виброускорения.

При заданных коэффициентах виброизоляции μ_i и частоте воздействующего виброускорения ω_i необходимая собственная частота амортизированной системы

$$\omega_0 = \omega_i \sqrt{\mu_i / (1 + \mu_i)}$$

Суммарная жесткость амортизаторов, Н/м,

$$K_{\Sigma} = 39,2 m \omega_0^2,$$

где m — масса амортизированной системы, кг.

Расчетная жесткость каждого амортизатора

$$k_i = K_{\Sigma} / N,$$

где N — число амортизаторов.

Амплитуда колебаний амортизированной системы на данной частоте

$$h_{\max} = 0,025 g / \omega^2$$

при условии

$$K_{\Sigma} \ll m40\pi^2\omega^2.$$

Если максимальная амплитуда колебаний равна h_{don} и нельзя увеличить зазор, следует увеличить массу системы:

$$m_{mp} = 2,5 \cdot 10^5 mg / (h_{don} \cdot 10^2).$$

При расчете системы амортизации необходимо определить реакцию в каждой точке крепления, которая не должна превышать допустимую нагрузку соответствующего амортизатора. В зависимости от схемы расположения и количества амортизаторов различают статически определимые и неопределимые системы.

Система *статически определима*, если число амортизаторов $N \leq 3$ и они расположены не на одной прямой. Реакции амортизаторов в этом случае не зависят от их упругих свойств и однозначно определяются из трех уравнений статики (рис.4.4).

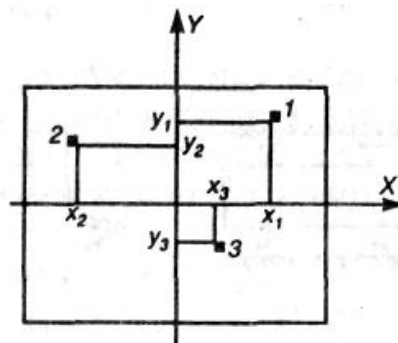


Рис.4.4 – Статически определимая однонаправленная система с тремя однородными амортизаторами

Для этой системы реакция оценивается выражениями:

$$R_1 = \frac{x_2 y_3 - x_3 y_2}{\Delta} \cdot G \quad R_2 = \frac{x_1 y_3 - x_3 y_1}{\Delta} \cdot G \quad R_3 = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{\Delta} \cdot G$$

где G — вес системы;

$$\Delta = x_2 y_3 - x_3 y_2 - x_3 y_1 + x_1 y_3 + x_1 y_2 - x_2 y_1$$

Если число амортизаторов $N > 3$, то система *статически неопределима*. Реакции такой системы должны подчиняться основным уравнениям:

$$\sum_{i=1}^N R_i = G; \quad \sum_{i=1}^N R_i x_i = 0; \quad \sum_{i=1}^N R_i y_i = 0.$$

и $(N - 3)$ дополнительным уравнениям, например одно из них:

$$\sum_{i=1}^N R_i x_i y_i = 0.$$

Можно также задать произвольно $(N - 3)$ реакции и определить их из уравнений статики, при этом все реакции должны быть положительными. Зная реакции амортизаторов, можно определить их требуемую статическую деформацию:

$$h_{i cm} = R_i / k_i,$$

где k_i — жесткость i -го амортизатора.

По основным параметрам амортизаторов выбирают их тип и размеры.

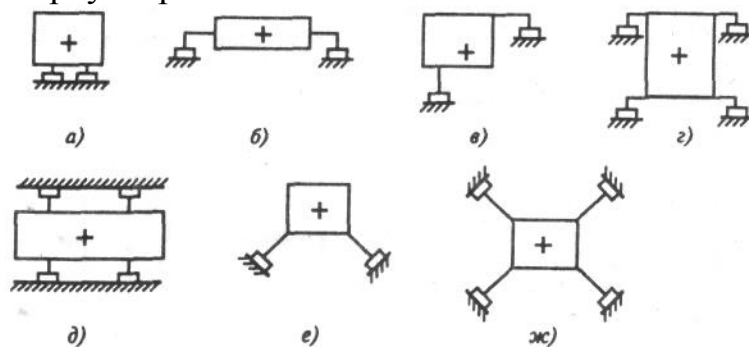
Если статическая деформация амортизаторов не одинакова, для устранения перекосов ставят компенсирующие прокладки.

К основным *параметрам амортизаторов* относят: жесткость, номинальную нагрузку, диапазон собственных частот, коэффициент виброизоляции в диапазоне собственных частот и вне его, относительный коэффициент демпфирования, допустимые условия эксплуатации, гарантированную наработку, габариты и массу. Отметим, что не все параметры указаны в паспортных данных. Длительность надежной работы амортизаторов колеблется в пределах 500—2000 часов.

Амортизаторы резинометаллические просты в изготовлении, защищают от вибрации в любом направлении. Они имеют довольно низкий относительный коэффициент демпфирования и требуют защиты от разрушающих резину воздействий (солнечной радиации, масла, бензина). При понижении температуры упругость амортизаторов ухудшается, жесткость и собственная частота возрастают.

Амортизаторы пружинные защищают от вибрации только в основном направлении. Они хорошо противостоят внешним воздействиям. Диапазон частот воздействующих виброускорений в общем случае равен 5—5000 Гц, при использовании рассмотренных амортизаторов может возникать явление резонанса.

Для исключения резонанса необходимы амортизаторы с собственными частотами не более 3 Гц. Это обеспечивают *пневмогидравлические амортизаторы*. Наиболее распространенная задача расчета амортизации — определение типа и числа амортизаторов, выбор схемы их расположения (рис. 4.5) при заданных кинематических и геометрических параметрах ВТ и при действующем виброускорении.



- а* — нижний монтаж; *б* — монтаж в плоскости центра тяжести;
в — в диагональной плоскости; *г* — в двух горизонтальных плоскостях;
д — двусторонний монтаж; *е* — односторонний монтаж под углом;
ж — двусторонний монтаж под углом

Рис. 4.5. Схема установки амортизаторов

4.2. ОХЛАЖДЕНИЕ ВТ

Использование больших мощностей при сравнительно малых объемах приводит к резкому увеличению плотности мощности рассеяния и плотности рассеиваемой теплоты. Тепловой режим блока ВТ характеризуется совокупностью температур отдельных его точек, т. е. температурным полем в °С (рис. 4.6).

Для описания теплообмена (теплопроводности, конвекции, излучения) используют следующее соотношение:

$$\Phi = \alpha S \Delta t,$$

где Φ — тепловой поток, Вт;

α — коэффициент теплоотдачи Вт/(м²К);

S — площадь поверхности теплообмена, м²;

Δt — перепад температур между двумя изотермическими поверхностями (в теле или между двумя телами, К).

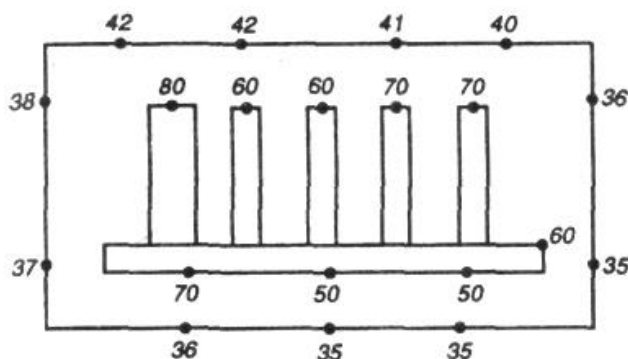


Рис. 4.6. Температурное поле электронной аппаратуры

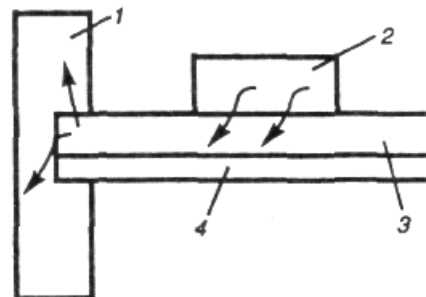


Рис. 4.7. Охлаждение теплопроводностью:

1 — стенка аппаратуры, 2 — интегральная схема, 3 — теплоотвод, 4 — печатная плата

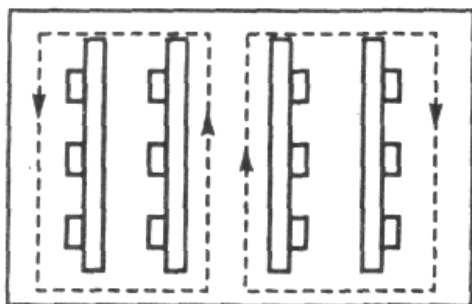


Рис. 4.8. Естественное воздушное охлаждение в герметичном корпусе

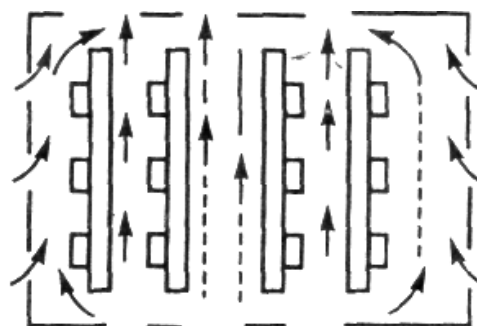


Рис. 4.9. Естественное воздушное охлаждение в негерметичном корпусе

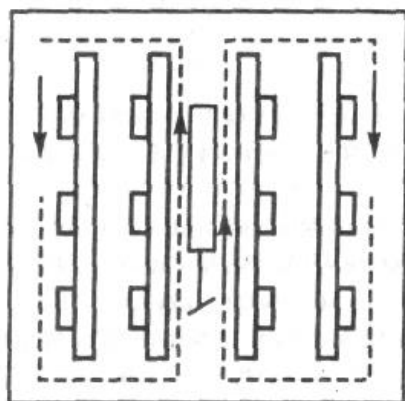


Рис. 4.10. Принудительное воздушное охлаждение в герметичном корпусе

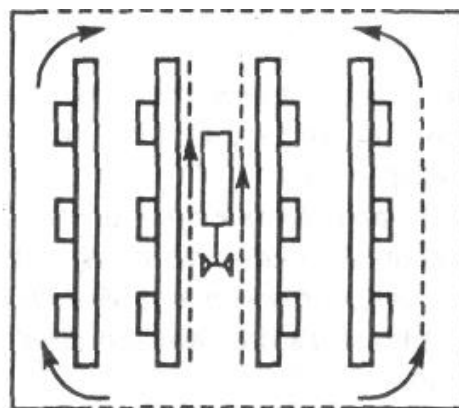


Рис. 4.11. Принудительное охлаждение в негерметичном корпусе

Техническая реализация системы охлаждения микроэлектронной аппаратуры выполняется одним из способов:

- а) охлаждением теплопроводностью (рис. 4.7);
- б) естественным воздушным охлаждением в герметичном корпусе (рис. 4.8);
- в) естественным воздушным охлаждением в негерметичном корпусе (рис. 4.9);
- г) принудительным воздушным охлаждением в герметичном корпусе (рис. 4.10);
- д) принудительным воздушным охлаждением в негерметичном корпусе (рис. 4.11);
- е) естественным жидкостным охлаждением (рис. 4.12);
- ж) принудительным жидкостным охлаждением (рис. 4.13);
- з) охлаждением испарением (рис. 4.14);
- и) охлаждением излучением (рис. 4.15).

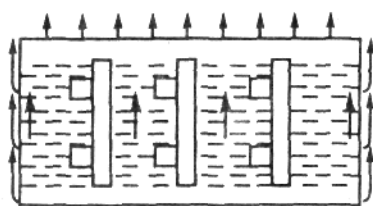


Рис. 4.12. Естественное жидкостное охлаждение

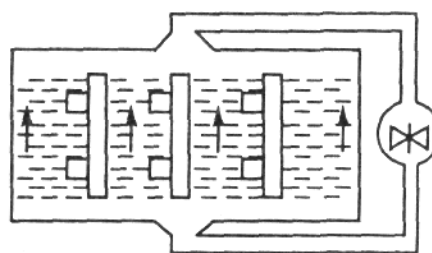


Рис. 4.13. Принудительное жидкостное охлаждение

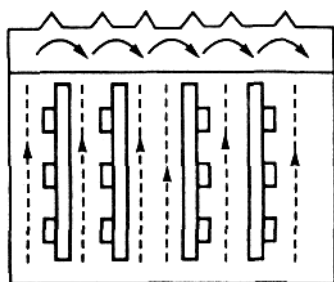


Рис. 4.14. Охлаждение испарением

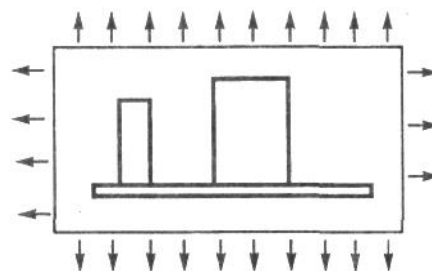


Рис. 4.15. Охлаждение излучением

4.2.1. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Процесс передачи теплоты *теплопроводностью* объясняется обменом кинетической энергией между молекулами вещества и диффузией электронов. Оба эти явления наблюдаются в том случае, когда температура вещества в различных точках различна или когда контактируют два объекта с различной степенью нагрева. Основной закон теплопроводности (закон Фурье) утверждает, что количество теплоты, проходящей через тело в единицу времени, прямо пропорционально площади поперечного сечения, нормальной к потоку теплоты и температурному градиенту вдоль потока:

$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau} = -\lambda S \frac{dt}{dx}, \quad (4.6)$$

где Q — количество теплоты, Дж;

t — время, с;

τ — константа, характеризующая теплопроводность материала Вт/(мК);

X — линейная координата, м.

Из уравнения следует, что поток теплоты может быть направлен только в сторону падения градиента температур. Для случая, когда теплофизические характеристики вещества постоянны во всех точках, а тепловой поток имеет составляющие распространения по трем координатным осям, пользуясь предыдущей формулой, можно записать основное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{Q'}{\lambda} = \frac{\gamma}{C\gamma} \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

где Q' — количество теплоты, эквивалентное мощности внутренних источников в единице объема, Дж;

C — удельная теплоемкость вещества, Дж/(кгК);

γ — плотность вещества, кг/м³.

Для случая передачи теплоты через плоскую стенку толщиной b (рис. 4.16) количество теплоты, передаваемой за единицу времени через участок стенки площадью S , на основании закона Фурье (4.6):

$$Q = (\lambda/b)S(t_{cm1} - t_{cm2}) = S\Phi,$$

где t_{cm1} , t_{cm2} — постоянные во времени температуры поверхностей стенки, К или °С.

Если теплопроводность не зависит от температуры, то внутри стенки она убывает по линейному закону.

Отношение $b/(\lambda S)$ называют *термическим* или *тепловым сопротивлением* и обозначают

$$R_c = b/(\lambda S).$$

Значение R_c соответствует сопротивлению R в уравнении закона Ома, а величина, обратная коэффициенту теплопроводности, т. е. удельное термическое сопротивление E , эквивалентна удельному сопротивлению в электротехнике:

$$1/\lambda = R_c(S/b).$$

Так, для трехслойной стенки (рис. 4.16), пользуясь уравнением (4.6), составим систему уравнений:

$$\begin{cases} t_{cm1} - t_{cm2} = Qb_1/(\lambda_1 S) \\ t_{cm2} - t_{cm3} = Qb_2/(\lambda_2 S) \\ t_{cm3} - t_{cm4} = Qb_3/(\lambda_3 S) \end{cases}$$

После сложения этих уравнений получим схему (рис. 4.17).

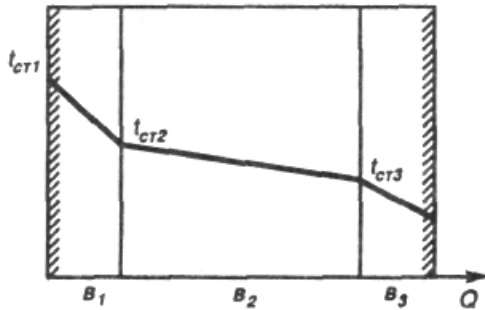


Рис. 4.16. Теплопроводность трехслойной стенки

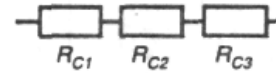


Рис. 4.17. Эквивалентная схема трехслойной стенки

Решив систему уравнений, получим:

$$t_{cm1} - t_{cm4} = \left(\frac{b_1}{\lambda_1 S} + \frac{b_2}{\lambda_2 S} + \frac{b_3}{\lambda_3 S} \right) Q = (R_{C1} + R_{C2} + R_{C3}) Q = \sum_{i=1}^3 R_{Ci} Q.$$

Пусть элементы, которые необходимо охлаждать, располагаются на стенке, имеющей температуру

$$t_{cm1} = Qb/(\lambda S) + t_{cm2}.$$

Тогда для уменьшения t_{cm1} следует увеличить площадь теплоотводящей поверхности, уменьшить количество выделяемой теплоты, толщину стенки (путь передачи теплоты), температуру и выбрать материал с высокой теплопроводностью. Этому требованию соответствуют печатные платы на металлической основе.

Естественное и принудительное воздушное охлаждение. Эти способы охлаждения наиболее просты и доступны, так как все элементы микроЭВМ находятся в объеме, заполненном воздухом или инертным газом. Теплота от нагретых корпусов микросхем передается окружающей атмосфере за счет естественной конвекции. Эффективность естественного воздушного охлаждения тем больше, чем больше разность температур между корпусом и окружающей средой и чем больше площадь поверхности корпуса. Большое значение также имеет плотность окружающей среды, при уменьшении которой отвод теплоты от поверхности корпуса уменьшается.

В общем случае тепловое сопротивление R_c с учетом $R_c = b/(\lambda S)$ имеет вид

$$R_c = \int_{x_i}^{x_j} \frac{1}{\lambda S(x)} dx.$$

Так как элементы конструкции имеют разную форму, то выражения для теплового сопротивления однородных тел плоской R_{nl} (рис. 4.18, а), цилиндрической $R_{ц}$ (рис. 4.18, б) и шаровой $R_{ш}$ (рис. 4.18, в) конфигурации имеют такой вид:

$$R_{nl} = (x_2 - x_1)/(\lambda S_{nl}),$$

где S_{nl} — площадь плоской стенки;

$$R_y = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\lambda \cdot 2\pi x L} dx = 1/(\lambda \cdot 2\pi L) \ln(x_2/x_1),$$

$$R_{ш} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\lambda \cdot 4\pi x^2} dx = \frac{1}{\lambda \cdot 4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x^2} dx = \frac{1}{\lambda \cdot 4\pi} \left(-\frac{1}{x} \right).$$

Напомним, что теплообмен конвекцией описывается законом Ньютона — Римана: $\Phi = \alpha S \Delta t$, согласно которому тепловой поток от поверхности твердого тела к среде или наоборот будет иметь вид

$$\Phi_{ic} = \alpha_{ic} S_i (t_i - t_c),$$

где α_{ic} — коэффициент теплообмена конвекцией между поверхностью тела и средой, Вт/(м²·град);

t_i и t_c — температура поверхности тела и среды;

S_i — площадь поверхности теплообмена, м².

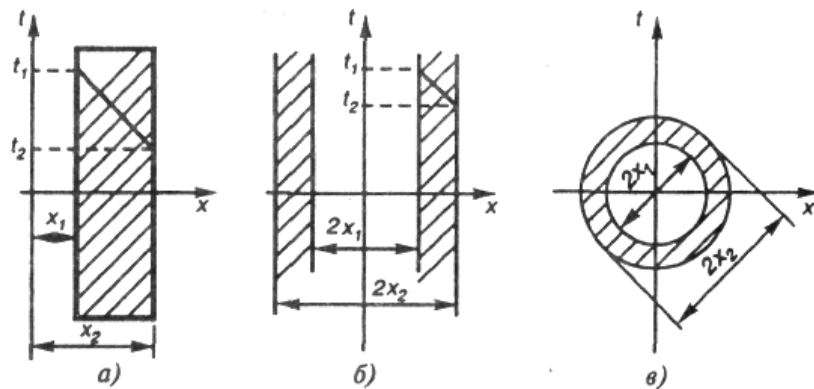


Рис. 4.18. Элементы конструкции

Если тепловая энергия передается от поверхности i к поверхности j через жидкую или газообразную прослойку, тогда тепловой поток

$$\Phi_{ij} = k_{ij} S_i (t_i - t_j),$$

где k_{ij} — коэффициент теплопередачи в прослойке, Вт/(м²·К).

Коэффициенты теплообмена конвекцией α_{ic} и теплопередачи в прослойке k_{ij} являются функциями физико-механических и кинематических свойств жидкости или газа, а также параметров, характеризующих форму и размеры поверхностей. При анализе процессов теплообмена конвекцией используют критерии:

Нуссельта $Nu = \alpha_{ic} L / \lambda_c;$

Грасгофа $Gr = g \beta_c (t_i - t_c) L^3 / \nu^2;$

Прандтля $Pr = \nu / a_c;$

Рейнольдса $Re = \nu L / \nu,$

где L — определяющий размер элемента конструкции (длина обтекания, длина пластины или цилиндра);

$\lambda_c, \beta_c, \nu, a_c$ — соответственно коэффициенты теплопроводности, объемного расширения (жидкости или газа), 1/К, кинематической вязкости, м²/с, температуропроводности, м²/с;

g — ускорение свободного падения, м/с²;
 v — скорость потока жидкости или газа, м/с.

При построении тепловой модели упрощают элементы конструкции и идеализируют протекающие в них тепловые процессы. Один из способов упрощения — замена сложной по форме нагретой зоны элемента конструкции прямоугольным параллелепипедом — эквивалентом нагретой зоны с одинаковой среднеповерхностной температурой и равномерно распределенным источником тепловой энергии. Такая замена выполняется на основе принципа усреднения. Идеализация тепловых процессов заключается в том, что учитываются только основные, вносящие наибольший вклад в тепловой обмен, способы переноса тепловой энергии. Упрощение элементов конструкции и идеализация тепловых процессов должны быть таковы, чтобы обеспечивалась адекватность модели.

Тепловые процессы при таком подходе описываются системой неоднородных нелинейных алгебраических уравнений, которые составляются на основе закона сохранения энергии с использованием выражения

$$t_i - t_j = F_{ij} W_i = \Delta t_{ji}$$

где F_{ij} — тепловой коэффициент,

W_i — перенос тепловой энергии от $i \rightarrow j$

Число уравнений определяется количеством нагретых зон.

4.2.2. ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ВТ

На начальной стадии проектирования конструкции необходимо решить вопрос о выборе способа ее охлаждения. Такой выбор можно выполнить по результатам расчета температурного режима конструкции при каждом из возможных способов охлаждения. Но такой подход требует значительных затрат времени конструктора. Способ охлаждения конструкции ВТ ориентировочно можно выбрать (рис. 4.19) по области изменения параметров (перегреву конструкции Δt , удельной тепловой энергии Φ_y , рассеиваемой ею). Область разделяем на зоны, соответствующие каждому способу охлаждения: естественным — воздушному 1 или жидкостному 3, принудительному — воздушному 2, жидкостному 4 и испарительному 5. Нижняя часть относится к блокам, верхняя — к индивидуальным элементам.

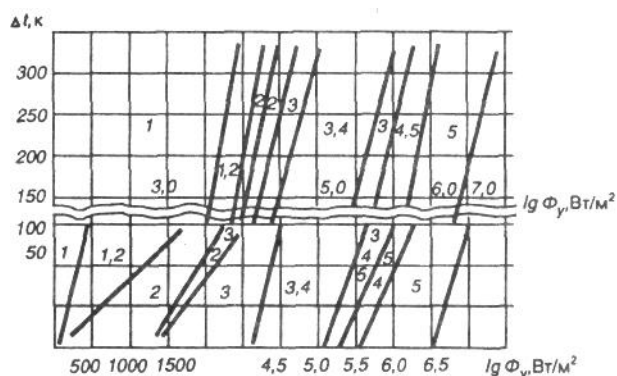


Рис. 4.19. Диаграмма выбора способа охлаждения

Рассмотрим методику способа охлаждения.

1. Определяют минимальный допустимый перегрев нагретой зоны

$$\Delta t_{don} = t_{don} - t_{o.c.max},$$

где t_{don} — допустимая температура нагретой зоны, К;

$t_{o.c.max}$ — максимальная температура окружающей среды, К.

2. Рассчитывают поверхность нагретой зоны, м²,

$$S_3 = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3 K_3]$$

где L_1, L_2 — горизонтальные размеры корпуса, м;

L_3 — высота корпуса, м;

K_3 — коэффициент заполнения, равный отношению объема функциональных и монтажных элементов внутри объема к его внутреннему объему.

Для блоков *при жидкостном и испарительном охлаждении* значение S_3 рассматривают по его геометрическим размерам охлаждаемой поверхности, находящейся в контакте с теплоносителем.

3. Находят удельную мощность нагретой зоны, Вт/м²,

$$\Phi_\gamma = \Phi / S_3$$

где Φ — мощность, рассеиваемая блоком или элементом, Вт.

4. Определяют зону, в которой лежит точка с координатами Δt_{don} и Φ_γ . Если точка попадает в зону с несколькими возможными способами охлаждения, то для уточнения рассчитывают тепловой режим.

При принудительном охлаждении конструкции основная задача — это определение расхода хладагента для обеспечения нормального температурного режима комплектующих элементов. При заданном расходе хладагента, а также при естественном охлаждении можно поставить задачу определения коэффициента заполнения и геометрических размеров типовой конструкции или ее элементов либо максимально допустимой выделяемой тепловой энергии, при которой обеспечивается нормальный температурный режим.

Обычно при таких расчетах в качестве определяющего используют среднеобъемный или среднеповерхностный перегрев некоторой типовой конструкции. Поэтому в этом случае необходимо решить задачу поверхностного характера — определить перегрев отдельного элемента, находящегося в наихудших температурных условиях, и проверить для него выполнение условия теплового режима. К этому же классу относится задача перегрева при заданном способе охлаждения и геометрических размерах.

Рассмотрим механизм передачи тепловой энергии от нагретых зон в окружающую среду. В вычислительной технике с субблоками бескаркасной конструкции без теплоотводящих шин можно пренебречь передачей теплоты конвекцией по элементам крепления и монтажа (рис. 4.20). Тепловая энергия, выделяемая i -й нагретой зоной (субблоком), передается излучением с боковых поверхностей на соседние $(i-1)$ -ю и $(i+1)$ -ю нагретые зоны (тепловые сопротивления $R_{i, i-1}$ и $R_{i, i+1}$) и с торцевых поверхностей к корпусу (тепловые сопротивления R_{ik}). От боковых поверхностей 1-й и N -й плат тепло передается излучением к корпусу (тепловые сопротивления $R_{1\text{ к.б}}$ и $R_{N\text{ к.б}}$).

Тепловая энергия от плат передается воздуху за счет естественной конвекции в каналах между нагретыми зонами, а также между 1-й и N -й платами и боковыми стенками корпуса (тепловые сопротивления $R_{i\epsilon}$).

Передачей тепловой энергии конвекцией от торцевых поверхностей плат пренебрегаем из-за малой площади поверхности. Тепловая энергия, воспринятая воздухом, конвекцией передается корпусу ($R_{\epsilon\kappa}$), который рассеивает ее в окружающую среду в общем случае за счет кондукции, конвекции и излучения ($R_{\kappa\sigma}$). Тепловая схема составляется на основании выполненного анализа механизмов передачи тепловой энергии (рис. 4.21).

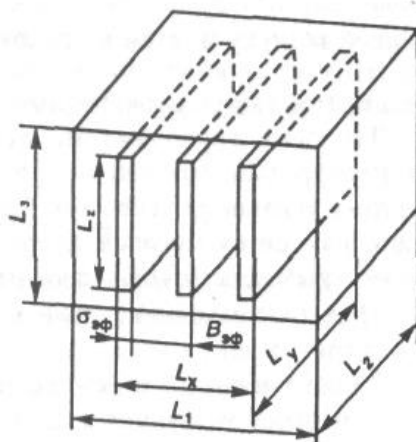


Рис. 4.20. Схема тепловой модели

Уравнения теплового баланса:

$$\begin{cases} \Phi_1 = (t_1 - t_\kappa)(g_{1\kappa} + g_{1\kappa\epsilon}) + (t_1 - t_2)g_{12} + (t_1 - t_\epsilon)g_{1\epsilon} \\ \Phi_i = (t_i - t_\kappa)(g_i + g_{i\kappa\epsilon}) + (t_i - t_{i+1})g_{i,i+1} + (t_i - t_\epsilon) \cdot g_{i\epsilon}, \quad i=2,3,\dots,N-1; \\ \Phi_N = (t_N - t_\kappa)(g_{N\kappa} + g_{N\kappa\epsilon}) + (t_{N-1} - t_N)g_{N-1,N} + (t_N - t_\epsilon)g_{N\epsilon} \\ \Phi_{3\epsilon} = (t_\epsilon - t_\kappa) \cdot g_{\epsilon\kappa}; \quad \phi = (t_\kappa - t_c) \cdot g_{\kappa\sigma} \end{cases}$$

где $\Phi_{3\epsilon} = \sum_{i=1}^N (t_i - t_\epsilon) \cdot g_{i\epsilon}$ — суммарная тепловая энергия, передаваемая конвекцией воздуху и затем воздухом корпусу;

$\Phi = \sum_{i=1}^N \Phi_i$ суммарная тепловая энергия, выделяемая платами.

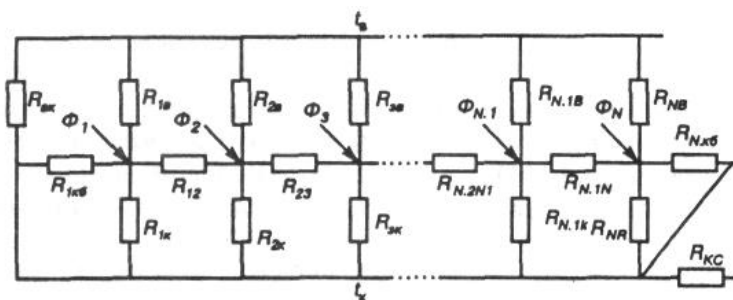


Рис. 4.21. Эквивалентная тепловая схема передачи энергии

Тепловые проводимости, входящие в систему уравнений, зависят от температур плат, воздуха внутри ВТ, корпуса и окружающей корпус среды. Поэтому уравнения теплового баланса — нелинейные. Решение этих уравнений

находится методом итерации, исходя из предполагаемых значений неизвестных перегревов. Основные этапы метода:

- а) задают начальные значения неизвестных перегревов корпуса, воздуха и нагретых зон;
- б) для данных перегревов определяют тепловые проводимости;
- в) решают уравнения теплового баланса относительно неизвестных перегревов;
- г) текущие значения перегревов сравнивают с предыдущими, т. е. проверяют условие

$$|\Delta t_n - \Delta t_{(n-1)}| \leq \varepsilon$$

где ε — точность приближения,
 n — шаг итерации.

Если данное условие выполнено, то решение получено, иначе вычисления продолжаются, начиная со второго этапа.

Вывод. Тепловой режим зависит от мощности источников и стоков тепловой энергии и принудительной системы охлаждения, температуры окружающей среды и условий теплообмена. Температурный режим влияет на надежность и помехоустойчивость ВТ. Конструкция ВТ должна обеспечивать нормальный тепловой режим, что достигается проектированием способов охлаждения и разработкой соответствующих элементов и узлов. Задача обеспечения нормального теплового режима более важна с ростом быстродействия и уровня интеграции элементной базы. Наибольшей эффективностью обладает принудительное жидкостное охлаждение, но его реализация связана со значительным усложнением конструкции.

4.3. АТМОСФЕРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Защита конструкций от атмосферных воздействий предполагает защиту от влаги, солнечной радиации, биологической среды, пыли, атмосферного давления. Уменьшение влияния указанных воздействий на ВТ, его блоки, сборочные единицы и детали может быть обеспечено следующими мероприятиями:

- а) разработкой конструкций с применением таких материалов, которые не изменяют своих свойств от внешних воздействий (нержавеющие стали, бронзы, титановые сплавы, специальные пластмассы и т. п.);
- б) покрытием и пропиткой деталей и сборочных единиц специальными смолами, лаками, металлом или его оксидами;
- в) полной изоляцией ВТ, блока или сборочной единицы от внешней среды (герметизация) путем заливки, обволакивания и заключения их в герметизированный корпус.

4.3.1. ЗАЩИТА ПОКРЫТИЯМИ

Защита деталей ВТ 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, которые представляют собой пленкообразующие вещества, наносимые в один или несколько слоев на защищаемую поверхность. Такие покрытия химически более инертны, чем металлические, но имеют меньшую механическую прочность.

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°C, 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°C.

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 подслой 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, а также для предохранения от потускнения серебряных и никелевых покрытий. Эти покрытия обладают высокой твердостью, отражательной способностью и не окисляются на воздухе до 1100°C.

4.3.2. ЗАЩИТА ГЕРМЕТИЗАЦИЕЙ

Герметизация электроизоляционными материалами может производиться заливкой и обволакиванием. Степень защиты определяется влагопроницаемостью используемого материала, толщиной слоя и адгезией с элементами конструкции (особенно с выводами).

Влияние материала на параметры защищаемого изделия зависит от диэлектрической проницаемости, потерь, объемной и поверхностной электропроводности, усадки, теплопроводности и др. Заливка может рассматриваться как заключение изделия в своеобразный корпус, стенки которого вплотную примыкают к поверхности изделия, полностью вытесняя весь воздух из объема. Если слой заливки меньше 1 мм, то при длительном непрерывном воздействии влага проникает непосредственно сквозь него. Так, через слой эпоксидного компаунда толщиной 0,5 мм влага проникает за 30 суток. Влагостойкость пенопласта хуже, чем монолитного полимера с твердым наполнителем.

При заливке механическая прочность существенно повышается. Это также приводит к увеличению внутренних механических напряжений, возникающих за счет различных температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) компаунда и заливаемых деталей. На ТКЛР компаунда можно влиять введением наполнителя. Так, ТКЛР полимеризованной эпоксидной смолы без наполнителя составляет примерно $70 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, а с наполнителем в виде пылевидного кварца — в два раза меньше. ТКЛР материалов деталей, входящих в состав сборочных единиц, лежат в пределах от $4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ (керамика) до $16 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ (медь). Некоторое снижение напряжений достигается введением в компаунд пластификатора.

В большей степени амортизирующую роль может выполнить обволакивающий слой эластичного пенопласта, в котором сжатию подвергаются пузырьки газа в порах. В настоящее время лучшие показатели имеют пенополиуретаны, вспенивающиеся и отверждаемые при комнатной

температуре. Наиболее совершенным средством защиты изделий от влаги считается вакуумная герметизация. Такая герметизация корпусов может быть с разъемными и неразъемными швами: первая используется для защиты сравнительно больших контейнеров с ремонтпригодной аппаратурой; вторая — главным образом для малогабаритных блоков и сборочных единиц.

Швы разъемных конструкций обеспечивают специальными прокладками из свинца, алюминия, красной меди, резины или специальных пластиков. При применении прокладок важное значение имеют чистота соединяемых поверхностей и отклонение их от плоскостности. Резиновые прокладки следует применять цельными, преимущественно круглого сечения, полученными вулканизацией в пресс-форме. Для уменьшения влажности в разъемных конструкциях применяют осушители (например, силикагель).

Неразъемные швы в основном получают пайкой (горячей или холодной). Качество паяных швов зависит от материала корпусов и технологии пайки. Корпуса изготавливают из холоднокатаной стали (0,3—0,5 мм), латуни (0,25 — 0,8 мм) и алюминия (0,3 — 0,8 мм). В отдельных случаях корпуса могут быть керамическими, для этого места пайки покрываются серебром путем нанесения пасты из углекислого серебра и скипидара с последующим обжигом при температуре 800 °С. Пайка с серебряными слоями на керамике должна производиться припоем ПОС-61 с 3%-ной добавкой серебра.

Сварные швы допускают большие механические нагрузки и выдерживают большие перепады температур (от -60 до +200°С). Для контактного и роликового способов электросварки целесообразно использовать корпуса из холоднокатаной стали толщиной 0,25—0,5 мм, а для дуговой сварки толщина должна быть больше 1 мм. Холодная сварка может применяться только для алюминия толщиной более 0,8 мм.

Вакуум-плотная герметизация выводов выполняется с помощью различных конструкций специальных изоляторов.

4.4. ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА

Конструктор получает электрическую схему и техническое задание, в котором указаны особенности работы разрабатываемого изделия, уровни полезных сигналов, допустимые уровни помех, предполагаемые источники и приемники наводок. При создании электрической схемы уже были решены задачи выбора элементной базы, частично решены вопросы унификации и стандартизации, определены электрические характеристики разрабатываемого изделия (вид входной и выходной информации, погрешность, энергоемкость и т. д.), проведена разбивка на блоки. Осталось соединить все элементы, как показано на схеме, и изделие должно работать.

Однако точно рассчитанная по всем параметрам (в том числе и на устойчивость) схема решительно отказывается работать. Появляются сбои и ложные срабатывания в цифровых устройствах, нестабильность усиления, частотных и фазовых характеристик (в аналоговых устройствах). Усилители превращаются в генераторы, а если генераторы и выдают требуемые сигналы, то их сигналы оказываются в таких точках схемы, в которых их присутствие нежелательно. При реализации устройства возникают паразитные связи,

помехи.

Паразитная связь — это не предусмотренная электрической схемой и конструкцией связь между элементами устройства или устройством и внешней средой, приводящая к появлению помех. *Помехи* — электрические сигналы, не предусмотренные электрической схемой изделия. Помехи делят на шумы и наводки. *Наводки* — это помехи, возникающие вследствие появления паразитных связей. *Шумы* — это электрические сигналы, возникающие в электронных приборах независимо от наличия внешних связей и сигналов.

Паразитные связи являются следствием неидеальности реализации электрической схемы, поэтому значения наводок определяются конструкцией изделия (табл. 4.1). Шумы являются следствием неидеальности характеристик электронных приборов, резисторов и конденсаторов. Шумовые параметры приводятся в технических условиях на элементы. Уровень шумов слабо зависит от конструкции изделия. Шумы обусловлены статическими флуктуациями носителей зарядов в проводниках и электронных приборах.

4.1. Классификация паразитных связей в каналах передачи информации

Причины помех	Источники помех		
	внутренние	внешние	
Включение напряжения, помехи в канале связи	Последовательное	Последовательное	Параллельное и последовательное
Физические причины паразитной связи	Неидеальность элементов в канале связи	Неидеальность токопроводящих цепей	Электрические и магнитные поля
Конструктивные причины появления паразитной связи	Наличие контактных соединений	Наличие общего провода	Емкостные и индуктивные паразитные связи

В процессе теплового движения электронов в проводнике происходят случайные изменения их концентрации в разных областях проводника, в результате на концах проводника возникает разность потенциалов, значение которой беспорядочно флуктуирует. Значения ЭДС тепловых шумов на концах резистора определяются по формуле Найквиста:

$$e_T = \sqrt{2kTR\Delta\omega/\pi},$$

где $k = 1,374 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана, Дж/К;

T — абсолютная температура резистора, К;

R — сопротивление, Ом;

$\Delta\omega$ — полоса частот, в которой измеряется уровень шумов, 1/рад.

В пленочных и матричных резисторах типов МЛТ, С2-8, С2-23, С2-36, токопроводящий слой которых имеет зернистую структуру, возникают дополнительные шумы, обусловленные флуктуациями проводимости. При протекании тока сопротивление между отдельными зернами и пути токов между ними непрерывно изменяются. Шумовое напряжение пропорционально току:

$$e_{\text{ток}} = K_{\text{ш}} U_{\text{п}} \sqrt{\Delta f / f_{\text{ш}}},$$

где $e_{\text{ток}}$ — токовые шумы, мкВ;

$K_{\text{ш}}$ — коэффициент шума, мкВ/В;

$U_{\text{п}}$ — постоянное напряжение, приложенное к резистору, В;

Δf — полоса рабочих частот, МГц;

$f_{\text{ш}}$ — частота спада шумовых токов (~ 10 МГц).

В полупроводниковых приборах кроме тепловых шумов возникают дробовые и мерцательные шумы. *Дробовые шумы*, имеющие постоянную амплитуду во всей полосе частот, возникают вследствие неупорядоченной диффузии неосновных носителей, а также рекомбинации и генерации электронно-дырочных пар. *Мерцательные шумы* (шумы вида $1/f$) возрастают с понижением частоты. Причины возникновения мерцательных шумов многочисленны и разнообразны, но в основе их возникновения лежат медленные флуктуации зарядов и их перераспределение по объему полупроводника. Значения тепловых, дробовых и мерцательных шумов полупроводниковых приборов определяются полосой рабочих частот и режимом работы, и зависят от конструкции устройства, в котором они применяются.

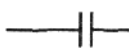
Составляющей шумов, зависящей от конструкции, являются термоЭДС, возникающие в точках соединения проводников из разных металлов. Источником шумов может быть плохой контакт. Для снижения уровня шумов этого вида необходимо уменьшать число контактных соединений и номенклатуру применяемых металлов.

Паразитные элементы — это не предусмотренные электрической схемой элементы, появившиеся в результате неидеальной практической реализации электрической схемы. Паразитные элементы возникают вследствие невозможности создания проводников и линий связи, не обладающих сопротивлением, индуктивностью и емкостью, и невозможности создания элементов схемы, обладающих только одним параметром: R , L и C .

Проводя расчет и вычерчивая электрическую схему, считаем, что:

элемент  имеет только R ,

элемент  имеет только L ,

элемент  имеет только C ,

а провод  не имеет ни сопротивления, ни индуктивности, ни емкости и между двумя проводами на схеме нет никакой связи.

В реальной конструкции любой элемент обладает всеми тремя параметрами одновременно. Вопрос заключается в том, чтобы знать, когда можно пренебречь паразитными параметрами, а когда их необходимо учитывать. В реальной конструкции возникают паразитные связи, значения которых зависят от взаимного расположения и размеров элементов и линий связи (табл. 4.1). Любое электронное устройство содержит каналы для передачи сигналов. *Канал связи* — совокупность источника сигнала, линии связи и приемника сигнала. Это каналы связи между элементами одного узла или блока или между блоками устройства, или между различными устройствами. В

устройствах линии связи разделяют на «короткие» и «длинные».

4.4.1. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОМЕХ

Помехой для ВТ является внешнее или внутреннее воздействие, приводящее к искажению дискретной информации во время ее хранения, преобразования, обработки или передачи (рис. 4.22). Так как информационные сигналы в ВТ имеют электрическую природу, то при конструировании необходимо учитывать помехи той же природы, как наиболее вероятные источники искажения информации. Причинами помех являются следующие:

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. Так, вольт-секундная площадь сигналов, снимаемых с ферритового сердечника типа 1,3 Вт — $2 \times 1,4 \times 0,9$, будет иметь значение порядка $0,06 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с}$. Сигнал со считывающей головки накопителя на магнитных дисках составляет $0,01 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с}$. Для сравнения укажем, что вольт-секундная площадь паразитного импульса перенапряжения, получающегося при разрыве тока в 100 мА, протекающего через индуктивность (например, реле) в 100 мкГн, составляет $10 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с}$.

2) *Увеличение* взаимного влияния элементов из-за уменьшения габаритных размеров активных элементов и линий связи между ними, а также 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* ВТ во все сферы человеческой деятельности.

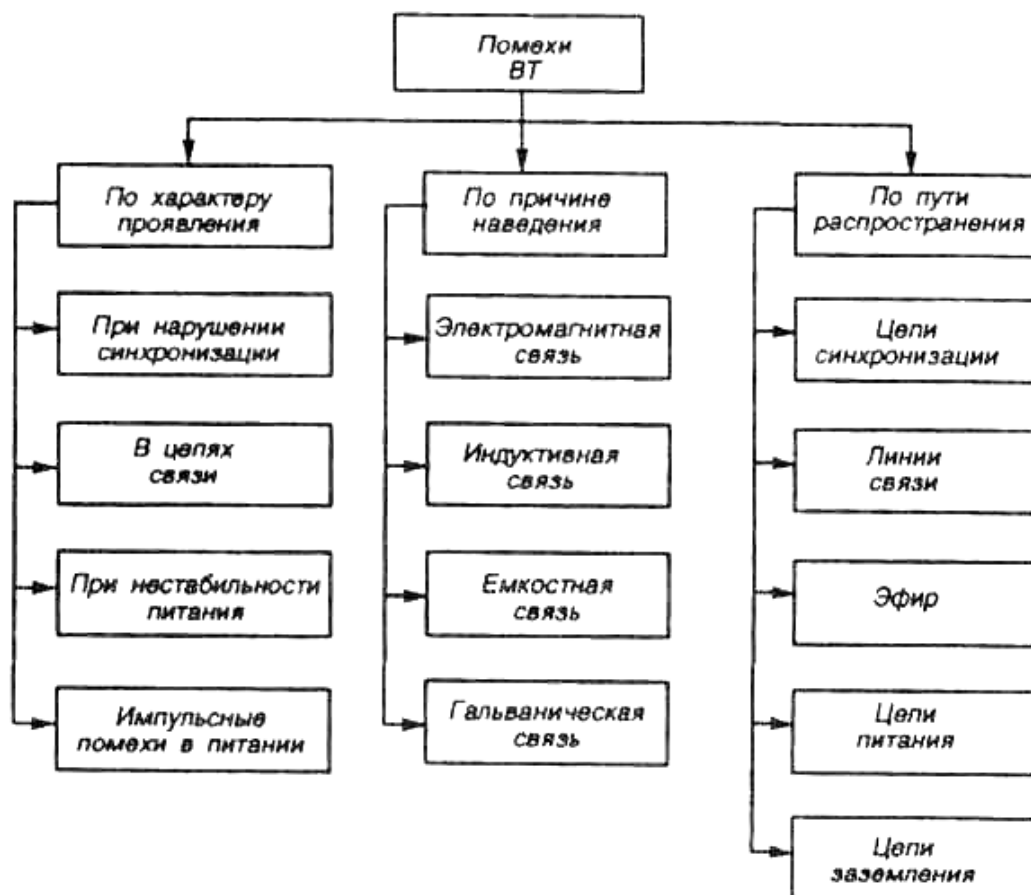


Рис. 4.22 – Классификация помех

Помехи в цепях связи и сигнальных цепях могут быть оценены в процессе проектирования. Особенностью этого вида помех являются малая длительность и большая интенсивность.

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

- 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.

4.4.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ В ВТ

Связи между элементами в ВТ 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 успеет существенно измениться входной импульс. Свойства такой линии описываются сосредоточенными сопротивлениями, емкостью и индуктивностью.

«Длинная» линия связи характеризуется временем распространения сигнала, которое много больше фронта импульса (соединения внутри субблоков, блоков, панелей, внутристоечные, межстоечные для ВТ). 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.

Для определения уровня помех учитывают электрические параметры линий связи:

а) для «коротких» линий: L_i — индуктивность линии, Гн; C_i — емкость линии, Ф; R_i — сопротивление линии, Ом; C_{ij} — взаимную емкость соседних линий, Ф; M_{ij} — взаимную индуктивность соседних линий, Гн; G_{ij} — проводимость изоляции между соседними линиями, См;

б) $L_{i0}, C_{i0}, R_{i0}, C_{ij0}, M_{ij0}, G_{ij0}$ — те же параметры, распределенные на единицу длины; $Z_0 = (L_0 / C_0)^{1/2}$ — волновое сопротивление линии.

При расчете помех необходимо знать длину линии связи, входное и выходное сопротивления нагруженных по линии связи элементов, входные и выходные емкости. Так как логические схемы имеют нелинейные входные и выходные характеристики, то их входное и выходное сопротивления при переключении схем из одного состояния в другое могут изменяться на несколько порядков.

4.4.3. ПОМЕХИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВТ «КОРОТКИМИ» СВЯЗЯМИ

При анализе процессов в «коротких» линиях связи составляют эквивалентную схему, содержащую сосредоточенные индуктивность и емкость. Исходя из предположения преобладания того или иного параметра, рассмотрим влияние каждого в отдельности на передачу сигналов. *Индуктивный характер* сигнальной линии связи рассчитывается по эквивалентной схеме (рис. 4.23).

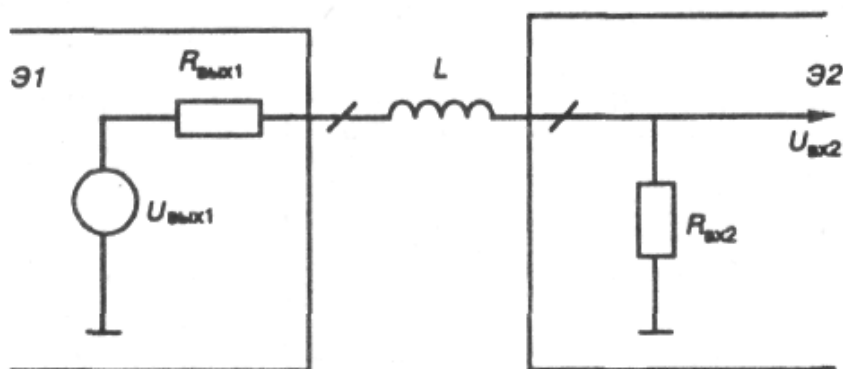


Рис. 4.23 – Схема сигнальной линии индуктивного характера

При подаче на вход схемы ступеньки напряжения с амплитудой $U_{\text{ВЫХ1}}$ состояние схемы может быть описано уравнением

$$U_{\text{ВХ2}} + [L(R_{\text{ВЫХ1}} + R_{\text{ВХ2}})]dU_{\text{ВХ}} / dt = U_{\text{ВЫХ1}}.$$

При этом напряжение на входе второго элемента

$$U_{\text{ВХ2}} = [R_{\text{ВХ2}} / (R_{\text{ВЫХ1}} + R_{\text{ВХ2}})] \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] U_{\text{ВЫХ1}}$$

где $\tau = L / (R_{\text{ВЫХ1}} + R_{\text{ВХ2}})$. Так как в микроэлектронных элементах обычно $R_{\text{ВЫХ}} \ll R_{\text{ВХ}}$, то

$$U_{\text{ВХ2}} \approx [1 - \exp(-t/\tau)] U_{\text{ВЫХ1}} \quad (4.7)$$

Элемент Э2 срабатывает, когда напряжение на его входе $U_{\text{ВХ2}}$ достигает порога срабатывания $U_{\text{П}}$ с некоторой задержкой τ_3 (рис. 4.24). Задержка может быть определена по формуле (4.7). Если принять $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{П}} = U_{\text{ВЫХ}} / 2$ то $\tau_3 \approx 0,7\tau = 0,7L / R_{\text{ВХ2}}$

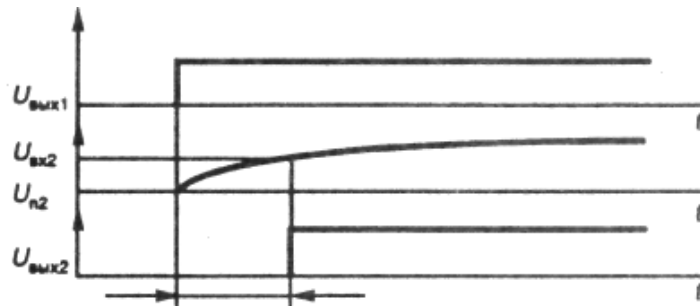


Рис. 4.24 – Временная диаграмма

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. 4.25).

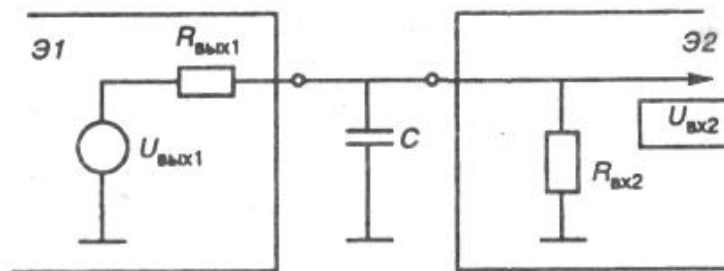


Рис. 4.25 – Эквивалентная схема сигнальной линии емкостного характера

В соответствии с законом Кирхгофа имеем:

$$U_{\text{ВХ2}} + R_{\text{ВЫХ1}}(U_{\text{ВХ2}} / R_{\text{ВЫХ2}} + CdU_{\text{ВХ2}} / dt) = U_{\text{ВЫХ1}}$$

или

$$U_{\text{ВХ2}}(R_{\text{ВХ2}} + R_{\text{ВЫХ1}}) / (R_{\text{ВЫХ1}} + R_{\text{ВЫХ1}}CdU_{\text{ВХ2}} / dt) = U_{\text{ВЫХ1}}$$

$$U_{BX2} = U_{ВЫХ1} [R_{BX2} / (R_{ВЫХ1} + R_{BX2})] \cdot [1 - \exp(-t/\tau)]$$

где $\tau = CR_{BX2} \cdot R_{ВЫХ1} / (R_{BX2} + R_{ВЫХ1})$

При $R_{ВЫХ} \ll R_{BX}$,

$$U_{BX2} \approx U_{ВЫХ1} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad \tau \approx CR_{ВЫХ1}$$

Влияние емкости сигнальных линий аналогично влиянию индуктивности сигнальной линии и выражается в задержке включения нагруженных схем (см. рис. 4.24). Чтобы обеспечить устойчивую работу элементов, необходимо уменьшить длину цепей связи, амплитуды токов, увеличить порог срабатывания элементов, фронт передаваемых импульсов, расстояние между проводниками связей. Последнее уравнение трансцендентное и решать его следует методом итераций. В общем случае в цепи приемника наводки возникают как емкостная, так и индуктивная помехи. При этом емкостная наводка изменяет потенциал всей линии связи, а индуктивная создает разность потенциалов между входом и выходом линии. Прямой способ нахождения суммарной помехи сложен. Достаточно хорошее приближенное решение может быть найдено путем нахождения допустимой длины линии связи для емкостной l_c и индуктивной l_m составляющей помехи. Полагая, что амплитуда помехи пропорциональна длине провода, можно определить допустимую длину общего участка двух сигнальных цепей по формуле

$$l = l_c l_m / (l_c + l_m).$$

Таким образом, можно определить совместное влияние индуктивной и емкостной помехи на длину сигнальной линии.

4.4.4. ПОМЕХИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ «ДЛИННЫМИ» СВЯЗЯМИ

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_{BX} на входе линии и соотношения волнового сопротивления линии Z_0 , выходного сопротивления Z_r генератора импульсов и входного сопротивления Z_H нагруженного на конец линии элемента.

Из теории «длинных» линий известно, что если линия с волновым сопротивлением Z_0 нагружена на сопротивление Z_H то коэффициент отражения, определяемый как отношение изображения (по Лапласу) напряжения отраженной волны к изображению напряжения падающей волны, определяется из соотношения

$$K_U(p) = U_{отр}(p) / U_{BX}(p) = (z_H - z_0) / (z_H + z_0).$$

Если $z_H = z_0$ то $K_U(p) = 0$ и такую линию называют *согласованной*, то в ней не происходит отражений от сопротивления нагрузки. Если $z_H \neq z_0$, то $K_U(p) \neq 0$ и такую линию называют *несогласованной*: волна напряжения, достигнув конца линии связи, отражается *синфазно* $K_U(p) > 0$ или в *противофазе* $K_U(p) < 0$. Отраженная от конца линии связи волна напряжения, достигнув ее начала, или затухает, если $z_r = z_0$ или вновь отражается, если

$z_r \neq z_0$ (рис. 4.26). На рис. 4.27 схематически представлен процесс прохождения волны напряжения в линии, для которой $z_r \neq z_0$, $z_n \neq z_0$. Генератор выдает напряжение $U(t)$. На входе линии связи это напряжение $U_{вх}(t)$ преобразуется в соответствии с формулой

$$U_{вх}(t) = U(t)z_0 / z_0 + z_r.$$

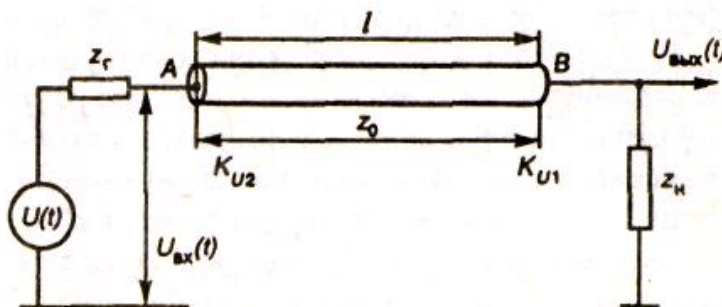


Рис. 4.26 – Схема «длинной» линии

В свою очередь эта волна напряжения, пройдя по «длинной» линии со скоростью $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$, через время $T = l/v = l\sqrt{L_0 C_0}$ достигнет конца линии и отразится от него с коэффициентом отражения $K_{U1} = (z_n - z_0)/(z_n + z_0)$. Отраженная волна через время T , дойдя до начала линии связи, также отразится от него с коэффициентом отражения $K_{U2} = (z_r - z_0)/(z_r + z_0)$.

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. Коэффициент отражения волны тока $K_i(p) = (z_0 - z_n)/(z_0 + z_n)$, т. е. $K_i(p) = -K_i/(p)$, а это означает, что волна тока отражается в противофазе с волной напряжения. Если z_n активно, то значение $K_U(p) = -K_i/(p) = K_{отр}$ определяет отношение изображений и оригиналов отраженной и падающей волн напряжения и тока. При этом форма отраженной волны подобна форме падающей, а ее значение и знак определяется $K_{отр}$.

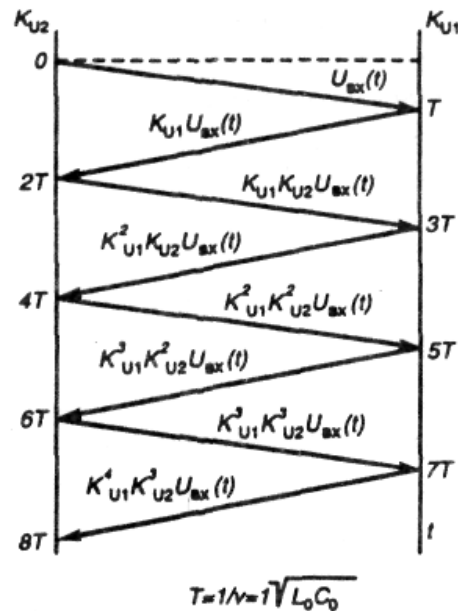


Рис. 4.27 – Схема отражения в «длинной» линии

Отражения волн напряжения и тока могут быть не только от несогласованных нагрузок на концах «длинной» линии, но и от различных неоднородностей в ней самой. На рис. 4.28 «длинная» линия на участке *A* имеет волновое сопротивление z_{01} , а на участке *B* — волновое сопротивление z_{02} . Волна напряжения (тока), достигнув границы раздела, при дальнейшем продвижении вдоль «длинной» линии изменит свое значение на $K_U U_1$ или $K_i i_1$, где

$$K_U = -K_i = (z_{02} - z_{01}) / (z_{02} + z_{01}).$$

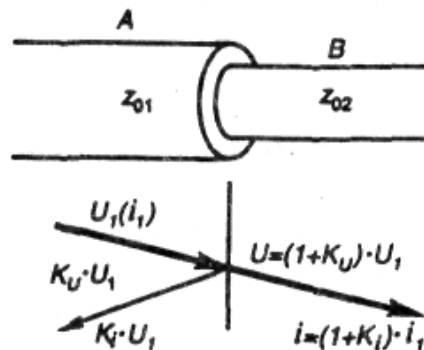


Рис. 4.28 – Схема отражения сигнала от несогласованных нагрузок

Это является следствием отражения от границы раздела двух участков линии с различными значениями волнового сопротивления. Для анализа переходных процессов в «длинной» линии необходимо знать ее волновое сопротивление z_0 .

4.4.5. ПОМЕХИ В КАНАЛАХ СВЯЗИ

В микроэлектронных устройствах линии связи чаще всего являются электрически разомкнутыми линиями без потерь. Входное сопротивление таких линий носит емкостной характер, и его можно представить в виде конденсатора $C_{н11}$, включенного параллельно приемнику сигнала и имеющего

входной импеданс $Z_{\text{вх}1}$ (рис. 4.29). В линии связи возникают помехи, источником которых являются тепловые шумы элементов линии, ЭДС гальванических пар и термопар, возникающих в местах контакта разнородных металлов. Напряжение помех $U_{\text{вн}1}$ такого вида включено последовательно с $Z_{\text{вх}1}$. Помехи такого вида зависят только от собственных параметров канала связи, поэтому будем называть их внутренними.

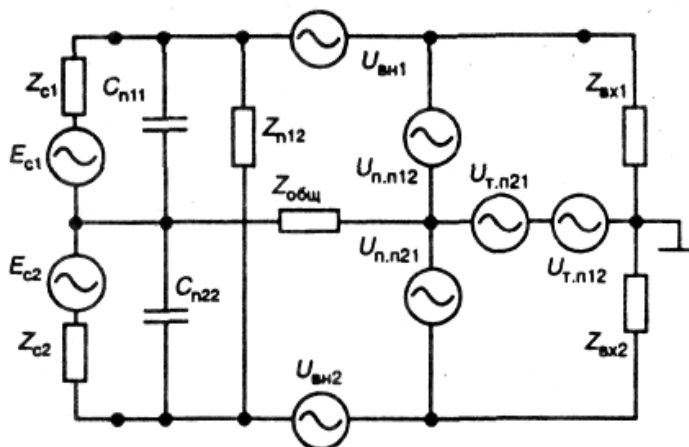


Рис. 4.29 – Эквивалентная схема паразитных связей двух каналов связи

При наличии нескольких каналов связи обычно обратный провод делают общим для всех или для нескольких линий связи из соображений экономии проводов или из-за невозможности изолирования общих выводов нескольких источников и приемников сигналов. Этот факт отмечен введением в эквивалентную схему $Z_{\text{общ}}$.

Падение напряжения на $Z_{\text{общ}}$ от токов, протекающих в других каналах связи, является одной из причин проникновения сигнала из канала в канал. Между рядом расположенными линиями связи всегда возникает паразитная связь (емкостная, индуктивная, резистивная или комплексная), обозначенная через $Z_{\text{n}12}$. Индексы 12 означают паразитную связь из второго канала в первый. В линейных системах выполняется равенство $Z_{\text{n}12} = Z_{\text{n}21}$. При возникновении паразитных связей в нелинейной среде, например на полупроводниковой подложке, это равенство может не выполняться. Помехи, возникающие в канале связи от источников сигнала, находящихся вне данного канала связи, назовем внешними:

- токовые (последовательные) внешние помехи, напряжение которых включено последовательно с $Z_{\text{вх}}$; $U_{\text{п.п}12}$ — напряжение помехи, наводимой из второго канала связи в первый; $U_{\text{п.п}21}$ — напряжение помехи, наводимой из первого канала связи во второй;
- потенциальные (параллельные) внешние помехи $U_{\text{п.п}12}$ и $U_{\text{п.п}21}$ соответственно, напряжение которых включено параллельно $Z_{\text{вх}}$ соответствующего канала: $Z_{\text{вх}1}$ и $Z_{\text{вх}2}$. Такое разделение вида помех позволяет получить обобщенные формулы для расчета значения помех на входе приемника сигнала.

Для параллельной внешней помехи

$$U_{п.п12}(p) = U_{с2}(p)W_{п.п12}(p)$$

где $U_{п.п12}(p)$ — изображение напряжения помехи, наводимой из второго канала в первый;

$U_{с2}(p)$ — изображение сигнала второго канала связи;

p - комплексная переменная;

$W_{п.п12}(p)$ — передаточная функция паразитной связи.

Из рис. 4.29 следует, что

$$W_{п.п12}(p) = Z_{k1}(p) / Z_{п12}(p) \text{ при } Z_{п12} \gg Z_k$$

Неравенство на практике всегда выполняется, так как в противном случае нельзя говорить о двух самостоятельных каналах связи. Входное сопротивление соответствующего канала связи для цепи паразитной связи

$$Z_{ki} = Z_{ci} \parallel Z_{vxi} \parallel X_{cii},$$

где X_{cii} — импеданс паразитной емкости C_{pii} . Для токовой помехи

$$U_{п.п12}(p) = W_{п.п12}(p)I_2(p),$$

где $I_2(p)$ — изображение тока во втором канале (канале, создающем помеху).

В соответствии со схемой

$$W_{п.п12}(p) = Z_{п.п12}(p) = Z_{общ}(p) \quad (4.8)$$

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.

4.4.6. 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 $C_{пар}$, $L_{пар}$, $M_{пар}$, и $Z_{общ}$. Способы уменьшения паразитных связей в принципе несложны:

- 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 взаимно перпендикулярны);
- 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. Общая рекомендация сводится к тому, что на начальном этапе конструирования необходимо принимать все возможные меры для снижения паразитных связей, а уже потом в ходе экспериментальной доводки изделия убрать те элементы, которые оказались лишними. Исключить какой-либо элемент из готового изделия проще, чем добавить.

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. 4.30). В соответствии с этим наводка из второго канала в первый при отсутствии экрана

$$U_{п.п12} = U_{с2} C'_{п12} R_{к1} \omega_{с2} / (1 + T_{к1}^2 \omega_{с2}^2)^{1/2}.$$

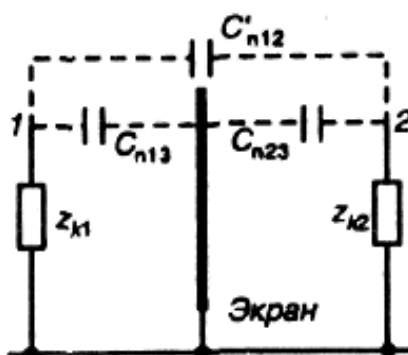


Рис. 4.30 – Принципиальная схема экранирования

Введением экрана, 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 и, следовательно, остаточная емкость $C'_{п12}$ тогда наводка

$$U'_{п.п12} = U_{с2} C'_{п12} R_{к1} \omega_{с2} / (1 + T_{к1}^2 \omega_{с2}^2)^{1/2}$$

Эффективность экранирования

$$\mathcal{E} = U_{п.п12} / U'_{п.п12} = C_{п12} / C'_{п12} \quad (4.9)$$

Выражение (4.9) является приближенным, так как изменение C влияет на постоянную времени T , однако это влияние настолько мало, что им можно пренебречь. 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 и динамическое.

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

$$\mathcal{E} = 1 + \mu h / D,$$

где μ — относительная магнитная проницаемость;

h — толщина стенок экрана;

D — диаметр эквивалентного сферического экрана. Для экрана в форме куба $D = 1,2b$ здесь b — размер стороны куба.

Эффективность магнитостатического экранирования 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. Магнитостатическое экранирование 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.), так как 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.

Вследствие экранирования внутренних слоев вихревыми токами, циркулирующими в поверхностных слоях, переменное магнитное поле ослабляется по толщине материала экрана. Это вызывает неравномерное

распределение токов по толщине экрана, называемое поверхностным эффектом:

$$I_x / I_{\Pi} = \exp(-x / \delta)$$

где I_x, I_{Π} — плотность тока на глубине X и на поверхности экрана;

$$\delta = 2[\rho / (2\mu\mu_0\omega)]^{1/2}$$

где δ - эквивалентная глубина проникновения тока;

ρ — удельное сопротивление материала экрана;

μ - относительная магнитная проницаемость;

μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

ω — круговая частота.

На частотах, на которых толщина $h > \delta$ действуют оба фактора, и эффективность экранирования

$$\mathfrak{E} = \exp(x / \delta) [0,5 + D / (\delta \cdot 2,8K_{\phi}M)] \quad (4.10)$$

где h — толщина стенок экрана;

D — ширина прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического;

K_{ϕ} — коэффициент формы. Для прямоугольного экрана $K_{\phi} = 1$, для цилиндрического $K_{\phi} = 2$, для сферического $K_{\phi} = 3$

На очень высоких частотах, где $h \gg \delta$, значение суммы в круглой скобке уравнения (4.10) всегда больше 1/2, что позволяет упростить выражение:

$$\mathfrak{E} \geq 0,5 \exp(h / \delta) \quad (4.11)$$

Из (4.11) проще получить формулу для расчета минимальной толщины стенок экрана, обеспечивающей эффективность экранирования не ниже заданной:

$$h \geq \delta \ln(2\mathfrak{E}) \quad (4.12)$$

На низких частотах или при малой толщине экрана ($h < \delta$) влияние поверхностного эффекта ниже, и эффективность экранирования

$$\mathfrak{E} = (1 + [\omega \mu_0 Dh / (2K_{\phi}\rho)]^2)^{1/2}$$

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.

Токи, протекающие по экрану под действием высокочастотного магнитного поля, во много раз больше токов, возникающих под действием электрического поля. Поэтому эффективность электрического экрана не зависит от проводимости материала экрана, его магнитной проницаемости и частоты колебаний электрического поля.

На эффективность магнитного экранирования не влияет наличия контакта с общим проводом, но эффективность электрического экрана однозначно определяется наличием хорошего электрического соединения с общим проводом. Для одновременного экранирования электрического и магнитного полей необходимо выполнить обе группы требований. При экранировании

катушек индуктивности следует также учитывать влияние экрана на индуктивность (и добротность). Чем ближе расположен экран к катушке индуктивности, тем больше потери, вносимые экраном, и сильнее снижается добротность и индуктивность.

Потери, вносимые экраном, возрастают с увеличением удельного сопротивления и уменьшением расстояния между экраном и катушкой индуктивности. Поэтому при разработке экранов высокочастотных катушек желательно выбирать материалы с малым сопротивлением (медь, латунь, алюминий). Размеры экрана выбирают таким образом, чтобы зазор между катушкой и экраном был не менее $D_{\text{кат}}/2$, т. е.

$$D_{\text{эк}} \geq 2D_{\text{кат}}; \quad L_{\text{эк}} \geq L_{\text{кат}} + D_{\text{кат}} \quad (4.13)$$

где $L_{\text{кат}}, D_{\text{кат}}$ — длина и диаметр катушки;

$L_{\text{эк}}, D_{\text{эк}}$ — высота и диаметр экрана. Толщину стенок экрана выбирают в соответствии с (4.12).

При размещении высокочастотной катушки индуктивности в экране с размерами в соответствии с (4.13) снижается ее индуктивность на 15—18%, если размеры катушки укладываются в соотношение $3D_{\text{кат}} > L_{\text{кат}} > D_{\text{кат}}$, то при этом дополнительные потери, вносимые экраном,

$$\varepsilon = 3 \cdot 10^{-4} (f_0 \rho_{\text{эк}} / (f \rho_{\text{м}}))^{1/2}$$

где f — рабочая частота; $f = 1 \text{ МГц}$;

$\rho_{\text{м}}$ — удельное сопротивление меди;

$\rho_{\text{эк}}$ — удельное сопротивление материала экрана.

Получаемая эффективность экранирования обычно меньше рассчитанной по (4.10), (4.11) 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 (рис. 4.31).

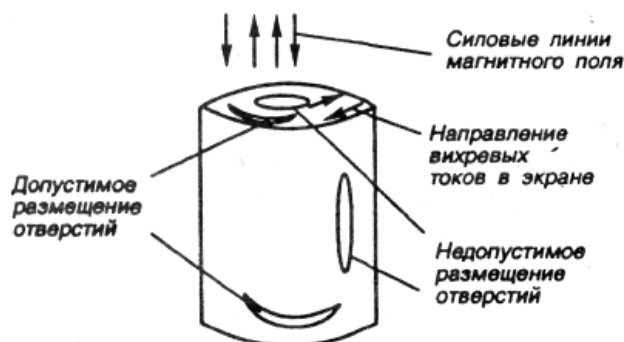


Рис. 4.31 - Расположение отверстий в экране

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, а 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 (рис. 4.32).

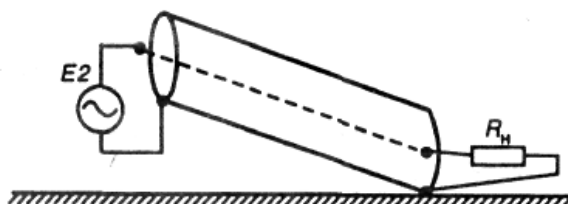


Рис. 4.32 – Соединение проводников и корпуса

При подключении общего провода генератора к корпусу, а не к экрану, получается экранирование только от электрических полей (рис. 4.33), при отсутствии соединения экрана с общим проводом никакого экранирующего эффекта не возникает. При соединении экрана с корпусом со стороны генератора или при соединении с корпусом через длинный провод эффективность падает за счет появления напряжения помех на этом проводе (рис. 4.34). Для экранирования проводов от низкочастотных наводок поверхность экрана должна иметь изолирующую оболочку, которая исключает случайные контакты с металлическими элементами корпуса изделия.

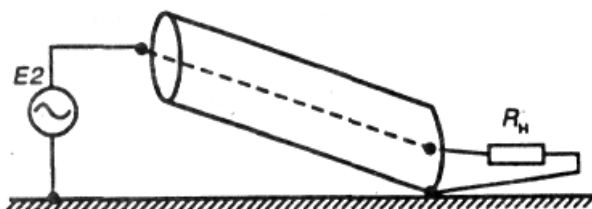


Рис. 4.33 – Подключение общего провода к корпусу



Рис. 4.34 – Замыкание экрана на корпус

При замыкании экрана на корпус нарушается магнитное экранирование части провода, расположенного между точкой замыкания экрана на корпус и нагрузкой. В этом случае при отключении соединения экрана около нагрузки уровень наводок снижается, тогда необходимо найти и устранить замыкание экрана на корпус. На высоких частотах из-за поверхностного эффекта обратный ток протекает в основном по внутренней поверхности экрана, поэтому на частотах более 10 МГц замыкание на корпус не снижает эффективности экранирования. Применение экранированных проводов увеличивает габаритные размеры, стоимость и паразитную емкость монтажа, поэтому применять экранированные провода и коаксиальные кабели необходимо только в случае, когда другие средства не дали нужного эффекта.

4.4.7. 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. 4.35).

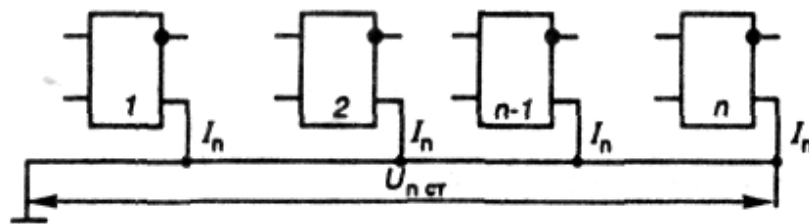


Рис. 4.35 – Принципиальная схема

В наихудшем «режиме» по помехозащищенности на шине питания («земля») находится n -й 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 $U_{пст}$. Величину $U_{пст}$ можно оценить, пользуясь эквивалентной схемой (рис. 4.36).

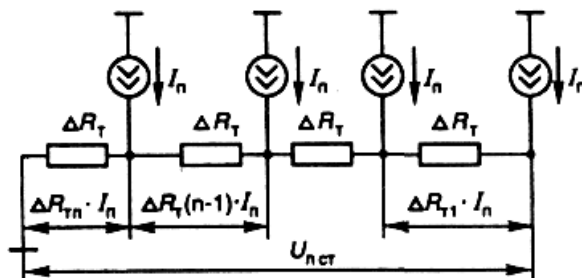


Рис. 4.36 – Схема замещения

Обозначая через R_τ сопротивление участка шины питания между двумя расположенными рядом элементами, а через I_Π — ток потребления одним элементом, получим:

$$\begin{aligned} U_{пст} &= \Delta R_\tau n I_\Pi + \Delta R_\tau (n-1) I_\Pi + \dots + \Delta R_\tau I_\Pi = \\ &= \Delta R_\tau I_\Pi [1 + 2 + \dots + (n-1) + n] = \Delta R_\tau I_\Pi n(n+1)/2. \end{aligned}$$

Если $U_{пст}$ — максимально допустимое значение статической помехи, то допустимое значение сопротивления шины питания будет определяться из

выражения

$$\Delta R_{\tau \text{ доп}} \leq 2U_{\text{пст}} / [I_{\text{п}} n(n+1)].$$

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 $U_{\text{пом,дин}}$, можно определить максимально допустимое значение индуктивности шины питания:

$$\Delta L_T \leq 2U\tau_{\text{ф}} / \Delta I_{\text{п}}(n+1)n,$$

где $\tau_{\text{ф}}$ — фронт импульсов переключения.

Индивидуальные сглаживающие конденсаторы (ИСК) устанавливают 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, 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 — $C_{\text{иск}}$ 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

$$C_{\text{иск}} > \Delta I_{\text{п}} \tau_{\text{ф}} / (2U_{\text{ип}}), \quad \Delta I_{\text{п}} = kI_{\text{к}},$$

где $\Delta I_{\text{п}}$ — максимальное значение переменной составляющей тока потребления;

$I_{\text{к}}$ — выходной ток короткого замыкания микросхемы;

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

$U_{\text{ип}}$ — 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

$$C_{\text{пит}} > 4L_{\text{пит}} / R_{\text{пит}}^2$$

где $L_{\text{пит}}$, $R_{\text{пит}}$ — индуктивность и сопротивление шин питания.

4.5. ВРЕМЕННАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

Одной из особенностей ЭВМ является нестабильность во времени некоторых характеристик в процессе эксплуатации, главным образом точности и чувствительности. Нестабильность показаний ЭВМ порождается многими причинами. С течением времени в деталях, сборочных единицах и отдельных элементах происходят необратимые процессы, что приводит к изменению их механических, физико-химических и электрических характеристик. При эксплуатации ЭВМ меняется структура магнитных сплавов, происходит гомогенизация за счет диффузии компонентов высокого электрического сопротивления, перераспределяются внутренние напряжения в деталях, возникающие из-за остаточных деформаций, возникают такие процессы, как рекристаллизация, полимеризация. Поэтому изменяются индукция и магнитный поток, сопротивление и ток, форма и масса отдельных деталей, момент сопротивления пружин и растяжек и многие другие характеристики элементов ЭВМ. Чтобы уменьшить зависимость характеристик ЭВМ от времени, необходимо выполнить мероприятия по стабилизации параметров отдельных его элементов. Наиболее сильное влияние оказывает на погрешность ЭВМ изменение свойств во времени таких элементов, как моментные пружины, постоянные магниты и резисторы.

Моментные пружины. Для повышения упругих свойств пружин и их стабилизации применяют механическое старение (для приборов класса точности 0,5 и выше). Оно заключается в циклическом закручивании и раскручивании пружин на угол, немного больше рабочего. Число циклов зависит от параметров пружины и колеблется в пределах 300—500. В результате механического старения деформация пружин уменьшается в 3—5 раз, улучшается стабильность упругих свойств.

Постоянные магниты. Для стабилизации магнитных свойств естественное магнитное и структурное старение заменяют искусственным ускоренным старением. Структурное старение магнитов из хромистой и вольфрамовой сталей выполняется нагреванием магнита при температуре около 100°C (например, в кипящей воде) в течение нескольких часов. Это

соответствует естественному старению в течение 15—20 лет.

Магнитное старение заключается в частичном размагничивании магнита с помощью переменного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой на 15—20%. Материалы с большой коэрцитивной силой обладают высоким постоянством магнитных свойств за счет неизменности структуры материала. Такие магниты подвергаются только магнитному старению.

Резисторы. Основными причинами нестабильности сопротивления резисторов и мест контактов с материалом выводов во времени, вызывающими погрешность приборов сопротивления, являются так называемые «вековые» изменения, происходящие в материале резистора.

Временные изменения представляют собой необратимые медленно затухающие физико-химические явления, которые связаны с процессом диффузии компонентов резистивного сплава, ростом окисных пленок и остаточными механическими напряжениями в материале, возникающими при намотке, вырубке, от давления эмалевого покрытия и т. п. Достаточно полно эти процессы изучены для манганина. Для уменьшения временных изменений резисторы подвергают искусственному и естественному старению. Наиболее быстро это протекает при температуре 400—500 °С. Чтобы предотвратить материал от окисления термообработку проводят в нейтральной среде. Так как при этой температуре интенсивно испаряется марганец, а также возникает неоднородность материала припоя выводов, то необходимо протравливать поверхностный слой.

Для каждого обмоточного материала типа изоляции при необходимой временной нестабильности существует свой вид термообработки, заключающийся в непрерывном или циклическом нагреве до определенной температуры в течение заданного времени. Чтобы уменьшить нестабильность, учитываются следующие особенности конструкции и технологии изготовления резисторов: обмотка на каркасе должна лежать без натяжения, подгонку производить только скребком вдоль провода, паять выводы припоем ПСр-45 с последующей очисткой от флюса, для предотвращения от окисления голого провода его поверхность покрывать лаком. Печатные резисторы из манганина проходят термообработку при температуре 40—60 °С и относительной влажности 90—98% в течение 60—100 часов.

Уменьшить временную нестабильность резисторов можно естественной выдержкой в течение нескольких месяцев до постановки их в прибор. Эти способы старения позволяют добиться нестабильности до 0,001% и менее за один год. Нестабильность сопротивления (а она для разных резисторов может отличаться как по размеру, так и по знаку) приводит к тому, что через некоторое время после проведения очередной проверки прибора полученные поправки становятся недостоверными. Получение резисторов с неизменяющимся сопротивлением во времени — задача чрезвычайно сложная, которая до некоторой степени может быть решена изготовлением резисторов из одного и того же материала в едином технологическом процессе (печатным способом). Хотя и здесь, несмотря на то, что разные резисторы выполнены на одной пластине, наблюдается их различная нестабильность.

5. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ВТ

5.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ САПР ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Внедрение в инженерную практику методов автоматизации проектирования позволяет перейти от традиционного макетирования разрабатываемой аппаратуры к ее моделированию с помощью персональных компьютеров (ПК). Более того, с помощью ПК возможно осуществить цикл сквозного проектирования, включающий в себя:

- а) синтез структуры и принципиальной схемы устройства;
- б) анализ его характеристик в различных режимах с учетом разброса параметров компонентов и наличия дестабилизирующих факторов и параметрическую оптимизацию;
- в) синтез топологии, включая размещение элементов на плате или кристалле и разводку между элементами соединений;
- г) верификацию топологии;
- д) проектирование конструкции изделия;
- е) выпуск конструкторской документации.

Структура и принципиальная схема большинства устройств в существенной степени зависят от области применения и задания на проектирование, что создает большие трудности при синтезе принципиальной схемы с помощью ЭВМ. Поэтому обычно первоначальный вариант схемы составляется инженером «вручную» с последующим моделированием и оптимизацией на ЭВМ.

Топология печатной платы (ПП) разрабатывается после завершения схемотехнического моделирования. На этом этапе осуществляется размещение элементов на ПП и трассировка соединений. Наиболее успешно разрабатываются ПП цифровых устройств, где вмешательство человека в процесс синтеза топологии сравнительно невелико. Разработка аналоговых устройств требует гораздо большего участия человека в процессе проектирования, коррекции и при необходимости в частичной переделке результатов автоматизированного проектирования.

Заключительным этапом разработки является верификация топологии. На нем проверяются соблюдение технологических норм, соответствие топологии исходной принципиальной схеме, а также рассчитываются электрические характеристики схемы с учетом паразитных параметров, присущих конкретной конструкции.

Приведем краткий анализ наиболее известных комплексов программ автоматизированного проектирования ПП на ПК типа IBM PC/AT. Один из самых простых пакетов программ конструкторского проектирования — пакет ARTWORK фирмы «Wintek Corp.», который включает в себя графический редактор двусторонней ПП, программу ручной и автоматической трассировки соединений и программу выдачи чертежей на плоттер. Большими функциональными возможностями обладает пакет OrCAD, в котором имеется графический редактор принципиальных схем и ПП, а также программы моделирования цифровых устройств и трассировки соединений (однако

программа автоматического размещения компонентов отсутствует). Привлекательность этому пакету придают удобный графический редактор и возможность перекодирования списка соединений схемы в форматы таких программ, как P-CAD, PSpice и др.

Одна из самых мощных систем автоматизированного проектирования на ПК — система P-CAD. В нее входят редакторы принципиальных схем и многослойных ПП, программы моделирования цифровых устройств, автоматического размещения компонентов на ПП и трассировки соединений, выдачи чертежей на принтер, плоттер, выдачи данных на сверлильные станки с ЧПУ, а также вспомогательные сервисные программы.

Система Personal Logican позволяет проектировать цифровые устройства, включая микропроцессоры, контроллеры и устройства памяти. Большие успехи достигнуты в создании САПР цифровых устройств на базе программируемых логических матриц (ПЛИС). Разработка ПЛИС возможна с помощью системы P-CAD и последних разработок. Начаты работы по автоматизации проектирования на ПК аналоговых и цифровых схем на базовых матричных кристаллах (БМК). Известны также комплексы программ CADdy, Micrograph, отечественные разработки «МАГИСТР-П», «Минск ПК», «ГРИФ», «ПРОТЕСК», «Сталкер/ПС» и ряд других. Особо следует выделить пакет машинной графики AutoCAD, с помощью которого можно доработать чертежи, создаваемые системой P-CAD, в соответствии с требованиями ЕСКД.

Система P-CAD за счет перехода к арифметике с плавающей запятой имеет на два порядка выше разрешающую способность графических редакторов, и практически сняты ограничения на размер и сложность печатной платы. Основное достоинство — повышение качества трассировки печатных плат за счет исправления ошибок в алгоритме оптимизации. Кроме того, введен ряд дополнений:

- а) в графический редактор печатных плат PCB Editor включены команды размещения компонентов;
- б) обеспечена возможность просмотра любого фрагмента платы в процессе автоматической трассировки;
- в) предусмотрена возможность автоматического нанесения размеров на чертежи.

Первое, что оценивает пользователь, касается графических редакторов:

- меню не исчезает после отпускания кнопки «мыши»;
- введены «горячие» клавиши, позволяющие одновременно работать на клавиатуре и с «мышью» двумя руками;
- выход в DOS возможен из всех приложений;
- введены шаблоны баз данных, загружающие в новую базу данных типичные параметры по умолчанию (шаг сетки и т. п.);
- разрешено редактировать ключевые слова атрибутов без изменения их содержания;
- повышена скорость вычерчивания экрана.

Система предусматривает установку P-CAD под управлением Windows (сам пакет P-CAD по-прежнему работает под управлением MS DOS) и имеет следующие существенные возможности:

а) утилита PC-WinPlot позволяет просматривать плот-файлы, выводить их на периферийные устройств средствами Windows и устанавливать физическую ширину линий, введенных в P-CAD линиями нулевой ширины;

б) программа автоматически создает файлы корпусов компонентов PC-PARTS на основе прототипов. Для этого символам компонентов с помощью атрибута GFP (Generic Footprint) присваивается имя корпуса-прототипа.

Программа rcparts.exe на основании информации, содержащейся в файлах списков связей (расширения .nit и .xnl), символов или схемы, составляет файлы конструктивов;

в) имеется эффективная автоматическая трассировка проводников;

г) команды изменяют ширину проводников Edit/Trace Width и типы компонентов Edit/Pin Type;

д) в редакторе таблиц апертур Aperture Table Editor допускается редактировать реперные знаки.

Пакет P-CAD поставляется на дискетах и на CD-ROM. На CD-ROM перенесена полная документация на P-CAD, просматриваемая в среде Acrobat Reader 2.0 (имеются версии для DOS, Windows и UNIX). Пакет P-CAD можно запускать непосредственно с CD-ROM.

5.2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ P-CAD

Фирма ACCEL Technologies выпускает два варианта системы P-CAD: Master Designer и Associate Designer. Оба варианта обеспечивают проектирование многослойных ПП, но различаются своими возможностями. Большими возможностями обладает вариант Master Designer (MD). Система поддерживает набор цветных графических дисплеев, принтеров, плоттеров, манипуляторов типа «мышь» и цифровых планшетов различных типов. Система настраивается на состав оборудования с помощью набора драйверов и позволяет выполнять следующие проектные операции:

а) создание символов элементов принципиальной электрической схемы и их физических образов - корпусов;

б) графический ввод принципиальной электрической схемы и конструирование печатных плат проектируемого устройства;

в) одно- и двустороннее размещение разногабаритных элементов с планарными и штыревыми выводами на поле ПП с печатными и навесными шинами питания;

г) ручную и автоматическую трассировку печатных проводников произвольной ширины в интерактивном режиме;

д) автоматизированный контроль результатов проектирования ПП на соответствие принципиальной электрической схеме и конструкторско-технологическим ограничениям;

е) автоматическую коррекцию электрической принципиальной схемы по результатам размещения элементов на ПП;

ж) полуавтоматическую корректировку разработанной ПП по изменениям, дополнительно внесенным в принципиальную электрическую схему;

з) выпуск чертежей принципиальных электрических схем и технологической информации для станков с ЧПУ.

Математическое моделирование устройств, работа с программируемыми интегральными схемами (ИС) выполняется с помощью пакетов программ, которые связаны с системой P-CAD.

Ограничения на объект проектирования

Максимальное количество компонентов	32000
Максимальное количество цепей	64000
Максимально допустимое число выводов	250000
Максимальный размер платы, мм	200x200
Максимальное число переходных отверстий	255
Максимальное число слоев трассировки	32

Программный комплекс P-CAD (таблица 5.1), образует систему сквозного проектирования ПП электронной аппаратуры.

З а м е ч а н и я :

1. После выбора какого-нибудь режима из управляющей оболочки автоматически вызывается одна или несколько программ системы. Все эти программы, а также те, которые не включены в управляющую оболочку, могут вызываться автономно с помощью командной строки DOS.

2. Названия программ выводятся в информационных сообщениях системы и используются при их загрузке средствами DOS.

С помощью системы P-CAD решаются следующие задачи.

Таблица 5.1 - Программный комплекс P-CAD

Режим	Программа	Назначение
ПРОГРАММЫ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ИЗ ОБОЛОЧКИ		
Schematic Editor	PC-CAPS (режим DETL)	Графический ввод и редактирование принципиальных электрических схем (создание файлов с расширением .sch)
Symbol Editor	PC-CAPS (режим SYMB)	Графический ввод и редактирование символов радиоэлектронных компонентов на принципиальных схемах (создание файлов с расширением .sym)
Component Editor	PC-COMP	Редактирование информации в текстовой форме о выводах компонентов
Package Schematic	PC-PACK	Составление базы данных ПП на основе списков электрических связей и перекрестных ссылок («упаковка» схемы в файл с расширением .pkg)
-	PC-NODES	Извлечение списка электрических связей из принципиальной схемы или ПП в виде двоичных файлов, имеющих расширение .nit или .pnl
-	PC-PARTS	Автоматическое создание файлов корпусов компонентов

Режим	Программа	Назначение
Netlist	NETLIST	Составление текстовых файлов списков соединений базы данных с расширениями .nde и .net (используется для связи с другими САПР)
Autorouter	PC-ROUTE	Автоматическая трассировка соединений
Electrical Rules Check	PC-ERC	Выявление ошибок в принципиальных схемах
Design Rules Check	PC-DRC	Контроль топологии спроектированной ПП на соответствие конструкторско-технологическим ограничениям
Netlist Conversion	PC-NLT	Составление упакованного файла базы данных ПП путем преобразования текстового файла с расширением .alt, содержащего перечень корпусов и таблицу электрических соединений
Engineering Change Order	PC-ECO	Автоматическая коррекция электрической принципиальной схемы по результатам проектирования ПП
	PC-CPR	Сравнение /анализ баз данных
	PC-UPD	Автоматическое внесение изменений в базы данных
	PC-BACK	Внесение изменений в схему после перестановок компонентов или секций на плате
Report Generator	PC-FORM	Составление текстовых файлов отчетов проекта
Auto-Insertion	PC-INSERT	Создание управляющих файлов для оборудования автоматического монтажа ПП
Hardcopy		Вывод чертежей на принтеры, плоттеры
	PC-PRINT	Создание управляющего файла для вывода чертежа электрической принципиальной схемы или топологии ПП на принтер
	PC-PLOTS	Создание управляющего файла для вывода чертежа электрической принципиальной схемы или топологии ПП на плоттер
	PC-PHOTO	Создание управляющего файла для изготовления фотошаблонов на фотоплоттере
Drill	PC-DRILL	Составление файлов координат отверстий ПП для управления сверлильными станками с ЧПУ и вывод на перфоленту
DXF File Writer	DXFOUT	Преобразование PCB-файла в формат DXF программы AutoCAD
DXF File Reader	DXFIN	Преобразование файлов программы AutoCAD формата DXF в PCB-файл

Режим	Программа	Назначение
PDIF File Reader	PDIFIN	Преобразование текстового файла с расширением .pdf в двоичный файл
Circuit Writer SPICE	NX-SPICE	Преобразование файла электрических связей .nit, составленного программой PC- NODES, в текстовый файл с заданием на моделирование на входном языке программы Pspice (в файле с расширением .cir)
ПРОГРАММЫ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ СРЕДСТВАМИ DOS		
	MD5TO6	Преобразование файлов символов и библиотечных файлов из 16-разрядного формата в 32-разрядный формат
	PDIFOUT4	Преобразование файлов с расширением .sym, .sch, .pit, .ps и .pcb формата системы 4.xx в текстовые файлы .pdf
	PDIFOUTS	Преобразование двоичных файлов с расширением .sym, .sch, .prt, .ps и .pcb формата систем 5.xx и 4.xx в текстовые файлы .pdf
	TBL5TO6	Преобразование файлов таблиц инструментов для станка в формат P-CAD
	XRGEN	Составление текстового FIL-файла перекрестных ссылок по двоичному файлу электрических связей (удобно использовать, когда SYM-файлы символов и PRT-файлы корпусов компонентов имеют разные имена)
	PLT6TO5	Преобразование PLT-файлов P-CAD в формат файлов таблиц инструментов для сверлильного станка
ПРОГРАММЫ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ СРЕДСТВАМИ WINDOWS		
	PC-WinPlot	Просмотр файлов .plt и вывод на периферийные устройства средствами Windows
	Acrobat Reader	Просмотр и вывод на печать документации на P-CAD

На стадии функционального проектирования:

- а) создание библиотеки графических изображений символов компонентов;
- б) формирование схемы электрической принципиальной;
- в) анализ ошибок в схеме электрической принципиальной;
- г) выпуск схемы электрической принципиальной.

На стадии конструкторского проектирования:

- а) создание библиотеки конструктивов корпусов компонентов; упаковка вентилей по корпусам, построение базы данных печатной платы (БДПП);
- б) интерактивное и (или) автоматическое размещение элементов на

плате;

в) интерактивная и (или) автоматическая трассировка электрических соединений;

г) выпуск эскиза размещения элементов на плате (контур платы с упрощенным изображением) и эскизов трассировки слоев;

д) подготовка данных для получения фотошаблонов на фотоплоттере.

Процесс проектирования ПП состоит из нескольких этапов. На каждом из них используются отдельные программы системы P-CAD, взаимосвязь которых показана на рисунке 5.1.

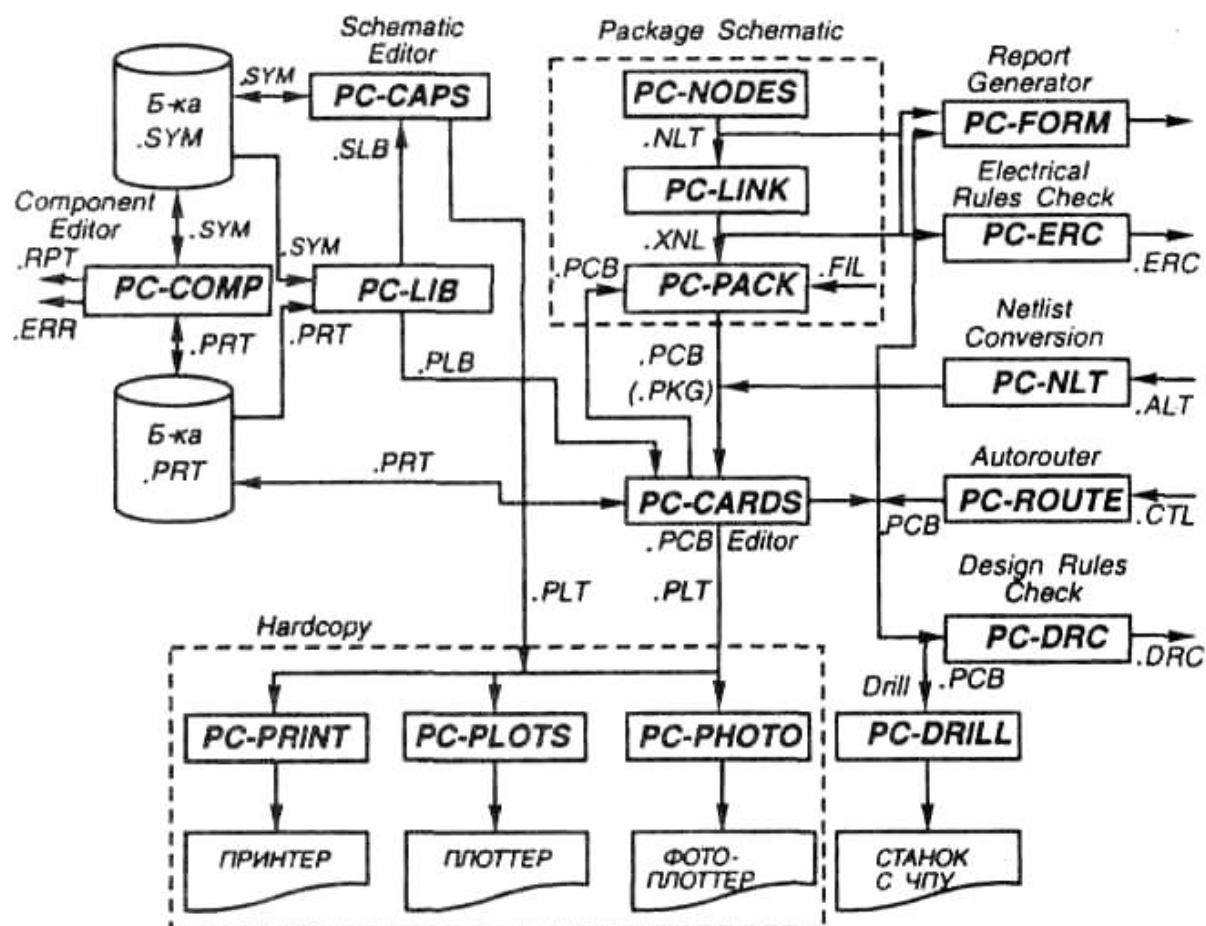


Рис. 5.1. Структурная схема системы P-CAD 8.5

Этап 0. Перед началом разработки ПП должны быть созданы библиотеки символов компонентов электронной аппаратуры для создания принципиальных электрических схем (в файлах с расширением **.sym**) с помощью программы Symbol Editor, библиотеки их конструктивов (в файлах **.prt**) и стеков (этажерок) контактных площадок (в файлах **.ps**) с помощью программы Part Editor. Файлы отдельных компонентов целесообразно объединить в библиотечные файлы **.slb** и **.plb** с помощью программы Library Maintenance.

Этап 1. Создание базы данных принципиальной электрической схемы с помощью Schematic Editor (в файле с расширением имени **.sch**) и проверка схемы с помощью Electrical Rules Check.

Этап 2. Схемотехническое моделирование с помощью программ Design Center, Viewlogic и др.

Этап 3. Создание файла базы данных ПП в автоматическом режиме (имеющего расширение .psb или .pkg) двумя способами:

1) на основании информации, содержащейся в файлах списков соединений, составленных по принципиальной электрической схеме (.nlt или .xnl), и файле перекрестных ссылок .fil, а также файла конструктива ПП .psb;

2) на основе текстового файла с расширением .alt, в котором пользователь описывает состав проектируемой ПП (при этом чертеж принципиальной схемы не создается). Такой способ применяется крайне редко.

Этап 4. Размещение компонентов на ПП вручную, автоматически с помощью графического редактора PCB Editor. В последних двух случаях можно (но не обязательно) предварительно вручную расставить компоненты на ПП и трассировать шины питания и «земли».

Этап 5. Трассировка соединений с помощью программы Autorouter или вручную с помощью программы PCB Editor.

Этап 6. Работа со вспомогательными программами (утилитами) для верификации ПП, сопоставления чертежей принципиальных электрических схем и ПП и внесения в них изменений, выпуска текстовых отчетов.

Этап 7. Выпуск конструкторско-технологической документации.

5.3. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С СИСТЕМОЙ P-CAD

Система MD может быть установлена на ПК, совместимых с IBM PC (таблица 5.2). Рекомендуются установить плату видеоадаптера. При использовании видеоплаты для работы в режимах с разрешением более высоким, чем 640x480, необходимо наличие драйвера для системы P-CAD к конкретной плате.

Сейчас поставляется один универсальный драйвер для работы с любыми режимами разрешения. При разработке ПП большого размера, многослойных, с мелкой сеткой трассировки и т. д. рекомендуется установить память не менее 16 Мбайт. На жестком диске программы MD занимают объем 28 Мбайт, библиотеки символов и корпусов занимают еще 32 Мбайт.

Таблица 5.2. Минимальные требования к ПК

Наименование требований	Объем
Объем оперативной памяти	4 Мбайт — работа со схемами 8 Мбайт — работа с ПП 12 Мбайт — автотрассировка
Манипулятор «мышь»	Трехкнопочный
Свободное пространство на жестком диске	60 Мбайт
Сопроцессор	Обязателен

Для различных периферийных устройств система имеет ряд драйверов:

1) Драйверы собственно компьютера. MD имеет два драйвера для компьютеров — sibmpc.drv и sibnpsc2.drv. Эти драйверы могут работать только при наличии в компьютере порта RS-232. Драйвер sibnpsc2.drv используется для компьютеров с «мышью» Logitec C9.

2) Драйверы дисплея и «мыши» (во всех допустимых случаях рекомендуется использовать драйвер дисплея, работающий в защищенном

режиме, так как с таким драйвером система работает значительно быстрее).

3) Драйверы устройств печати, встроенные в программу вывода. Графический интерфейс системы P-CAD 8.5 ориентирован на использование манипулятора «мышь» и клавиатуры.

Манипулятор «мышь». Вызываемая при нажатии кнопки «мыши» операция зависит от того, в какой зоне окна находится курсор «мыши», и от того, какая кнопка нажимается. Манипулятор «мышь» выполняет следующие операции. Выбор пункта меню или объекта — кратковременное нажатие (щелчок) левой кнопки (кнопки 1) «мыши». В графических редакторах некоторые команды имеют подменю, разворачивающиеся после нажатия левой кнопки; выбор команды подменю производится аналогично. Отмена выбора или прерывание операции — нажатие правой кнопки (кнопки 2) «мыши».

Клавиатура. В системе P-CAD 8.5 используются алфавитно-цифровые клавиши для ввода данных, функциональные клавиши F1—F10 для выполнения определенных команд и клавиши стрелок для перемещения курсора (клавиши Home, PgUp, End и PgDn перемещают курсор по диагонали).

Панели управления. Пункты управляющей оболочки и меню отдельных программ заключены в прямоугольные рамки. Они могут быть помечены ромбом или прямоугольником, иметь в конце двоеточие или многоточие. Пункты меню выбираются с помощью курсора.

Запуск управляющей оболочки системы P-CAD производится из каталога P-CAD с помощью командного файла pcad85.bat вида:

```
@echo off  
pcad.exe.
```

После вызова системы P-CAD 8.5 на экран выводится ее основное меню (рисунок 5.2). Список имен проектов (Design), принципиальных схем (Schematic Sheet) и печатных плат (PCB Layout) размещается в трех окнах нижней части экрана. Имена текущего проекта, схемы и печатной платы помечаются светящимися курсорами.

В верхней части экрана указаны заголовки 5 разделов:

Design Manager — администратор системы;

Schematic Tools — создание электрических принципиальных схем;

PCB Tools — разработка плат печатного монтажа;

Library Manager — администратор библиотек;

Interfaces — интерфейсы с другими программами и периферийным оборудованием.

В нижней части экрана расположены три панели:

Report Editor — редактирование текстовых файлов с помощью внешнего редактора;

DOS Shell — выход в DOS;

QUIT — завершение работы с P-CAD.

Для выбора раздела производится щелчок «мышью» в заголовке, и в средней части экрана выводится список режимов раздела.

Проектирование ПП начинается с создания ее принципиальной схемы в режиме Schematic Tools:

1) В разделе Design Manager (пункт Design Maintenance) создать новый

каталог и определить имена баз данных принципиальной схемы (печатной платы).

2) Задать имена библиотек символов компонентов, входящих в состав схемы, и маршруты доступа к ним в разделе Library Manager (Set Libs & Search Path).

3) Создать отсутствующие в библиотеке символы компонентов в режиме Symbol Editor раздела Library Manager.

4) Настроить конфигурацию редактора в режиме Editor Configuration раздела Schematic Tools.

Вызов графического редактора принципиальных схем Schematic Editor выполняется в разделе Schematic Tools, где выбирается курсором имя файла схемы, независимо от того, какой раздел оболочки активизирован. Для вызова редактора символов Symbol Editor необходимо перейти в раздел Library Manager и выбрать раздел Symbol Editor. Кроме этого, эти графические редакторы вызываются с помощью командной строки:

rsccaps [-h] [«имя файла»] [@ «имя командного файла» [x, y]],

где [] — необязательные параметры;

«имя файла» — имя файла данных с расширением или подлежащего загрузке;

«имя командного файла» — имя командного макрофайла со списком команд для выполнения;

@ — признак командного файла;

x, y — координаты, с которыми запускается командный файл.

После загрузки графического редактора экран дисплея форматируется и разбивается на несколько зон. Окно построения чертежа может быть размечено координатной сеткой, если она включена. Зона меню команд, предназначенная для команд графического редактора, расположена справа от окна и внизу под ним. Команды выбираются щелчком левой кнопки «мыши». Расположенные справа команды имеют подкоманды, список которых выводится на экран после выбора основной команды. Строка сообщений располагается ниже горизонтальной строки команд. В нее вводятся запросы значений различных числовых и текстовых параметров, а также сообщения об ошибках. На двух нижних строках выводится информация о текущих параметрах активной команды, значение которой можно изменять щелчками «мыши» и вводом новых числовых значений по дополнительным запросам системы.

Построение чертежа выполняется с помощью манипулятора «мышь». При перемещении «мыши» по рабочей поверхности стола на экране дисплея синхронно перемещается курсор в виде креста. Левая кнопка «мыши» предназначена для выбора команды или местоположения курсора на экране. Правая кнопка «мыши» служит для отмены команды или предыдущего режима выбора в сложных командах. Левую кнопку мыши дублирует клавиша [пробел] или [Enter], правую — [Esc].

Координатная сетка на экране упрощает процесс построения чертежа и повышает точность позиционирования. Шаг координатной сетки, координаты курсора в области построения чертежа, толщина линий и высота выводимого текста измеряются в условных единицах базы данных DBU. В системе P-CAD

используются две системы единиц: английская (English unit) и метрическая (metric unit).

В английской системе мер все размеры указываются в единицах базы данных, которая равна 0,01 дюйма или 0,254 мм. В метрической системе координаты курсора на экране, ширина линии и высота текста указываются в миллиметрах, а при настройке конфигурации и в сообщениях об ошибках размеры даны в единицах, равных 0,01 мм. При вызове графического редактора без загрузки файла схемы или символа устанавливается английская система единиц, переход в метрическую систему выполняется по команде Environment/Change Units. При загрузке существующей базы данных автоматически устанавливается система единиц, в которой она создана.

Шаг координатной сетки по осям X и Y показан в поле Grd. Текущие координаты курсора указываются в поле XY. Размер фрагмента чертежа, выводимого на экран дисплея, зависит от масштаба изображения, устанавливаемого командами Zoom In, Zoom Out, View Window.

Создание базы данных принципиальной электрической схемы выполняется в режиме Schematic Tools/ Schematic Editor. Перед вызовом схемного редактора следует в разделе Library Manager/Set Libs & Search Patch указать маршруты поиска отдельных файлов символов компонентов и библиотек символов (имена библиотечных файлов). В первой строке меню выбирается режим задания маршрутов к отдельным символам и их библиотекам Schematic Symbols (.sym). Во второй строке — режим редактирования маршрутов Edit Current Libs & Search Patch. Перечень маршрутов к каталогам, где находятся разрозненные файлы и их библиотеки, указывается в пункте Search Paths по команде ADD, имена библиотечных файлов — в пункте Libraries.

На поле чертежа символы компонентов размещаются по команде Enter/Component. На запрос

Enter component name,

вводится имя файла символа или выбирается из списка символов по команде PICKLIST. Затем нажатием левой клавиши «мыши» выбирается на экране место для символа. Если символ создан в другой системе единиц, то в ответ на запрос о преобразовании единиц необходимо ответить Yes.

Ввод электрических связей осуществляется по командам Enter/Wire (Edit/Wire) после размещения символов компонентов. Параметры команды устанавливаются в нижней части экрана. По запросу Select start point указывается начальная точка цепи, которая фиксируется нажатием левой клавиши «мыши». Следующие точки указываются по запросу Select next point тем же способом. Ввод цепи заканчивается нажатием правой клавиши «мыши». Если конечная точка выбрана на уже существующей цепи, то система запросит подтверждение их соединений.

Для создания ПП по принципиальной схеме необходимо войти в раздел Schematic Tools и запустить программу упаковки базы данных, нажав кнопку Package Schematic. Эта программа предназначена для передачи корпусов микросхем на ПП, а также связей между ними.

Далее запускается PCB Editor путем двойного нажатия на полученный

файл в главном меню. Включается режим просмотра слоев, для этого нажимается кнопка View Layer в нижнем ряду, затем атрибут слоя BRDOUT ставится в ABL. Выполняется режим редактирования. Вокруг корпусов элементов вычерчиваются края ПП: в меню выбирается Draw/Rectangle, указываются 1-й угол и 2-й угол.

Корпуса элементов будут размещены автоматически после упаковки базы данных ПП, но их можно перемещать по своему усмотрению, выбрав в меню Move/Objet. Сохраняются изменения File/Save и выполняется выход из PCB Editor. Подготовка ПП для трассировки завершена.

Программа автоматической трассировки вызывается с помощью управляющей оболочки в режиме PCB Tools/Autorouter и на экран выводится ее основное меню. При наличии ошибок и выдачи информационного сообщения об ошибке управление передается в основное меню системы. Информация об ошибке помещается в файл отчета о трассировке с расширением имени .ger.

ЧАСТЬ 2

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Во второй части рассмотрены основы построения систем автоматизированного проектирования вычислительных машин, описаны математические модели функционально-логического этапа проектирования, предложены критерии оптимальности на разных этапах проектирования, различные алгоритмы компоновки элементов в системе, их размещения и трассировки по критерию минимума межблочной связности.

1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ САПР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

1.1. НЕОБХОДИМОСТЬ СОЗДАНИЯ САПР

Основными причинами создания автоматизированных систем проектирования являются:

Разрозненность отдельных методов автоматизации (подготовка документации, чертежей, моделирование технических систем, оптимизация параметров, организация экспертиз, обработка результатов, принятие решений при многокритериальной постановке задач), отсутствие методологического единства, не позволяющие создать эффективную систему проектирования.

Выполнение большого объема работ в сжатые сроки.

Повышение требований к качеству проектов (изделий, машин и механизмов).

Удовлетворить эти противоречивые требования с помощью простого увеличения численности проектировщиков нельзя, так как возможность параллельного проведения проектных работ ограничена.

Цель САПР — это повышение качества проектов, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и ликвидация тенденции к росту числа проектировщиков, а также повышение производительности их труда.

Для САПР характерно системное использование ЭВМ при рациональном распределении функций между человеком и ЭВМ. С помощью ЭВМ решаются задачи, поддающиеся формализации (решение системы уравнений).

Предметом САПР являются формализация проектных процедур, структурирование и типизация процессов проектирования, постановка, модели, методы и алгоритмы решения проектных задач, способы построения технических средств, создания языков, описания программ, банков данных, а также вопросы их объединения в единую проектирующую систему.

Для создания САПР необходимы: 1) совершенствование проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники; 2) автоматизация процесса поиска, обработки и выдачи информации; 3) использование методов оптимизации и многовариантного проектирования; применение математических моделей проектируемых объектов; 4) создание банков данных, содержащих сведения справочного характера; 5) повышение качества оформления проектной документации; 6) увеличение творческой доли

труда проектировщиков за счет автоматизации нетворческих работ; 7) унификация и стандартизация методов проектирования; 8) подготовка и переподготовка специалистов в области САПР; 9) взаимодействие САПР с автоматизированными системами различного уровня.

1.2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САПР

САПР — это комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с проектными организациями (пользователями системы). САПР включает технические средства, математическое и программное обеспечение, информационное обеспечение, лингвистическое обеспечение (специальные языки, проблемно-ориентированные).

При создании САПР учитываются принципы:

- *системного единства*, т. е. целостность системы, взаимосвязь между подсистемами и ее элементами;
- *совместимости*, т. е. обеспечиваются совместное функционирование составных частей САПР и сохранность открытости системы в целом;
- *типизации* (ориентирует на преимущественное создание и использование типовых и унифицированных элементов САПР с последующей их модернизацией);
- *развития* (способствует совершенствованию и обновлению составных частей САПР, а также взаимодействие и расширение взаимосвязи с автоматизированными системами различного уровня и функционального назначения);
- *иерархичности* (проектирование по уровням структуры САПР).

1.3. ВИДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР

Обеспечение САПР имеет несколько видов: математическое, программное, информационное, техническое, лингвистическое, методическое, организационное.

1. *Математическое обеспечение* включает в себя алгоритмы, по которым разрабатывается программное обеспечение; функциональные модели проектируемых объектов; методы численного решения задач; методы поиска экстремума. МО САПР делится на:

- математические методы и построение на их основе математических моделей объектов проектирования;
- формализованное описание технологии автоматизированного проектирования;
- МО должно описывать во взаимосвязи объект, процесс и средства автоматизации проектирования.

2. *Программное обеспечение* — это совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. ПО делится на общесистемное и специальное (прикладное).

Общесистемное ПО создано для организации функционирования технических средств, т. е. планирования и управления вычислительным процессом, распределения имеющихся ресурсов. Общесистемное ПО близко по

назначению к операционным системам.

Специальное ПО реализует математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур.

Специальное ПО, или прикладное ПО, имеет форму ППП.

Уровни программного обеспечения: машинный код, язык Ассемблера, языки высокого уровня (рис. 1.1).

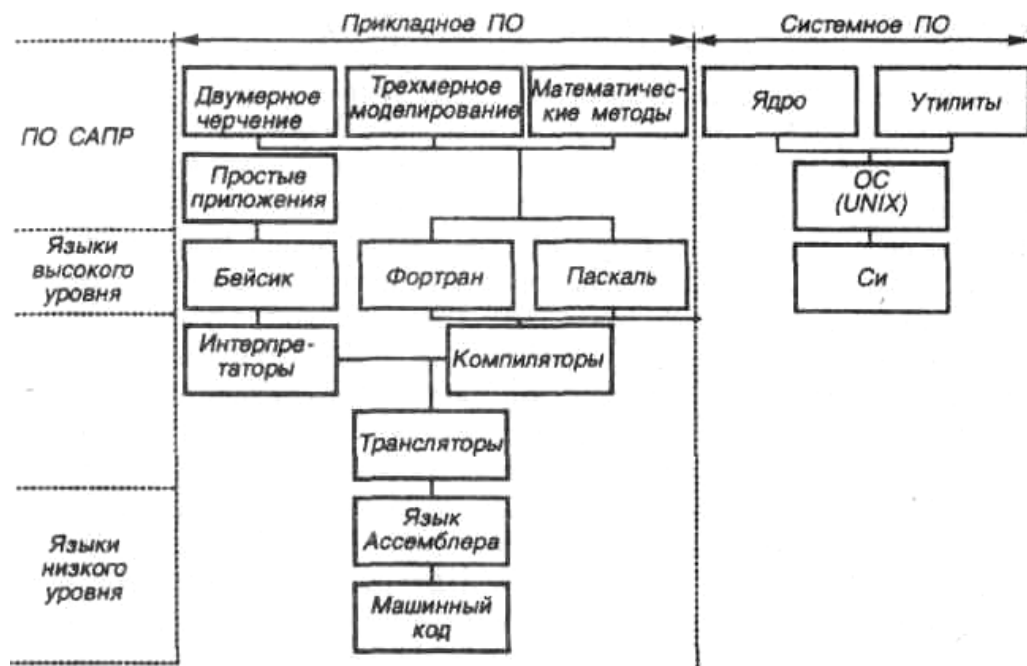


Рис.1.1 – Иерархическая структура ПО

3. *Информационное обеспечение* — это такие данные, которыми пользуется проектировщик в процессе проектирования для выработки проектного решения. Это справочные данные о комплектующих изделиях, типовых проектных решениях, параметрах элементов, сведения о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений, структур и параметров проектируемых объектов. Совокупность данных, используемых в САПР, составляет информационный фонд. Основная функция ИО — это ведение фонда, обновление, сохранение и организация доступа к данным.

В состав ИО САПР входят:

- программные модули;
- исходные и результирующие данные для программных модулей;
- нормативно-справочная проектная документация, государственные и отраслевые стандарты, руководящие материалы и указания, типовые проектные решения, текущая проектная документация, отражающая ход и состояние выполнения проекта.

Различают следующие способы ведения ИО САПР:

- использование файловой системы;
- построение библиотек;
- использование БД;
- создание информационных программ адаптеров.

Применение файловой системы и построение библиотек широко

распространено, так как поддерживается средствами операционной системы. Эти способы применяют при хранении программных модулей, диалоговых сценариев поддержки процесса проектирования, вводе крупных масштабов исходных данных, хранении текстовых документов. Однако они мало пригодны при оперативной обработке справочных данных.

Лингвистические средства системы управления базами данных изменяются от языков программирования до языков, ориентированных на конкретного пользователя.

Основные функции СУБД:

- создание схемы базы данных;
- организация хранения данных;
- защита целостности БД;
- поддержание загрузки БД;
- предоставление пользователям доступа к БД.

Создание информационных программ адаптеров — для организации межмодульного интерфейса. В САПР, программы которых оперируют с большим числом данных (входных, промежуточных, результирующих), области обмена удобно организовать в виде некоторого банка данных. Это позволяет часть функций, выполняемых адаптером, возложить на СУБД, что в итоге сокращает время на разработку информационного и программного обеспечения. Адаптер выполняет совокупность операций по организации информационного взаимодействия между программными модулями.

Техническое обеспечение САПР. Традиционное проектирование занимает 15% вычислительных операций. Для САПР необходимы специализированные средства, в основном это автоматизированное рабочее место (АРМ). АРМ — для решения сложных проектных задач в автономном режиме (для трех- и двухмерного представления объектов проектирования), инвариантные к различным видам объектов проектирования и для решения типовых инженерных, конструкторских и технологических задач.

Лингвистическое обеспечение САПР, основу которого составляют специальные языковые средства (языки проектирования), предназначенные для описания процедур автоматизированного проектирования и проектных решений. Проблемно-ориентированные языки — это Фортран, Си и др. Для решения геометрических задач инженерного типа ПОЯ соединяют в себе средства алгоритмического языка для решения математических задач и специальные языковые средства моделирования геометрических объектов. Создаются ПОЯ по соответствующим областям применения (строительство, электроника и т. д.). Но чрезмерное разнообразие языков затрудняет обмен средствами САПР между предприятиями. Развитие гибких производственных систем требует тщательного решения вопросов по составу лингвистического обеспечения.

Методическое обеспечение САПР — это входящие в ее состав документы, регламентирующие порядок эксплуатации системы, носят характер инструкций.

Организационное обеспечение САПР — положения, приказы, штатное расписание, квалификационные требования, регламентирующие

организационную структуру подразделений с комплексом средств автоматизированного проектирования.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ САПР

САПР характеризуют следующие признаки:

- тип, разновидность, сложность объекта проектирования;
- уровень, комплексность автоматизации проектирования;
- характер, число выпускаемых проектных документов;
- число уровней в структуре технического обеспечения САПР.

Три первых признака отражают особенности объектов проектирования, следующие четыре — возможности систем, восьмой признак — особенности технической базы САПР.

Тип объекта проектирования. ГОСТ предусматривает деление САПР на группы: 1. САПР изделий машиностроения. 2. САПР изделий приборостроения. 3. САПР технологических процессов в машино- и приборостроении. 4. САПР программных изделий. 5. САПР организационных систем.

Разновидность объектов проектирования. ГОСТ требует указания обозначений на объекты проектирования и кодирования в соответствии с системой обозначения документации на объекты, проектируемые САПР.

Сложность объектов проектирования: 1) простые — с числом составных частей до 10^2 ; 2) средние — до 10^3 ; 3) сложные — до 10^4 ; 4) очень сложные — до 10^5 ; 5) самые сложные — свыше 10^6 .

Составной частью объекта проектирования, представляющего технический комплекс, является деталь (микросхема).

Уровень автоматизации проектирования: 1) низкоавтоматизированный — до 25% проектных процедур; 2) среднеавтоматизированный — до 50% ; 3) высокоавтоматизированный — свыше 50%.

Чтобы отнести САПР к третьей группе, в ней должны быть использованы методы многовариантного оптимального проектирования.

Комплексность автоматизации проектирования: 1) одноэтапные; 2) многоэтапные; 3) комплексные, т. е. автоматизация всех этапов проектирования.

Число уровней в структуре технического обеспечения:

Одноуровневые комплексы технических средств — ЭВМ среднего класса: программная обработка данных, хранение их на основе штатного набора периферийных устройств, где единая мониторная система, банк данных и пакет прикладных программ. Терминальные микроЭВМ совместимы с основной (центральной) ЭВМ и служат либо для подготовки задач к решению на основной ЭВМ, либо для решения простых задач с помощью тех же программных и информационных средств.

Двухуровневые КТС имеют радиальную или кольцевую структуру (вычислительная сеть). В такой САПР функции мониторной системы и СУБД распределены по узлам вычислительной сети.

Трехуровневые САПР помимо двухуровневого КТС включают чертежные автоматы, комплексы для контроля программ к станкам с числовым программным управлением.

1.5. СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Стадии проектирования — это проектные исследования, технические задания, техническое предложение, эскизного, технического и рабочего проектов, испытаний и внедрения.

Стадия научно-исследовательской работы определяет назначение, принципы построения (создания) ЭВМ и формирует техническое задание на его проектирование.

На стадии эскизного проекта проверяется корректность и реализуемость основных принципов и положений, определяющих функционирование будущей ЭВМ, и создается эскизный проект.

На стадии технического проекта ведется всесторонняя проработка всех частей проекта, конкретизация и детализация технических решений.

На стадиях рабочего проекта, испытаний и внедрений формируется вся необходимая документация для изготовления изделия. Далее создается и испытывается опытный образец или пробная партия изделий, по результатам испытаний вносятся необходимые коррективы в проектную документацию, затем — внедрение в производство.

1.6. СПОСОБЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Способ организации процесса проектирования заключается в создании модели процесса проектирования, основанной на концепции управления.

Первый вариант модели — это схема процесса проектирования (рис. 1.2), включает в себя:

- цель проектирования, которая неизменна;
- знания технологии определенного типа для создания проекта;
- информацию (проект), которая может быть документирована и использована для производства тем или иным способом в процессе проектирования.



Рис. 1.2 – Схема процесса проектирования

Второй вариант — это модель процесса производства (рис. 1.3). Если цель не достигнута, то проектные решения корректируются. Данные об отклонении предварительного проекта от спецификации передаются к операции синтеза. В среде проектирования находятся вычислительные средства, методическое обеспечение, сам проектировщик.

Проектные процедуры подразделяются на задачи анализа и синтеза. Синтез заключается в создании описания вычислительной системы, а анализ — в определении свойств и исследовании работоспособности объекта по его описанию, т. е. при синтезе создаются, а при анализе оцениваются проекты ВС (рис. 1.4).

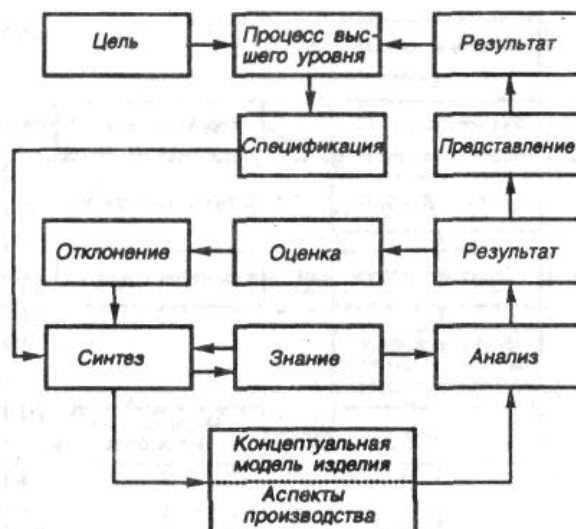


Рис. 1.3 – Модель процесса производства

Процедуры анализа могут быть одновариантные и многовариантные. *Одновариантный анализ* предполагает задание значений внутренних и внешних параметров и определение значений выходных параметров объекта. Задача анализа с одним вариантом сводится к однократному решению уравнений, составляющих математическую модель. *Многовариантный анализ* заключается в исследовании свойств ВС в некоторой области пространства внутренних параметров. Такой анализ требует многократного решения систем уравнений.



Рис. 1.4. Схема проектных процедур

Рис. 1.4 – Схема проектных процедур

Процедуры синтеза — параметрические и структурные. Целью *структурного синтеза* является определение структуры ВС перечня типов элементов, составляющих ВС, и способа связи элементов (оборудования) между собой в составе ВС. *Параметрический синтез* заключается в определении числовых значений параметров элементов при заданных значениях структуры и условиях работоспособности на выходные параметры

объекта, т. е. при параметрическом синтезе необходимо определить точку или область в пространстве внутренних параметров, в которых выполняются те или иные условия.

На рис. 1.5 представлена последовательность этапов нисходящего проектирования. Проектирование ВС начинается с синтеза исходного варианта ее структуры. Для оценки этого варианта создается модель: математическая, экспериментальная или стенд. После выбора исходных значений параметров элементов выполняется анализ вариантов, по результатам которого становится возможной его оценка. Оценка заключается в проверке выполнения работоспособности ВС. Если решение неудовлетворительное, то выбирается один из возможных путей улучшения проекта. Чаще изменяют числовые значения параметров элементов. Совокупность процедур модификации параметров, анализ и оценка результатов анализа — *параметрический синтез*. Если ведется поиск наилучшего значения показателя качества, то процедура параметрического синтеза является процедурой *оптимизации*. Если путем параметрического синтеза не достигаются необходимые условия работоспособности, то модифицируют структуру ВС.

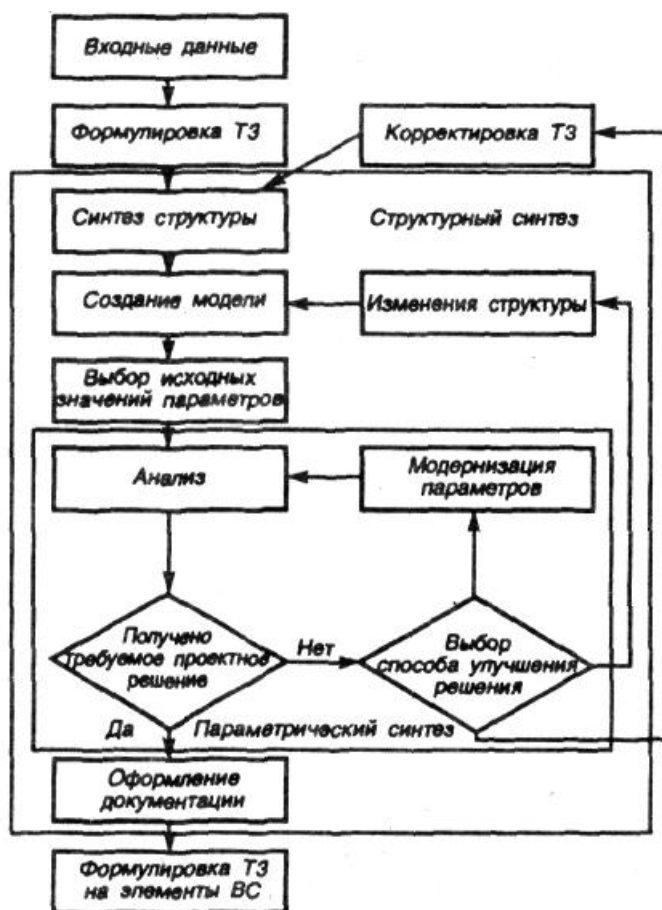


Рис. 1.5 – Схема процесса проектирования ВС

Новый вариант структуры синтезируется, и для него повторяются процедуры формирования модели и параметрического синтеза. Если решения нет, то корректируется ТЗ, что обуславливает итерационный характер проектирования. Взаимосвязь проектных процедур анализа и синтеза имеет характер вложенности (рис. 1.6).

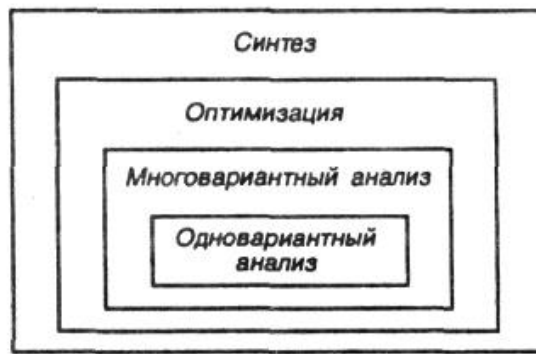


Рис. 1.6. Взаимосвязь проектных процедур

Рассмотрим последовательность этапов проектирования, т. е. маршрут проектирования СБИС (рис. 1.7). На этапе 1 выполняется синтез схемы, ее анализ с учетом предполагаемых задержек распространения сигналов в элементах. На этапе 2 осуществляется синтез принципиальных схем фрагментов СБИС, считавшихся на этапе 1 элементами. Синтез ведется на основе просмотра нескольких структур и ориентировочной оценки этих вариантов. Параллельно включается этап 7, где проектируются компоненты схемы, т. е. синтезируется физическая и топологическая структура элементов и выбирается технология изготовления СБИС.



Рис. 1.7 – Маршрут проектирования СБИС

На этапе 3 исходными данными являются:

- 1) Варианты структуры принципиальных схем, отобранных на этапе два.
- 2) Характеристика и значения электрических параметров части компонентов, полученные на этапе 7.

Часть параметров элементов варьируется на этапе 3 с целью их оптимизации, проверяется работоспособность схем в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов. На этапе 4 синтезируется топология микросхемы, т. е. конфигурация, взаимное расположение компонентов и их соединения в полупроводниковом кристалле. Сведения о ранее спроектированной топологии отдельных компонентов поступают от этапа 7. На

этапе 5 проверяется соответствие топологии исходной принципиальной электрической схеме и соблюдение конструкторско-технологических проектных норм. На этапе 6 создаются фотошаблоны, которые содержат в себе информацию о топологии и будут использоваться в процессе изготовления СБИС. После выполнения этапов 4—6 результаты уточняются, т. е. возможен возврат к этапам 1 и 3.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Математическое обеспечение включает в себя математические модели (ММ). Основные требования к математическим моделям:

- *универсальность* характеризует полноту отображения в модели свойств реальной ВС (например, ММ резистора в виде уравнений закона Ома характеризует свойство резистора пропускать электрический ток, но не отражает показатели резистора как детали: его цвет, механическую прочность, стоимость и т. п.);

- *точность* ММ оценивается степенью совпадения значений параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью оцениваемой ММ. Допустим, в ММ свойства оцениваются вектором входных параметров $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$. Тогда, обозначив истинное и рассчитанное с помощью ММ значение j -го выходного параметра через $y_{j\text{ист}}$ и $y_{j\text{ММ}}$, соответственно определим относительную погрешность ε_j расчета параметра y_j как $\varepsilon_j = (y_{j\text{ММ}} - y_{j\text{ист}}) / y_{j\text{ист}}$. Получена векторная оценка $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$. Для скалярной величины используется выражение $\varepsilon_m = |\varepsilon| = \max \varepsilon_j$, при $j \in [1:m]$;

- *адекватность* ММ — способность отображать заданные свойства объекта с погрешностью не выше заданной. Адекватность модели имеет место в ограниченной области изменения вектора внешних переменных Q тогда области адекватности (ОА) математической модели определяются по формуле

$$OA = \{Q / \varepsilon_M \leq \delta\},$$

где $\delta < 0$ — заданная константа, равная предельно допустимой погрешности модели;

- *экономичность* ММ характеризуется затратами вычислительных ресурсов (машинное время и память; размерность ММ, количество параметров).

Классификация ММ:

- 1) *аналитические* (в виде уравнений);
- 2) *алгоритмические* (выражают связи выходных параметров с параметрами внутренними и внешними в форме алгоритма с численным методом решения);
- 3) *имитационные* — алгоритмические модели, отражающие поведение ВС во времени при заданных внешних воздействиях на объект — это модели массового обслуживания, заданные в алгоритмической форме.

2.2. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Методика составления ММ заключается в следующем:

1) Выбор свойств ВС, которые подлежат отображению в ММ. Этот выбор основан на анализе возможных применений модели и определяет степень универсальности ММ.

2) Сбор исходной информации о выбранных свойствах объекта (опыт и знания проектировщика, научно-техническая и справочная литература, описание прототипов).

3) Синтез структуры ММ. Структура ММ — общий вид математических соотношений модели без конкретизации числовых значений параметров (в виде графа, схемы, формул).

4) Расчет числовых значений параметров ММ (минимизация погрешностей модели заданной структуры:

$$\min \varepsilon_M(Y), \quad \text{при } Y \in Y_D$$

где Y — вектор параметров модели,

Y_D — область варьирования параметров,

$\varepsilon_M(Y)$ — погрешность ММ.

Оценка адекватности ММ, т. е. сравнение расчетных значений с реальными (экспериментальными) данными.

Рассмотрим классификацию моделей структурного синтеза: 1) перебор вариантов готовых законченных структур; 2) последовательный синтез; 3) трансформация описания разных аспектов.

Перебор вариантов. Такие структуры создаются заранее и хранятся в базе данных. Выбор варианта основан либо на случайной выборке, либо на эвристических способностях человека в диалоговом режиме, либо на установлении корреляции параметров, характеризующих структуру. Затем выполняется оценка варианта структуры с помощью процедуры параметрического анализа и синтеза и принимается решение на основе результатов оценки, о выборе лучшей структуры из числа рассмотренных структур. Для такого сравнения вариантов предусматриваются некоторые критерии, объединяющие частные показатели.

Если задачу структурного синтеза удастся сформулировать как задачу дискретного математического программирования, то определяется

$$\text{extr } F(Y) \text{ при } Y \in Y_D$$

где Y_D — дискретное множество;

$F(Y)$ — целевая функция;

$Y = \{y_i\}$, y_i — элементы некоторого типа в структуре.

Последовательный синтез характеризуется поэтапным решением задачи синтеза с возможностями оценки получающихся промежуточных структур. Отмечают два способа последовательного синтеза: *наращивание*, т. е. поочередное добавление элементов к исходной структуре (алгоритмы компоновки и размещения, где оценкой является количество межблочных связей, и предпочтение отдается тем промежуточным вариантам, при которых большое число связей оказывается сконцентрированным в пределах одного

блока); *выделение*, т.е. из некоторой обобщенной структуры постепенно удаляются лишние элементы (обобщенные технологические маршруты обработки деталей, обработки печатных плат, куда включены операции, которые могут встретиться при различных сочетаниях конструктивных особенностей. Сопоставление чертежа конкретной платы и обобщенного маршрута позволяет убрать лишние операции и сформировать конкретный технологический маршрут).

Трансформация описаний разных аспектов, например изготовление конструкторской документации, где формализовано преобразование результатов конструкторского проектирования в графическое изображение, выполняемое по правилу проекционного черчения.

Кроме указанных процедур синтеза, существуют комбинированные, т. е. сочетание этих процедур. Например, *диалоговые*, в которых процедуры оценки выполняет ЭВМ, а принятие решения остается за человеком. Назначение ЭВМ — подсказать варианты; назначение человека — модифицировать структуру. Возможно применение экспертных систем для генерации вариантов структуры и для связи пользователя с САПР в режиме диалога (экспертные системы воспринимают от высококвалифицированных специалистов знания, а затем используют их при решении задач структурного синтеза).

2.3. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Получение моделей элементов (моделирование элементов) в общем случае процедура не формализованная. Основные решения при выборе вида математических соотношений, характера используемых переменных и параметров принимает проектировщик. Но операции расчета численных значений параметров моделей, определение областей адекватности алгоритмизированы и решаются на ЭВМ. Поэтому моделирование элементов выполняется специалистами конкретных технических областей с помощью традиционных средств экспериментальных исследований и средств САПР.

Методы получения функциональных моделей элементов делят на теоретические и экспериментальные.

Теоретические методы изучают физические закономерности протекающих в объектах процессов, определяют соответствующее этим закономерностям математическое описание, обосновывают принятие упрощающих предположений, выполняют необходимые выкладки и приводят результаты к принятой форме представления модели.

Экспериментальные методы основаны на использовании внешних проявлений свойств объекта, фиксируемых во время эксплуатации однотипных объектов или при проведении целенаправленных экспериментов [35, 36].

Несмотря на эвристический характер многих операций моделирования, имеется ряд положений и приемов, общих для получения модели различных объектов. Достаточно общий характер имеют методики макро моделирования, математические методы планирования экспериментов, а также алгоритмы формализуемых операций расчета численных значений параметров и определения областей адекватности [30].

Методика макро моделирования имеет следующие этапы.

- 1) Определение свойств объекта, которые отображаются моделью.
- 2) Сбор информации о свойствах моделируемой ВС (справочные данные, аналоги).
- 3) Получение общего вида уравнений модели (структуры), где возможно оперирование не уравнениями, а эквивалентными схемами, чтобы проще установить физический смысл.
- 4) Определение численных значений параметров, т. е.:
 - использование специфических расчетных соотношений (этап 2);
 - решение экстремальной задачи, где в качестве целевой функции выбирается степень совпадения известных значений выходных параметров объекта с результатами использования модели, а управляемыми параметрами являются параметры модели;
 - проведение экспериментов и обработка полученных результатов.
- 5) Оценка точности полученной модели и определение области ее адекватности.

Методы планирования экспериментов. Для целей моделирования используют пассивные и активные эксперименты. В пассивных экспериментах нет возможности выбирать условия опыта по своему усмотрению и устанавливать значения факторов на желаемом уровне. В активных экспериментах опыты проводятся по заранее разработанному плану, выражающему количество опытов и значения факторов в каждом опыте [1,41].

Выбор вида зависимости выходного параметра макро модели $Y = (y_i)$ от внешних параметров $Q = (\dots q_k \dots)$ осуществляется проектировщиком.

Обычно в методах планирования эксперимента используются линейные модели

$$Y = AxQ \quad (2.1)$$

или квадратичные

$$Y = AxV, \quad (2.2)$$

где A — вектор-строка коэффициентов (параметров модели);

V — вектор, включающий факторы q_k , те или иные произведения из двух, трех и более факторов, а так же квадраты факторов q_k^2 , $k = \overline{1, p}$, где p — число факторов.

Число опытов N превышает число определяемых параметров вектора A . Параметры рассчитываются по методу наименьших квадратов, т. е. из условия минимизации суммы квадратов отклонений значений $\overline{y_l}$ определенных по формуле (2.1) и измеренных значений y_l :

$$\min_A \sum_{l=1}^N (\overline{y_l}(A) - y_l)^2,$$

где l — номер опыта.

Активный эксперимент имеет преимущества над пассивным:

- 1) в получении оптимальной области адекватности;
- 2) в сокращении числа опытов.

Регрессионный анализ. Связь между Y и Q может быть не

функциональной, а статистической, что особенно характерно при пассивных экспериментах. Для получения модели в такой ситуации применяют регрессионный анализ. Модель определяют в форме уравнений регрессии (2.1), в которых роль коэффициентов q_k в векторе A выполняют коэффициенты относительной регрессии [32, 50].

Рассмотрим алгоритм вычисления коэффициентов q_k . По результатам пассивных экспериментов получают оценки математических ожиданий M_y , M_k среднеквадратичных отклонений σ_y , σ_k для выходных y и внешних q_k параметров, а также коэффициенты корреляции z_k между y и q_k образующие вектор R , и коэффициенты корреляции d_{kj} между факторами q_k и q_j образующие матрицу D . Далее решают систему линейных алгебраических уравнений

$$D\eta' = R \quad (2.3)$$

и полученный вектор $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_p)$ используют при расчете относительных коэффициентов регрессии по формуле

$$d_k = (\eta_k \sigma_y) / \sigma_k.$$

Если факторы q_k не коррелированы, то D — единичная матрица, и можно обойтись без решения системы (2.3), так как $\eta_k = q_k$.

Диалоговое моделирование обусловлено наличием эвристических и формальных операций в методике моделирования. Здесь осуществляется оперативный ввод исходной информации о структуре модели, об известных характеристиках и параметрах объекта, о плане экспериментов. В диалоговом моделировании программное обеспечение имеет алгоритмы статистической обработки результатов экспериментов, расчета выходных параметров эталонных моделей и создаваемых моделей, в том числе расчета параметров по методам планирования экспериментов и регрессионного анализа, алгоритмы поиска экстремума, расчета областей адекватности [22, 23]. Пользователь меняет уравнения модели, задает их в аналитической, схемной или табличной форме, общается с подпрограммами, оценивает результаты предпринимаемых действий, приближаясь к получению модели требуемыми свойствами.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОГО ЭТАПА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВС

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СХЕМ

Основные исходные данные для создания модели — схема электрическая функциональная или принципиальная и параметры типовых конструкций. Постановка задачи и качество решения зависят от математической модели схемы и монтажного пространства. К математической модели схем предъявляют следующие требования [34, 39]:

- информационная полнота (наиболее полное отображение свойств);
- высокая формализация;
- наличие математического аппарата, позволяющего формализовать

модель;

- однозначность и простота перехода от объекта к модели и обратно;
- возможность использования модели в существующих алгоритмах или получение модели, где эти алгоритмы работают;
- наглядность представления объекта;
- адекватность модели объекту.

В наибольшей степени изложенным требованиям удовлетворяет граф, являющийся содержательной моделью объекта проектирования. Геометрическое задание графа наглядно представляет отображаемый объект, а матричный и аналитический способы — формально.

Для основных задач конструирования ВС (компоновка, размещение и трассировка) в математической модели отражается следующая информация о схеме [43,48]:

- связанность элементов схемы с точностью до вывода с учетом направления распространения сигнала и фактора неизвестности соединений в пределах одного комплекса (электрической цепи);
- топологические свойства элементов (порядок расположения выводов, возможность перехода соединений между ними и под элементом);
- метрические параметры элементов (их размеры, координаты и размеры полей контактов);
- сведения об инвариантности выводов.

Для различных задач и алгоритмов требуется и различная информация. Например, при разрезании схемы на части и размещении элементов одного типоразмера существенна информация о связанности элементов, т. е. электрической связи между ними без учета различия между выходами и входами; при решении задач поиска повторяющихся частей схем и их идентификации необходимо задавать направление связей между элементами с точностью до контактов этих элементов; при решении задач трассировки для определения планарности схем и числа пересечений основными являются топологические свойства элементов [8, 13].

Рассмотрим два способа перехода от схемы к графу [5, 21].

1) Элементом схемы или их выводам ставятся во взаимно однозначное соответствие вершины графа, а связи между ними представляются ребрами — получаем модель в виде неориентированного или ориентированного обыкновенного графа (мультиграфа);

2) Каждому выводу или элементу схемы ставится во взаимно однозначное соответствие вершина гиперграфа (ультраграфа, если необходимо учитывать направление распространения сигнала), тогда каждое ребро гиперграфа соответствует элементарной цепи, соединяющей эти элементы или их выводы.

3.1.1. МОДЕЛЬ СХЕМЫ В ВИДЕ НЕОРИЕНТИРОВАННОГО МУЛЬТИГРАФА

Чтобы задать информацию о связанности элементов или их выводов, каждая элементарная цепь (комплекс) интерпретируется полным подграфом, что приводит к избыточности ребер, количество вершин подграфа определяется

числом элементов или выводов, соединяемых данной цепью. При этом учитывается фактор неизвестности соединения, так как покрывающие «деревья», построенные на полном подграфе, соответствуют возможным вариантам соединения элементов данной цепью. Модель схемы получается объединением полных подграфов.

При такой интерпретации применяется вероятностный подход — каждому ребру $v_i \in U$ полного подграфа присваивают вес:

$$p_i = 1/(k - 1), \quad (3.1)$$

где k — количество вершин полного подграфа.

Модель схемы представлена на рис. 3.1, где & — логическое И; MS — селектор-мультиплексор (выбор канала со стробированием и непрерывная передача информационных посылок в одну линию); ML — мультиплексор (демультиплексор или аналоговый коммутатор). При сопоставлении элементов схемы и вершин графа, получаем граф (рис. 3.2).

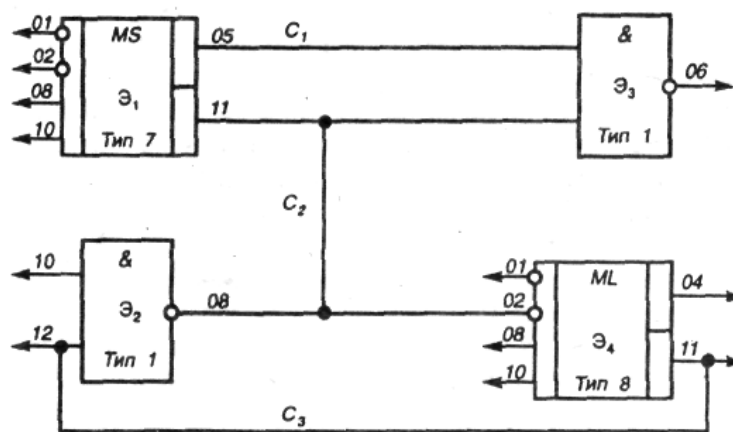


Рис. 3.1 – Модель схемы

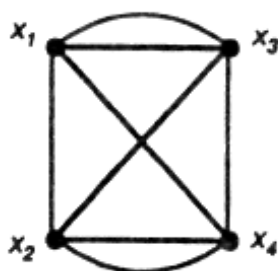


Рис. 3.2 – Граф

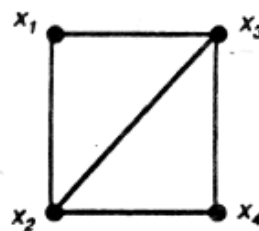


Рис. 3.3 – Фиксированное дерево

Введение избыточных ребер может сделать граф не планарным, хотя интерпретируемая нами схема — планарна. По данному графу нельзя получить правильную оценку элементарных связей между частями схемы. Например, количество ребер, попадающих в разрез между G_1 и G_2 графа G , ($X_1 = \{x_1, x_3\}$, $X_2 = \{x_2, x_4\}$), равно четырём (для вероятностного графа сумма весов ребер равна $4/3$), в то время как в схеме в этом случае разрезается одна цепь. При такой модели схемы существует сильная корреляционная связь между показателями, так что оптимизация одного приводит к оптимизации другого (рис. 3.3).

При сопоставлении выводов элементов и вершин графа граф схемы распадается на отдельные компоненты связности (рис. 3.4), количество которых

определяется числом электрических цепей схемы. Объединяя эти компоненты связности в соответствии с принадлежностью выводов элементам схемы, получим рассмотренную выше модель.

Модель схемы, полученную объединением полных подграфов, можно не использовать для решения задач размещения элементов (информацию о метрических параметрах элементов можно учитывать в весовых характеристиках вершин) и компоновки алгоритмами, в которых определяющим является фактор связности. Модель схемы в виде отдельных компонентов связности несет информацию о соединяемых выводах элементов для задачи трассировки [33].

Электрическую цепь можно представить фиксированным «деревом» (см. рис. 3.3), в этом случае не исключаются избыточные ребра, однако не учитывается фактор неизвестности соединений и неверно отражается связность элементов схемы, так как любые две несмежные вершины «дерева» не связаны между собой, в то время как в схеме между соответствующими элементами существует электрическая связь. Такую модель можно использовать для решения топологических задач трассировки, если нет ограничений на проведение соединений под элементами и между их контактами.

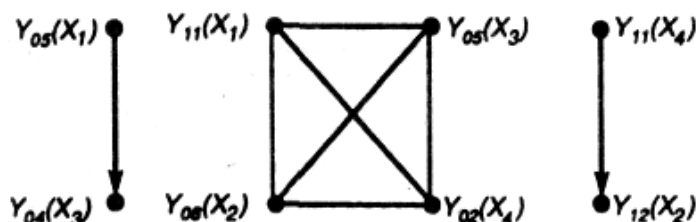


Рис. 3.4 – Компоненты связности

3.1.2. МОДЕЛЬ СХЕМЫ В ВИДЕ ОРИЕНТИРОВАННОГО МУЛЬТИГРАФА

Такое представление схемы необходимо для задач, где учитывается направление связей между элементами. В этих задачах точная оценка числа связей между элементами или частями схемы несущественна. Чтобы определить, что сигнал с выхода одного элемента поступает на вход другого, используют следующий способ представления электрических цепей дугами ориентированного графа: каждая цепь, соединяющая выходы n источников сигнала с входами m приемников, интерпретируется двудольным ориентированным подграфом, таким что

$$(\forall x_i \in X_1, \forall x_j \in X_2), \exists h = (x_i x_j), X = X_1 \cup X_2; X_1 \cap X_2 = \emptyset$$

где X_1 — множество вершин источников сигнала ($|X_1| = n$);

X_2 — множество вершин приемников сигнала ($|X_2| = m$);

т. е. каждая вершина поставленная в соответствие элементу — источнику сигнала для данной цепи, соединена дугой с каждой вершиной, соответствующей элементу — приемнику сигнала.

При таком способе представления цепей также появляются избыточные ребра. Модель схемы получается объединением двудольных ориентированных графов. Логическую функцию элемента схемы можно задать в качестве весовой

характеристики соответствующей вершине графа. Граф схемы представлен на рис. 3.5.

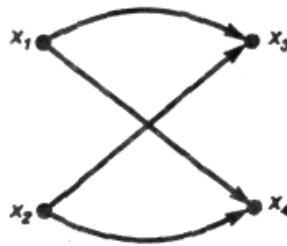


Рис. 3.5 – Граф схемы

В этом графе весовая характеристика, например вершина x_1 равна семи, т. е. определяется типом элемента Э1. Модель не отображает схему с точностью до вывода элемента, поэтому является корректной для схем, реализованных на элементах с одним выходом и равнозначными входами. Корректность модели для схем, построенных на элементах с неравнозначными входами и выходами, может быть обеспечена введением весов ребер.

Вес каждого ребра представляет собой упорядоченную пару, первый элемент которой характеризует выход элемента-источника, а второй — вход элемента-приемника (в простейшем случае пару составляют номера выводов этих элементов). Данная модель предназначена для решения частных задач компоновки (поиск повторяющихся частей схем, установление идентичности схем).

Идентификацию с точностью до выводов элементов схем можно получить при сопоставлении выводов с вершинами графа (рис. 3.6).

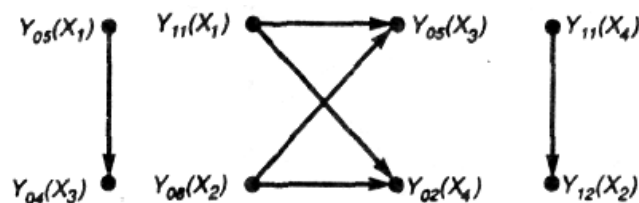


Рис. 3.6 – Компоненты связности

Граф схемы распадается на l компонент связности, где l — число электрических цепей схемы.

3.1.3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ГИПЕРГРАФОМ И УЛЬТРАГРАФОМ

Рассмотрим модель в виде гиперграфа, когда множество элементов схемы $\mathcal{E}$ соответствует множеству X , а множество электрических цепей $\mathcal{C}$ — множеству ребер U ($|X| = n$ — число элементов в схеме; $|U| = m$ — число электрических цепей схемы). Каждое ребро гиперграфа U_k представляется подмножеством тех вершин $X_k \in X$ которым соответствуют элементы, соединенные k -й электрической цепью.

При задании схемы гиперграфом учитывается фактор неизвестности соединения, т. е. для определения связи между i -м и j -м элементами схемы k -электрической цепью, достаточно проверить условие $x_i, x_j \in X_k$. Так как один элемент схемы может принадлежать разным цепям, то в общем случае

$$X_k \cap X_l \neq 0 \quad (k, l \in K = \overline{1, m}).$$

Количество связей между некоторым подмножеством X' вершин гиперграфа и его дополнением $X \setminus X'$ подсчитывают как число ребер $U_k \equiv X_k$ для которых выполняется условие

$$\begin{aligned} \exists x_i, x_j \in X_k (x_i \in X' \& x_j \in X \setminus X' \vee x_i \in X \setminus X' \& x_j \in X'); \\ i, j \in J = \overline{1, n}; \quad k \in K = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Отсюда видно, что по гиперграфу можно точно оценить число электрических соединений между частями или элементами схемы. Например, схема (рис. 3.1) интерпретируется гиперграфом (рис. 3.7).

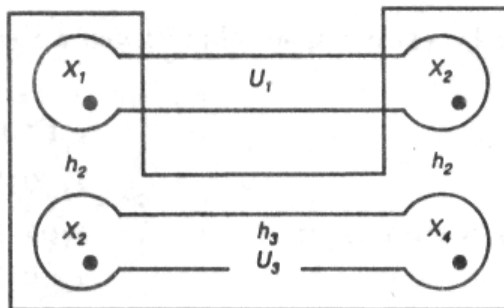


Рис. 3.7 – Гиперграф схемы

Множество вершин этого гиперграфа составляет $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, множество ребер определяется, как $u_1 \equiv X_1 = \{x_1, x_3\}$; $u_2 \equiv X_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$; $u_3 \equiv X_3 = \{x_2, x_4\}$.

Число электрических цепей, соединяющих элементы 1 и 3 с остальными, будет равно единице. Подсчет числа ребер гиперграфа, для которых выполняется условие (3.2), при $X' = \{x_1, x_3\}$, дает такое же значение. При матричном представлении модели схемы в виде гиперграфа принадлежность i -го элемента схемы j -й электрической цепи с точностью до вывода элемента можно задать, если элементы матрицы определять по правилу:

$$t_{ij} = \begin{cases} k_i, & \text{если } x_i \in \Gamma_{hj}; \\ 0, & \text{если } x_i \notin \Gamma_{hj}, \end{cases}$$

где k_i — номер вывода i -го элемента схемы. Матрица схемы:

$$T'' = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 5 & 11 & 0 \\ 0 & 8 & 12 \\ 4 & 5 & 0 \\ 0 & 2 & 11 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Идентификацию элементов с точностью до вывода при аналитическом представлении гиперграфа можно обеспечить присваиванием весов, характеризующих эти выводы, вершинам, входящим в ребра. Рассматриваемый гиперграф будет представлен массивами

$$\begin{aligned} X &= \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; \quad U = \{u_1, u_2, u_3\}; \\ u_1 &= \{x_1, x_3\}; \quad u_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; \quad u_3 = \{x_2, x_4\}; \\ k_1 &= \{5, 4\}; \quad k_2 = \{11, 8, 5, 2\}; \quad k_3 = \{12, 11\}. \end{aligned}$$

причем h_j поставлено во взаимно однозначное соответствие k_j . Из гиперграфа с помощью соответствующих преобразований можно получить модель схемы в виде неориентированного мультиграфа [20,37].

При представлении схемы ультраграфом множеству элементов схемы ставится во взаимно однозначное соответствие множество вершин X , а множеству электрических цепей — множество ребер U . Направление передачи сигналов в такой модели схемы задается таким образом: пусть i -й элемент схемы принадлежит j -й цепи, тогда бинарное отношение инцидентности задано на паре (x_i, u_j) , если x_i сопоставлено с элементом как источником сигнала, и (u_j, x_i) — если x_i интерпретирует элемент как приемник сигнала (рис. 3.8).

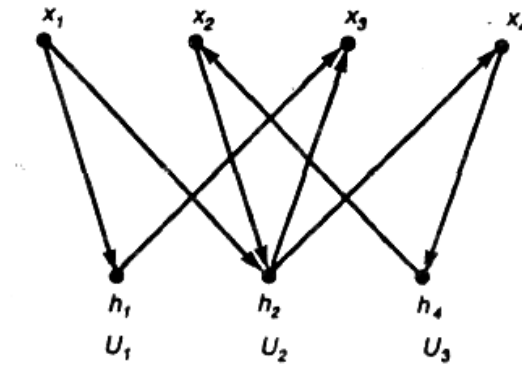


Рис. 3.8 – Кенигово представление ультраграфа схемы

Отображение схемы с точностью до выводов элементов обеспечивается введением весов, характеризующих эти выводы. При задании ультраграфа в виде множеств X , U и отображения U в X весами вершин, входящих в F_{uj}^{+1} и F_{uj}^{-1} , — установлены номера контактов элементов, сопоставленных с этими вершинами. Данная схема описана следующими массивами:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; U = \{u_1, u_2, u_3\};$$

$$F_{u1}^{+1} = \{x_3\}; F_{u2}^{+1} = \{x_3, x_4\}; F_{u3}^{+1} = \{x_2\};$$

$$K_{u1}^{+1} = \{4\}; K_{u2}^{+1} = \{5, 2\}; K_{u3}^{+1} = \{12\};$$

$$F_{u1}^{-1} = \{x_1\}; F_{u2}^{-1} = \{x_1, x_2\}; F_{u3}^{-1} = \{x_4\};$$

$$K_{u1}^{-1} = \{5\}; K_{u2}^{-1} = \{11, 8\}; K_{u3}^{-1} = \{11\}.$$

При матричном представлении элементы матрицы определяются по правилу

$$t_{ij} = \begin{cases} k_i, & \text{если } h_i \in F^{+1}x_i; \\ -k_i, & \text{если } h_i \in F^{-1}x_i; \\ 0, & \text{если } h_i \notin F^{+1}x_i \text{ \& } h_i \notin F^{-1}x_i. \end{cases}$$

Такая матрица для схемы имеет вид

$$T_h = \begin{vmatrix} 5 & 11 & 0 \\ 0 & 8 & -12 \\ -4 & -5 & 0 \\ 0 & -2 & 11 \end{vmatrix}$$

Ультраграф, как и гиперграф, учитывает фактор неизвестности соединений и позволяет точно оценить число электрических соединений [26, 49]. Для всех рассмотренных моделей не выполняется требование информационной полноты. В наибольшей степени оно удовлетворяется, когда схема представляется ультраграфом, при наличии дополнительных сведений о конструктивно-технологических характеристиках элементов и их логических функциях. При интерпретации элементов схемы вершинами графа эти сведения для всех моделей могут быть заданы в виде весовых характеристик вершин. Топологические свойства элементов схемы не отображены ни в одной из рассмотренных моделей.

При представлении схемы в виде неориентированного мультиграфа и гиперграфа не удовлетворяется требование однозначности перехода от модели к схеме. Теория неориентированных и ориентированных графов развита достаточно хорошо. Разработано большое количество алгоритмов решения задач схемно-топологического конструирования методами теории графов. Математический аппарат теории гиперграфов и ультраграфов в настоящее время только развивается.

3.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МОНТАЖНОГО ПРОСТРАНСТВА

Под монтажным пространством типовой конструкций понимают метрическое пространство, в котором устанавливаются входящие в нее типовые конструкции предыдущих уровней и выполняются электрические соединения выводов. Модель монтажного пространства отображает метрические параметры и топологические свойства конструкции.

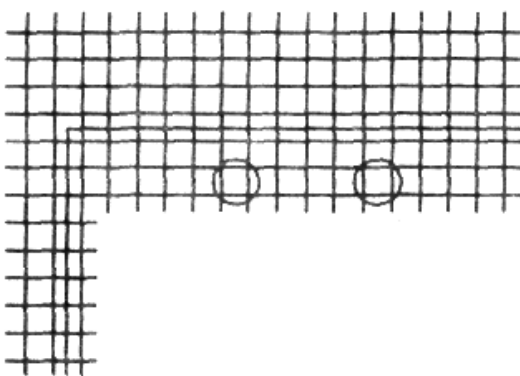


Рис. 3.9 – Верхний слой печатной платы

Метрические параметры — это габаритные размеры зон монтажа, допустимая ширина проводников и зазора между ними, координаты и размеры внешних монтажных площадок, шаг установки и размеры модулей, координаты и размеры полей их контактов.

Топологические свойства — это число слоев монтажной платы и переходов со слоя на слой, наличие замкнутых областей, запрещенных для проведения соединений, ограничения на взаимное расположение соединений в

монтажной области и на количество монтажных проводов, подводимых к одному выводу.

В качестве математической модели монтажного пространства используют неориентированный топологический граф (граф решетки). Плоскость монтажного пространства разбивают на элементарные площадки, стороны которых равны шагу проложения проводника по соответствующему направлению (для печатного монтажа элементарная площадка — квадрат). Каждой элементарной площадке ставят в соответствие вершину графа решетки. Две вершины соединены ребром, если между соответствующими элементарными площадками можно провести соединения с учетом метрических и топологических параметров типовых конструкций, устанавливаемых в данном монтажном пространстве.

Модель монтажного пространства может быть представлена фрагментом верхнего слоя печатной платы (рис. 3.9) и фрагментом с ортогональным монтажом при запрещении проведения проводников под микросхемами (рис. 3.10). Если проводники разрешается проводить под углом 45° , то каждой вершине может быть инцидентно восемь ребер (рис. 3.11).

Фрагмент математической модели монтажного пространства многослойной печатной платы описывает вертикальные ребра, интерпретирующие межслойные переходы (рис. 3.12).

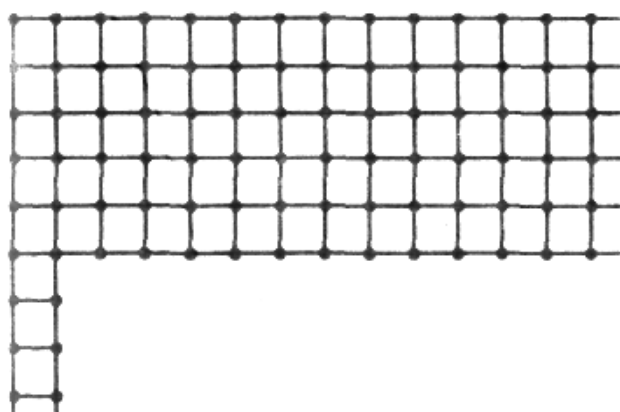


Рис. 3.10 – Модель монтажной плоскости

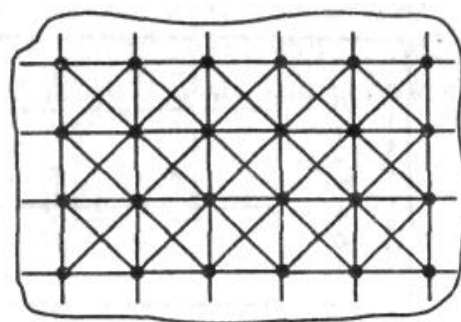


Рис. 3.11 – Модель многосвязной печатной платы

Из множества вершин этого графа можно выделить следующие подмножества: вершины, сопоставленные с контактными площадками выводов модулей (вершины обозначены кружками); вершины, представляющие внешние выводы типовой конструкции, и вершины, интерпретирующие контактные площадки межслойных переходов (вершины обозначены кружками). Фрагмент математической модели монтажного пространства многослойной печатной платы описывает вертикальные ребра, интерпретирующие межслойные переходы.

Из множества вершин этого графа можно выделить следующие подмножества: вершины, сопоставленные с контактными площадками выводов модулей (вершины обозначены кружками); вершины, представляющие внешние выводы типовой конструкции, и вершины, интерпретирующие контактные площадки межслойных переходов (вершины обозначены

кружками). В случае выполнения соединений монтажными проводами в любом направлении вершины графа решетки сопоставляют с выводами конструктивного элемента (микросхемы, разъемы соединительной платы и т. п.). Варианты различных соединений представляются полным графом, построенным на этих вершинах (рис. 3.13).

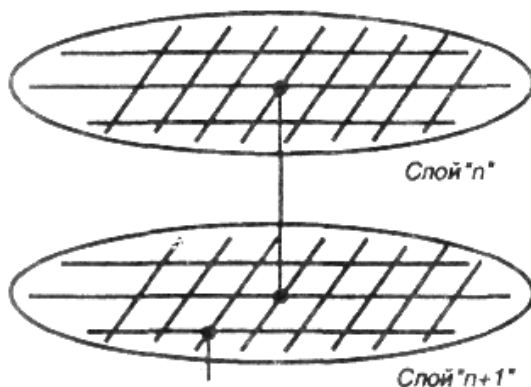


Рис. 3.12 – Модель многослойной печатной платы

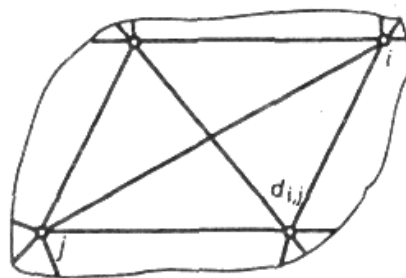


Рис. 3.13 – Представление полным подграфом

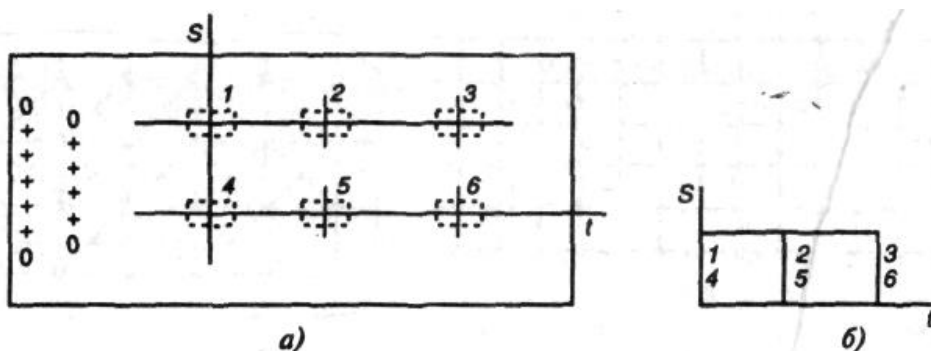


Рис. 3.14 – Граф решетки:

а) регулярного пространства, б) нерегулярного пространства

В конкретной реализации соединений необходимо учитывать ограничения на число проводников, подводимых к одному контакту. Расстояние между i -м и j -м узлами графа решетки в общем случае определяется по формуле

$$d_{ij} = (|s_i - s_j|^k + |t_i - t_j|^k)^h; \quad i, j = \overline{1, m},$$

где m — число узлов графа решетки. При ортогональной трассировке $k=h=1$, и получим $d_{ij} = |s_i - s_j| + |t_i - t_j|$. Для регулярного монтажного пространства в качестве модели поля размещения используют граф решетки для платы (рис. 3.14). Приближенный подсчет суммарной длины соединений между модулями можно выполнить следующим образом. Пусть моделью схемы соединения является неориентированный граф G (рис. 3.15), а моделью платы — G_λ граф решетки. Для графа G , преобразованного в решетку G_λ (вершины графа располагаются в узлах решетки G_λ), строится матрица расстояний D_λ , элементы которой подсчитываются по формуле. Если шаги установки модулей по осям s и t равны, расстояния между соседними узлами решетки принимаются равными единице. Матрица расстояний графа

$$D_\lambda = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

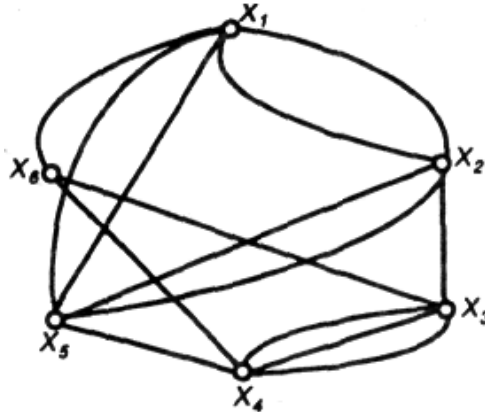


Рис. 3.15 – Неориентированный граф

Суммарная длина ребер графа G , преобразованного в решетку G_λ , определяется как полусумма элементов матрицы геометрии D_γ . Для получения матрицы геометрии D_γ необходимо выполнить поэлементное умножение матрицы D_γ и матрицы смежности R графа G . Матрицы смежности и геометрии рассматриваемого графа соответственно будут:

$$R = \begin{vmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad D_\gamma = \begin{vmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 3 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 9 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Для данного случая суммарная длина ребер $L(G) = 25$

3.3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

Алгоритмы такого вида относятся к классу эвристических. Их достоинством является высокая экономичность по затратам машинного времени и требуемому объему оперативной памяти за счет отсутствия процедуры многоразового анализа вариантов структуры. Однако последовательные алгоритмы дают не оптимальные, а близкие к оптимальным решения.

Рассмотрим задачу компоновки (монтажной платы), т. е. определения состава типовых конструкций каждого уровня. Задача компоновки решается «снизу вверх», т. е. известные схемы $(i - 1)$ -го уровня необходимо распределить по конструкциям i -го уровня. Например, на самом низшем уровне элементами могут быть корпуса микросхем, а конструкциями (блоками) — типовые элементы замены, связанные друг с другом путем разъемных соединений.

В качестве критериев оптимальности при решении задач компоновки используют критерии либо минимума суммарного числа N_i типов модулей

$$N_i = \sum_j x_{ij},$$

где x_{ij} — число модулей j -го типа i -го уровня схемы, либо минимума межблочных соединений

$$R_i = 0,5 \sum_{k=1}^{N_i} R_{ik},$$

где R_{ik} — число внешних связей каждого модуля i -го уровня.

Первый критерий связан с конструктивными характеристиками аппаратуры и показателем технологической стоимости, второй критерий ведет к повышению надежности конструктивной реализации схемы за счет сокращения числа разъемных соединений, уменьшению помех и задержек сигналов благодаря снижению числа межблочных соединений [44].

3.4. Алгоритм компоновки по критерию минимума межблочной связности

Первоначально выбирают исходный элемент схемы. Выбор начального элемента основывается на схемотехнических соображениях:

1) В первый компонуемый узел включены все элементы, смежные с начальным, и сам начальный элемент.

2) Если полученное число элементов равно максимально допустимому числу элементов в первом узле, то компоновка узла заканчивается.

3) Если это число больше или меньше максимально допустимого, то выполняются операции по устранению лишних или добавлению недостающих элементов, причем из нескомпонованных элементов выбирают такой, который имеет наибольшее число связей с элементами, уже вошедшими в состав компонуемого узла.

4) Далее сформированный узел удаляют из схемы и компонуют новые узлы.

5) Процесс повторяется до тех пор, пока схема не будет разбита на требуемое число частей или не будет выяснена невозможность этого.

Сформулируем описанный алгоритм в терминах теории графов. Пусть задан граф схемы $G = (X, U)$, который необходимо разбить на l частей $G_1, G_2, \dots, G_l$ с числом вершин в каждом соответственно $n_1, n_2, \dots, n_l$

$$\left(\sum_{i=1}^l n_i = n, |X| = n \right).$$

Первоначально в графе G определяют вершину $x_i \in X$ с наибольшей локальной степенью $\rho(x_i)$ (локальной степенью $\rho(x_i)$ вершины $x_i \in X$ называют число ребер, инцидентных этой вершине графа). Если таких вершин несколько, то предпочтение отдается той, которая имеет большее число кратных ребер. Вершина x_i и все смежные с ней вершины включаются в граф G_1 . Обозначим это множество вершин через Γ_{x_i} . Если $|\Gamma_{x_i}| = n_l$, то G_1 образован, если же $|\Gamma_{x_i}| > n_l$, то из графа G_1 удаляют вершины, связанные с

остающимися вершинами графа G меньшим числом ребер. Когда $|\Gamma_{x_i}| < n_l$, выбирают вершину $x_j \in \Gamma_{x_i}$, удовлетворяющую условиям

$$\sigma(x_j) = \max_{x_k \in \Gamma_{x_i}} \{\sigma(x_k)\} = \max_{x_k \in \Gamma_{x_i}} \{\rho(x_k) - a_k\}$$

где a_k — число ребер, соединяющих вершину x_k со всеми невыбранными вершинами графа G . Строят множество вершин Γ_{x_i} , смежных x_j , и процесс выбора вершин G_1 повторяют. Образованный подграф G_1 исключают из исходного и получают граф $G^* = (X^*, U^*)$, где $X^* = X \setminus X_l$, $U^* = U \setminus U_l$. Далее в графе G^* выбирают вершину с наибольшей локальной степенью, включают ее в G_2 и процесс повторяют до тех пор, пока граф G не будет разрезан на l частей.

Первоначальную компоновку можно улучшить с помощью итерационных алгоритмов, основанных на реализации методов парных или групповых перестановок элементов из одной части схемы в другую таким образом, чтобы улучшилось значение целевой функции с учетом заданных ограничений.

3.5. ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ

Эта задача заключается в оптимальном размещении (с точки зрения выбранного критерия оптимальности) элементов и связей между ними в монтажном пространстве типовой конструкции с учетом заданных конструктивно-технологических ограничений [9].

Исходными данными в задаче являются принципиальная электрическая схема узла или устройства, метрические параметры и топологические свойства монтажного пространства. *Главная цель размещения* — создание наилучших условий для трассировки с учетом обеспечения тепловых режимов и электромагнитной совместимости электрорадиоэлементов. Несмотря на обилие существующих критериев размещения (минимума пересечений, минимума суммарной длины соединений и т. д.), истинной целью размещения компонентов является максимальное упрощение процесса трассировки соединений, т. е. *достижение минимального числа непроведенных трасс* [5—7]. При размещении n микроэлементов в регулярном монтажном пространстве с числом позиций m общее число размещений $N(n, m)$ определяется как

$$N(n, m) = n! C_m^n = \frac{m!}{(m-n)!}.$$

В связи с этим поиск оптимального размещения с помощью перебора нецелесообразен уже при $n > 15$.

Имеется много разновидностей алгоритмов размещения. Основной идеей этих алгоритмов является идея упорядочения микроэлементов по определенным признакам. Во-первых, сначала устанавливают очередность микроэлементов, а затем для каждого из них определяют наилучшую позицию по выбранному критерию, например по суммарной длине связей с уже размещенными компонентами. Во-вторых, затем процесс повторяют для оставшихся компонентов и свободных позиций. Связность размещаемых элементов задается матрицей смежности R графа $G = (X, U)$. Для выбора размещаемого элемента используют различные оценки связности.

Пусть на k -м шаге алгоритма размещено $I_k \in I$ элементов, тогда $I'_k = I \setminus I_k$ — множество еще не размещенных элементов. Основными правилами для выбора элементов на $(k+1)$ -м шаге алгоритма являются:

а) максимум суммарной связности h_i со всеми размещенными элементами:

$$h_i = \max_{i \in I'_k} \left\{ \sum_{j \in I_k} \lambda_{ij} \right\}, \quad i \neq j;$$

б) максимум разности связей/ между размещенными и не размещенными элементами:

$$f_i = \max_{i \in I'_k} \left\{ \sum_{j \in I_k} \lambda_{ij} - \sum_{j \in I'_k} \lambda_{ij} \right\}, \quad i \neq j.$$

Выбранный для размещения элемент устанавливают в такую позицию среди оставшихся незаполненных, при которой будет иметь наименьшее значение некоторая целевая функция.

Для многих задач размещения в качестве такой функции может быть выбрана суммарная длина связей с уже размещенными элементами [7,8].

Последовательные алгоритмы размещения требуют небольших затрат машинного времени, относят их к классу полиномиальных алгоритмов со сложностью $O(n)$, приводящих к неоптимальным решениям. Улучшить решение можно применением итерационных алгоритмов компоновки, основанных на изменении позиций одиночных элементов или групп элементов. Итерационные алгоритмы также относятся к классу полиномиальных со сложностью порядка $O(n^2)$ - $O(n^4)$.

3.6. ЗАДАЧА ТРАССИРОВКИ

Данная задача заключается в определении конкретной геометрии печатного или проводного монтажа, реализующего соединения между элементами схемы. Исходными данными для трассировки являются список цепей, метрические параметры и топологические свойства типовой конструкции и ее элементов, а также результаты решения задачи размещения, по которым находят координаты выводов элементов.

При решении задачи трассировки строят множество трасс, соединяющих выводы элементов соответствующих цепей схемы. Разработка отдельной трассы представляет собой построение на фиксированных вершинах минимального покрывающего или связывающего «дерева», а разработка множества трасс сводится к построению «леса» непересекающихся минимально покрывающих или связывающих «деревьев». Известно, что на n вершинах можно построить n^{n-2} различных «деревьев», поэтому точное решение задачи трассировки методом полного перебора практически нереализуемо.

В последовательных алгоритмах трассировки трассы цепей проводятся в определенном порядке одна за другой, при этом каждая проложенная трасса становится препятствием для всех последующих цепей. В последовательных алгоритмах выполняют локальную оптимизацию качества трассировки каждой

отдельной трассы без учета влияния размещения данной трассы на возможность проведения последующих. Это приводит к тому, что некоторые участки платы могут оказаться заблокированными.

Известный алгоритм трассировки основан на волновом методе (алгоритм Ли). Главные принципы волнового алгоритма Ли заключаются в следующем. Плоскость трассировки разбивают на прямоугольные площадки — дискреты заданного размера. Размер дискретной площадки определяется допустимыми размерами проводников и расстояниями между ними. Задача проведения трасс сводится к получению последовательности дискретов, соединяющих элементы a и b , соответствующие началу и концу проводимой трассы.

Введем целевую функцию $F = F(f_1, \dots, f_\lambda)$ как критерий качества пути.

Начиная с элемента, a дискретам, соседним с ранее просмотренными, присваивают определенное значение целевой функции $F_{ij}=m(i, j)$. Этот этап проводится итерационно до элемента b , которому присваивают некоторое значение веса $m(i_b, j_b)$. Затем, начиная от элемента b , значения перемещаются к элементу, a по пройденным дискретам таким образом, чтобы значения целевых функций дискретов монотонно убывали. В результате получается трасса, соединяющая элементы a и b .

Обычно работа алгоритма Ли реализуется следующим образом. На трассируемой плоскости из источника a моделируется распространение волны до тех пор, пока не будет достигнута точка b или пока на некотором шаге фронт волны не сможет включить ни одного незанятого дискрета. Эту часть алгоритма называют *распространением волны*.

После этого проводят трассу, начиная от конечной точки b , по дискретам с последовательно уменьшающимися весами (рис. 3.16). Цифры в квадратах соответствуют весам дискретов, занятые дискреты заштрихованы, а построенная трасса показана штриховой линией. Существует несколько вариантов проведения пути, из которых конструктор (или ЭВМ) выбирает один, наиболее удовлетворяющий заданным требованиям.

8	9	10	11	10	11	12	13
7		9	8	9			12
6		8	7	8	9	10	11
5		5	6	7			
4	3	4	5	6	7		
3	2				6		
2	1				5	6	7
1	a	1	2	3	4	5	6

Рис. 3.16 – Трассируемая плоскость

Имеется многообразие волновых алгоритмов, направленных на повышение быстродействия трассировки, уменьшение объема требуемой оперативной памяти ЭВМ и т. д. Волновые алгоритмы применяются при разработке сетей ЭВМ [15, 16].

3.7. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

На разных этапах проектирования встает задача выбора наилучшего варианта из множества допустимых проектных решений, удовлетворяющих предъявленным требованиям.

Процесс принятия решения при оптимальном проектировании характеризуют следующие основные черты: наличие цели (критериев оптимальности) и альтернативных вариантов проектируемого объекта, и учет существенных факторов при проектировании.

Понятие «оптимальное решение» при проектировании имеет вполне определенное толкование — лучшее в том или ином смысле проектное решение, допускаемое обстоятельствами. В подавляющем большинстве случаев одна и та же техническая задача может быть решена несколькими способами, приводящими не только к различным выходным характеристикам, схемам и конструкциям, но даже и к физическим принципам, положенным в основу построения объекта. При этом одно из решений может превосходить другое по одним свойствам и уступать ему по другим. В этих условиях часто чрезвычайно трудно сказать, не только какая из систем оптимальна, но даже какая из них предпочтительнее.

Если выделяют один параметр, который характеризует свойства, то этот параметр принимается за целевую функцию. При этом другие параметры подпадают под категорию ограничений. При решении однокритериальных задач применяется математический аппарат исследования операций. При создании вычислительной сети в большинстве случаев однокритериальные задачи не удовлетворяют полученному решению. Сложные ВС характеризуются многими параметрами (емкость памяти, время счета, пропускная способность каналов и т. п.), определяющими ее качество. Среди этих параметров есть такие, значения которых желательно всемерно увеличивать, но есть и такие, которые желательно минимизировать.

Таким образом, ограничения и связи между отдельными параметрами ВС приводят к необходимости идти на компромисс и выбирать для каждой характеристики не максимально возможное в принципе значение, а меньшее, но такое, при котором и другие важные характеристики тоже будут иметь приемлемые значения. Поэтому необходимо принимать во внимание всю совокупность характеристик ВС. Задачи проектирования, проводимые по нескольким критериям оптимизации, носят название *многокритериальных*, или *задач векторной оптимизации*.

Известные методы векторной оптимизации прямо или косвенно сводят решаемые задачи к задачам скалярной оптимизации, т. е. частные критерии $F_i(X); i = \overline{1, n}$ тем или иным способом объединяются в составной критерий, $F(X) = \Phi(F_1(X), \dots, F_n(X))$, который затем максимизируется (или минимизируется). Если составной критерий отражает физическую суть ВС и вскрывает объективную связь между частными критериями и составным критерием, то оптимальное решение является объективным.

На практике из-за сложности обычно составной критерий объединяет частные, что ведет к субъективности решения; такой критерий является

обобщенным, или интегральным. В зависимости от того, каким образом частные критерии объединяются в обобщенный критерий, различают критерии аддитивные, мультипликативные и минимаксные (максиминные).

Если оптимизация ведется без учета статистического разброса характеристик, то соответствующий критерий оптимальности называют *детерминированным критерием*; если разброс параметров учитывается, то имеем *критерий статистический*. Статистический критерий оптимальности наиболее полно отражает качество ВС, но его использование требует больших затрат машинного времени.

Рассмотрим способы выбора критериев оптимальности.

3.7.1. ЧАСТНЫЕ КРИТЕРИИ

При проектировании по частным критериям в качестве целевой функции $F(X)$ принимается наиболее важный выходной параметр проектируемой ВС, все остальные параметры в виде соответствующих условий работоспособности относятся к ограничениям. В этом случае задача оптимального проектирования является однокритериальной задачей математического программирования: максимизировать (или минимизировать) значение целевой функции $F(X) \rightarrow \max(\min)$ при наличии ограничений на параметры ВС.

Из постановки задачи вытекает, что параметры, для которых выполняются ограничения в виде строгих неравенств, имеют определенный запас по сравнению с заданными техническими требованиями. Ряд параметров, для которых условия работоспособности имеют вид неравенств, запасов вообще не имеет, и любые изменения технических требований для этих параметров приводят как к изменению характеристик и структуры проектируемого объекта, так и к изменению значения целевой функции.

Частные критерии используются при проектировании ВС различного назначения.

3.7.2. АДДИТИВНЫЕ КРИТЕРИИ

В этих критериях целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев. Частные критерии имеют различную физическую природу и в соответствии с этим — различную размерность. Поэтому при образовании обобщенного критерия следует оперировать не с «натуральными» критериями, а с их нормированными значениями. Нормированные критерии представляют собой отношение «натурального» частного критерия к некоторой нормирующей величине, измеренной в тех же единицах, что и сам критерий. При этом выбор нормирующего делителя должен быть логически обоснован. Возможны несколько подходов к выбору нормирующего делителя.

Первый подход предлагает принимать в качестве нормирующего делителя директивные значения параметров, заданные заказчиком. Логически слабым моментом такого подхода является негласное предположение того, что в ТЗ на проектируемую ВС заданы оптимальные значения параметров объекта, и что совокупность заданных значений критериев рассматривается как образцовая.

Второй подход предполагает выбор в качестве нормирующих делителей максимальных значений критериев, достигаемых в области существования проектных решений (в области компромисса). Возможен подход, при котором в качестве нормирующих делителей выбирают разность между максимальным и минимальным значениями критерия в области компромисса.

Выбор подхода к формированию безразмерной формы частных критериев носит иногда субъективный характер и должен обосновываться в каждом конкретном случае. Пусть при проектировании ВС существует n частных критериев. Тогда целевая функция задачи оптимизации в случае применения аддитивного критерия определяется

$$F(X) = \sum_{i=1}^n c_i \frac{F_i(X)}{F_i^{(0)}(X)} = \sum_{i=1}^n c_i f_i(X),$$

где c_i — весовой коэффициент i -го частного критерия;

$F_i^{(0)}(X)$ — i -й нормирующий делитель;

$f_i(X)$ — нормированное значение i -го частного критерия.

Такая целевая функция позволяет осуществить компромисс, при котором улучшение значения одного нормированного частного критерия компенсирует ухудшение значений других.

Введение весовых коэффициентов должно учитывать различную значимость частных критериев при формировании аддитивного критерия. Определение весовых коэффициентов сталкивается с серьезными трудностями и обычно сводится либо к использованию формальных процедур, либо к применению экспертных оценок. С появлением обобщенного критерия исчезают логические проблемы, связанные с установлением взаимосвязей между частными критериями различной размерности и выбором наилучшего варианта ВС, и остаются лишь вычислительные трудности. Но аддитивный критерий имеет ряд недостатков, главный из которых состоит в том, что он не вытекает из объективной роли частных критериев в функционировании ВС и выступает поэтому как формальный математический прием, придающий задаче удобный для решения вид.

Другой недостаток заключается в том, что в аддитивном критерии может происходить взаимная компенсация частных критериев. Это значит, что значительное уменьшение одного из критериев вплоть до нулевого значения может быть покрыто возрастанием другого критерия. Для ослабления этого недостатка следует вводить ограничения на минимальные значения частных критериев и их весовых коэффициентов.

Несмотря на слабые стороны, обобщенный аддитивный критерий позволяет в ряде случаев успешно решать многокритериальные задачи и получать полезные результаты.

3.7.3. МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЕ КРИТЕРИИ

Аддитивные критерии основаны на использовании принципа справедливой компенсации абсолютных значений нормированных частных критериев. Но иногда целесообразным является оперирование не с абсолютными, а с относительными изменениями значений частных критериев.

Принцип справедливой относительной компенсации формулируется следующим образом: справедливым следует считать такой компромисс, когда суммарный уровень относительного снижения значений одного или нескольких критериев не превышает суммарного уровня относительного увеличения значений других критериев. Условия оптимальности на основе принципа справедливой относительной компенсации имеют вид

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_i(X)}{F_i(X)} = 0,$$

где $\Delta F_i(X)$ — приращение величины i -го критерия;

$F_i(X)$ — первоначальная величина i -го критерия.

Полагая $\Delta F_i(X) \ll F_i(X)$, условие оптимальности можно представить как дифференциал натурального логарифма, тогда

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_i(X)}{F_i(X)} = \sum_{i=1}^n d(\ln F_i(X)) = d(\ln \prod_{i=1}^n F_i(X)) = 0.$$

Из этого выражения следует, что принцип справедливой относительной компенсации приводит к мультипликативному обобщенному критерию оптимальности:

$$F(X) = \prod_{i=1}^n F_i(X).$$

Мультипликативный критерий образуется путем простого перемножения частных критериев в том случае, если все они имеют одинаковую важность. В случае неравноценности частных критериев вводятся весовые коэффициенты c_i , и мультипликативный критерий принимает вид

$$F(X) = \prod_{i=1}^n F_i^{c_i}(X).$$

Достоинством мультипликативного критерия является то, что при его использовании не требуется нормировка частных критериев. Недостатки критерия: критерий компенсирует недостаточную величину одного частного критерия избыточной величиной другого и имеет тенденцию сглаживать уровни частных критериев за счет неравнозначных первоначальных значений частных критериев.

3.7.4. МИНИМАКСНЫЕ КРИТЕРИИ

В теории векторной оптимизации особое место занимает принцип компромисса, основанный на идее равномерности. На основе этого принципа составлены минимаксные (максиминные) критерии.

Сущность принципа максимума заключается в следующем. При создании ВС и наличии большого числа частных критериев довольно трудно, а порой и невозможно установить аналитическую зависимость между критериями. Поэтому, основываясь на идее равномерного компромисса, стараются найти такие значения переменных проектирования $X = (x_1, \dots, x_m)$, при которых нормированные значения всех частных критериев становятся равными между

собой, т. е. $f_i(X) = K$, $i = \overline{1, n}$. С учетом весовых коэффициентов важности частных критериев выражения трансформируются в соотношения вида $c_i f_i(X) = K$, $i = \overline{1, n}$,

При большом числе частных критериев из-за сложных взаимосвязей иногда трудно добиться соотношений указанных выше. Тогда применяют принцип максимина, заключающийся в такой вариации значений переменных проектирования X , при которой последовательно повышаются те нормированные критерии, численные значения которых в исходном решении оказались наименьшими. Завышение одного критерия неизбежно приводит к снижению значений части остальных критериев. Но при проведении ряда операций можно добиться определенной степени уравнивания противоречивых (конфликтных) частных критериев, что и является целью принципа максимина.

Принцип максимина формулируется следующим образом: необходимо выбрать такое $X^{(0)} \in X$, на котором реализуется максимум из минимальных значений частных критериев, т. е.

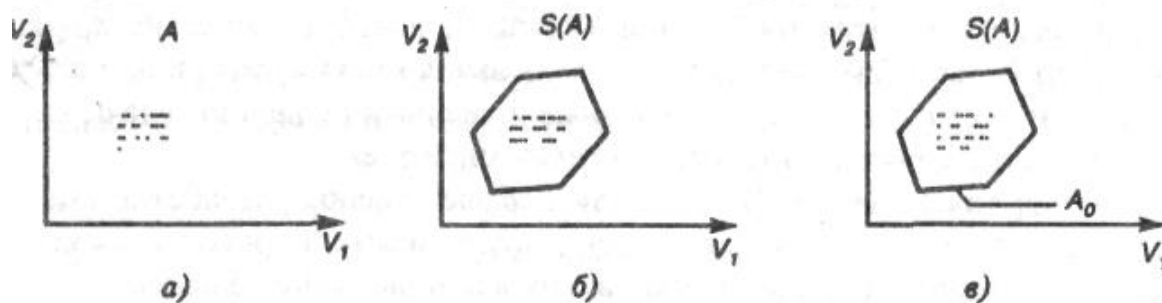
$$F(X^{(0)}) = \max_x \min_i \{f_i(X)\} \quad i = \overline{1, n}, \quad X = (x_1, \dots, x_m).$$

Такой принцип выбора $X^{(0)}$ иногда носит название принципа «гарантированного результата». Он заимствован из теории игр, где, по существу, является основным принципом.

Если частные критерии $f_i(X)$ следует минимизировать, то самым «отстающим» критерием является тот, который принимает максимальное значение. В этом случае принцип равномерной компенсации формулируется в виде минимаксной задачи:

$$F(X^{(0)}) = \min_i \max_x \{f_i(X)\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad X = (x_1, \dots, x_m).$$

Геометрическая интерпретация принципа минимакса заключается в следующем. Пусть проектируется некоторый объект по n частным критериям $v_i = f_i(X)$, $i = \overline{1, n}$. Каждый вариант объекта представлен в пространстве E_n в виде точки $A^{(l)}$ с координатами $A^{(l)} = (v_1^{(l)}, \dots, v_n^{(l)})$, а множество вариантов может быть отражено в конечном множестве точек $A = \{A^{(l)}, \dots, A^{(k)}\}$, заключенное в выпуклую оболочку $s(A)$. Т. е. область принятия решений при проектировании ограничена выпуклой оболочкой $s(A)$ в пространстве E_n (рис. 3.17).



а – множество вариантов объектов, б – ограничение вариантов, в – область принятия решений

Пусть все частные критерии минимизируются. Тогда областью компромисса является левая нижняя граница выпуклой оболочки $S(A)$, а решение должно находиться в области компромисса. В общем случае при неравнозначных критериях $v_i = f_i(X)$ решение на основе принципа равномерной компенсации будет соответствовать точке $A^{(0)}$, лежащей в области компромисса, для которой будут удовлетворяться соотношения

$$c_i v_i = K \quad c_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n c_i = 1, \quad i = \overline{1, n}.$$

Направление, определяемое вектором $C = (c_1, \dots, c_n)$, задается в первом октанте в пространстве E_n . Произвольный вектор весовых коэффициентов C позволяет отдавать предпочтение друг перед другом частным критериям $v_i = f_i(X)$, выраженным в количественной шкале.

Выводы по выбору критериев оптимальности заключаются в следующем:

1) Выбор критерия может производиться неоднозначно. Источником сложности служит противоречивость целей (стоимость и надежность функционирования, энергоемкость и производительность, объем ЗУ и скорость считывания всегда будут находиться в противоречии друг с другом).

2) Если требуется оптимизировать один из параметров при соблюдении ограничительных требований на остальные параметры, то формируется частный критерий $F(X)$.

3) При наличии нескольких критериев оптимальности аддитивный критерий выбирают тогда, когда существенное значение имеют абсолютные величины критериев при выбранном векторе параметров X .

4) Если существенную роль играют изменения абсолютных величин — частных критериев при вариации вектора переменных X , то применяют мультипликативный критерий оптимальности.

5) Если стоит задача достижения равенства нормированных значений конфликтных частных критериев, то оптимальное проектирование выполняют по минимаксному критерию.

3.8. ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

В многокритериальных задачах оптимального проектирования возникает необходимость объективной оценки важности частных критериев, включаемых в аддитивный, мультипликативный или минимаксный критерий оптимальности. Важность критериев $F_i(X)$, $i = \overline{1, n}$, оценивают с помощью весовых коэффициентов c_i которые должны количественно отражать значимость соответствующих частных критериев. Значение c_i выбирается из анализа современного мирового уровня развития вычислительной техники, из требований к проектируемой ВС и из существующих возможностей реализации этих требований. Открытие новых физических принципов и разработка новых методов проектирования могут существенно повлиять на значение c_i . Рассмотрим основные подходы к решению задачи выработки предпочтения на множестве частных критериев.

Экспертные оценки. В теории экспертных оценок разработан ряд методов

проведения экспертиз. Наиболее эффективными в проводимых исследованиях оказались методы ранжирования и приписывания баллов.

Метод ранжирования заключается в следующем. Пусть экспертиза проводится группой из l экспертов, которые являются квалифицированными специалистами в той области, где принимается решение. Метод ранжирования основан на том, что каждого эксперта просят расставить частные критерии $F_i(X)$, $i = \overline{1, n}$, проектируемой ВС в порядке их важности. При этом цифрой 1 обозначают наиболее важный частный критерий (параметр), цифрой 2 — следующий по степени важности частный критерий и т. д. Эти ранги преобразовывают таким образом, что ранг 1 получает оценку n , ранг 2 — оценку $n - 1$ и т. д. до ранга n , которому присваивается оценка 1, где n — число частных критериев.

Зная преобразованный ранг $r_i^{(k)}$ i -го критерия у k -го эксперта ($k = \overline{1, l}$), весовые коэффициенты c_i , $i = \overline{1, n}$ определяют из соотношения

$$c_i = \frac{\sum_{k=1}^l r_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l r_i^{(k)}}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Метод приписывания баллов основан на том, что эксперты оценивают важность частного критерия по шкале 0—10, при этом разрешается оценивать дробными величинами или приписывать одну и ту же величину из выбранной шкалы нескольким критериям. Зная балл $h_i^{(k)}$ i -го критерия у k -го эксперта, весовые коэффициенты c_i определяют из предыдущего выражения, заменив в нем $r_i^{(k)}$ на

$$H_i^{(k)} = \frac{h_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^n h_i^{(k)}}.$$

Последний называют весом, подсчитанным для i -го частного критерия $F_i(X)$ на основе оценок k -го эксперта. Особое место занимает обработка результатов экспертных оценок. Если рассматривать результаты оценок каждого из экспертов как реализации некоторой случайной величины, то к ним можно применить методы математической статистики.

В общем случае при определении степени важности частного критерия $F_i(X)$ получают набор оценок $r_i^{(k)}$ $k = \overline{1, l}$, подлежащих статистической обработке. Среднее значение оценки

$$r_i = \frac{\sum_{k=1}^l \mu_k r_i^{(k)}}{\sum_{k=1}^l \mu_k}, \quad 0 \leq m \leq 1,$$

где μ_k — коэффициент авторитета k -го эксперта.

Среднее значение оценки r_i выражает коллективное мнение группы экспертов. Степень согласованности мнений экспертов характеризуется величиной

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{k=1}^l (r_i^{(k)} - r_i)^2}{l},$$

называемой *дисперсией экспертных оценок*. Ясно, что чем меньше величина дисперсии, тем с большей уверенностью можно опираться на найденное значение r_i оценки степени важности частного критерия $F_i(X)$.

Надежность экспертизы тем выше, чем меньшую долю среднего значения составляет среднеквадратический разброс оценок σ . Поэтому в качестве меры надежности приведенной экспертизы часто принимают $\beta = \frac{\sigma}{r_i}$ и называют *вариацией*. По среднему значению оценки r_i определяются весовые коэффициенты:

$$C_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Статистическая обработка результатов экспертных оценок подобна статистической обработке результатов измерений. На достоверность экспертизы существенно влияют такие факторы, как численный состав экспертной группы, уровень компетентности экспертов, состав вопросов, предъявляемых экспертам и т. д. Сейчас получили распространение интерактивные методы решения многокритериальных задач, когда информация о важности и предпочтении приходит как от инженера-разработчика, так и от ЭВМ. Уточнение обобщенных критериев и упорядочивание критериев по важности выполняется на основе диалога конструктора с ЭВМ.

Для определения наилучшего решения конструктору приходится решать задачи структурной и параметрической оптимизации. Тогда модель принятия решения описывается как задача многокритериальной оптимизации. В этом случае используют интерактивный режим оптимизации. На любом этапе разработчик может изменить процесс решения задачи, параметры, метод решения, математическое описание задачи. Проблемами здесь являются разработка эффективных пакетов прикладных программ, сценариев диалога, эвристических и точных алгоритмов с учетом неопределенности интеллектуальной деятельности инженера-разработчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными достоинствами САПР являются:

- 1) *Более быстрое выполнение чертежей*. Конструктор, использующий САПР, выполняет чертежи в 3 раза быстрее, чем традиционно.
- 2) *Повышение точности выполнения чертежей*. Точность чертежа, выполненного вручную, определяется остротой зрения конструктора и толщиной грифеля карандаша. На чертеже, выполненном с помощью САПР,

любое место точки определено точно, а для более детального просмотра его элементов любая часть чертежа может быть увеличена.

3) *Повышение выполнения качества чертежей.* Качество изображения на обычном чертеже полностью зависит от мастерства конструктора, тогда как плоттер САПР рисует линии и тексты независимо от индивидуальных способностей человека.

4) *Возможность многократного использования чертежа.* Память ЭВМ хранит библиотеку символов, стандартов, геометрических форм. В состав чертежа входит ряд компонентов, имеющих одинаковую форму. Запоминание этих компонентов и многократное их использование позволяют повысить эффективность проектирования.

5) *Специальные чертежные средства.* Исследование объекта в трехмерном пространстве, в динамике.

6) *Ускорение расчетов и анализа при проектировании.* Разнообразное и математическое обеспечение позволяют произвести расчет заранее.

7) *Высокий уровень проектирования.* Средства ЭВМ позволяют оптимизировать объект проектирования, перебрать варианты.

8) *Сокращение затрат на усовершенствование.* Средства имитации и анализа в САПР позволяют усовершенствовать прототип.

9) *Интеграция проектирования с другими видами деятельности:* АСНИ, АСТПП, ГАП. АСТПП (автоматизированная система технологической подготовки производства — станки с ЧПУ; изготовление и сборка ЭВМ с помощью роботов; гибкие производственные системы (ГПС); средства автоматизированного тестирования).

ЧАСТЬ 3

ТЕХНИЧЕСКОЕ, ПРОГРАММНОЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В третьей части рассмотрены технические средства систем автоматизированного проектирования вычислительных машин. Описаны базы данных, этапы их проектирования, модели, системы управления базами данных и средства обработки. Дан анализ современных требований к системам проектирования, предложена архитектура интеллектуальных САПР. Представлены количественные и качественные характеристики интеллектуальных систем проектирования, различные методы структурного и параметрического синтеза.

1.ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

1.1.ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ САПР

Техническое обеспечение (ТО) САПР совместно с программным обеспечением (ПО) является инструментальной базой САПР, в среде которой реализуются другие виды обеспечения САПР. Компоненты ТО САПР включают в себя средства вычислительной техники и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства или их сочетания, обеспечивающие функционирование САПР. Совокупность компонентов ТО образует комплекс технических средств (КТС). Требования к составу и структуре КТС формируются из общих требований к структуре САПР; эффективного решения выделенного класса задач проектирования; активного включения пользователя в процесс проектирования; возможности работы с графическим материалом, включает процессы ввода и вывода, обработки информации. Классификация КТС САПР представлена на рис. 1.1.

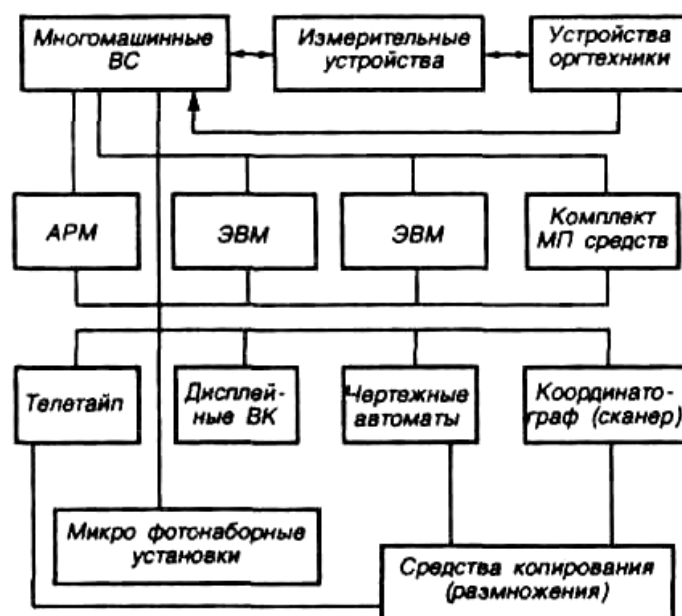


Рис.1.1 – Классификация КТС САПР

КТС САПР объединены в группы взаимодействия оборудования. Группа

базовой конфигурации — это максимальный состав, позволяющий решать задачи определенного класса. Основным компонентом базовой конфигурации является автоматизированное рабочее место (АРМ).

1.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ КТС САПР

Режимы работы зависят от задач, решаемых в САПР. По характеру *вычислительного процесса*, задачи решаются без участия пользователя и с участием пользователя.

С учетом сложностей вычисления задачи требует несколько секунд, минут и время значительно больше чем время диалога.

По объему информации задачи используют основную память ЭВМ и частично внешнюю память ЭВМ. Исходя из этой классификации выделяют следующие необходимые режимы работы технических средств:

- 1) однопрограммный, когда доступны все ресурсы ЭВМ;
- 2) мультипрограммный с фиксированным количеством задач; при таком режиме оперативная память ЭВМ делится на фиксированное число разделов, которые определены для выполнения одной задачи в каждом;
- 3) мультипрограммный режим с переменным числом задач, все ресурсы ЭВМ общие.

Режимы работы КТС классифицируют по удалению проектировщика основного компонента технических средств:

- местный режим — пользователь непосредственно у ЭВМ;
- дистанционный режим, при котором часть периферийного оборудования связана с процессором канала связи.

Режимы КТС классифицируются по степени участия пользователей в процессе решения задачи:

- пакетный режим — пользователь составляет задание в составе пакета, обработка задач производится по очереди; после решения пользователю требуется проанализировать результаты и подготовить новый вариант решения, что замедляет отладку и увеличивает время получения окончательного результата;
- режим разделения времени (РРВ) — каждой решаемой задачи выделяется поочередно определенный квант времени работы процессора; пользователь за АП (терминалом) составляет программу, транслирует, редактирует и выполняет расчеты на ней.

От выбора режима использования КТС САПР зависит эффективность эксплуатации технических средств. Поэтому при создании САПР определенного уровня ЭВМ, комплекса, системы или сети необходимо провести четкий анализ решаемых задач.

Пакетный режим — для задач с большим временем счета и задач, не требующих вмешательства в процесс решения пользователя.

Режим разделения времени удобен для задач, время счета у которых соизмеримо с временем отклика пользователя на запрос ЭВМ, а также в том числе, когда необходимо вмешательство пользователя в процесс решения.

1.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МАШИННОЙ ГРАФИКИ

Технические средства машинной графики классифицируются по следующим признакам: назначению, степени автоматизации, методу обработки информации, способу отсчета текущих координат (рис. 1.2.). Устройства ввода графической информации увеличивают производительность труда, повышают достоверность кодируемой информации. В полуавтоматических устройствах кодирование информации происходит при участии человека, который, перемещая регистрирующий орган, обходит последовательно все элементы графического документа.

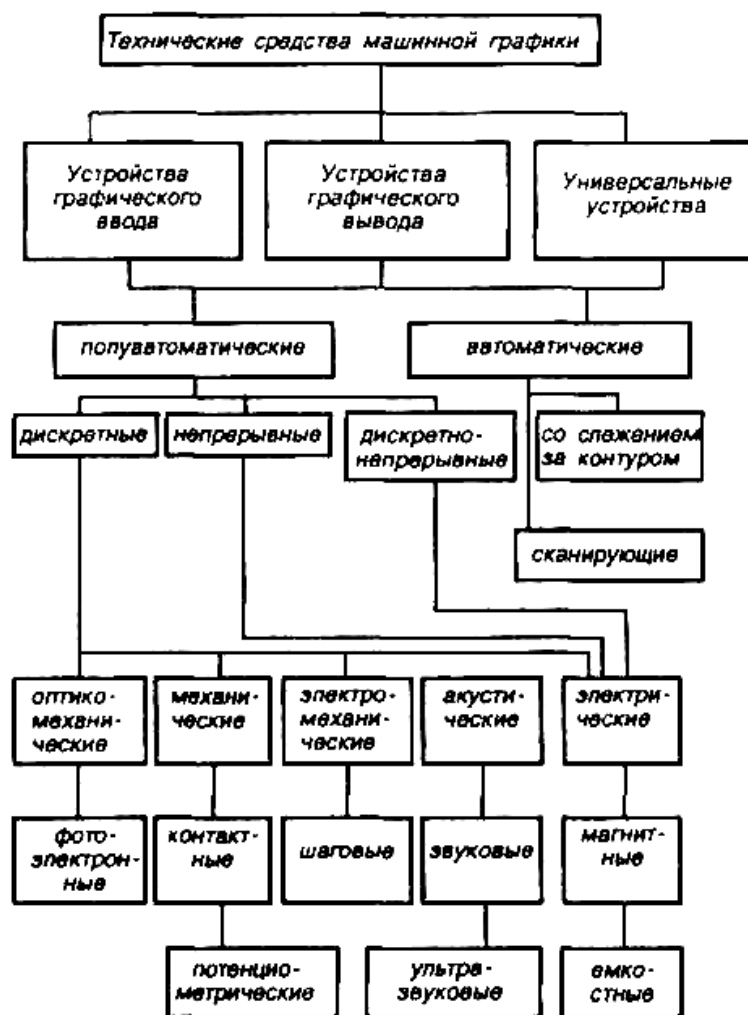


Рис. 1.2 – Технические средства машинной графики

Перемещение регистрирующего органа фиксируется. Применяются дополнительные панели ввода графической информации (клавиатура, сканер, мышь) — это устройства различных типов, например: ПАСГИ, ЭМ-709, ГАРНИ, Benson, Calcomp и др.

Полуавтоматические устройства ввода графической информации сопрягаются с ЭВМ, выполняющими контроль ошибок, допущенных оператором, позволяют выбирать фрагменты из библиотеки элементов, ранее введенных участков изображения, и осуществляют оперативный вывод закодированной информации. Существуют системы QED и IED фирмы Quest Automation и системы Anistigid фирмы Anisto, которые выполняют такие операции.

Автоматические устройства ввода графической информации характеризуются большим быстродействием и отсутствием несистематических ошибок, но для их работы требуются графические документы высокого класса и точности.

По методу считывания различают устройства непрерывного, дискретного и непрерывно-дискретного действия. Для графической информации большого объема желательно использовать дискретные устройства, обладающие более жесткими требованиями к точности. В зависимости от способа отсчета текущих координат УВГИ разделяются на электромеханические, оптико-механические, магнитные, контактные и звуковые.

Сканирующие устройства служат для преобразования глиняной модели в эквивалентную математическую модель, которая формируется в ЭВМ в результате съемки параметров глиняной модели. Щуп сканирующего устройства, перемещаемый по поверхности глиняной модели, представляет собой светочувствительный элемент, который замыкается при касании поверхности модели. Для каждой точки соприкосновения происходит автоматическая запись ее координат, рассчитанных относительно некоторой базовой точки. Таким образом, из совокупности тысяч дискретных точек глиняной модели сканирующее устройство формирует трехмерный образ, например корпуса автомобиля. Результаты съемки размеров модели поступают в мини-компьютер, соединенный с устройством сканирования, которое способно записывать трехмерные координаты со скоростью 4 точки в секунду, автоматически увеличивая плотность измерений при съемке критических областей.

После введения данных в компьютер они могут выводиться на экран дисплея и подвергаться дальнейшей обработке. Таким же образом можно получить комбинацию из нескольких наиболее удачных конструктивных решений. Щуп устройства сканирования можно заменить на фрезу, с помощью которой автоматически формируется вторая половина модели по данным, воспроизводимым при сканировании.

Представителями группы устройств вывода графической информации (рис. 1.3) являются чертежные автоматы, позволяющие получить документацию в виде чертежей, графиков, схем, диаграмм. Классификацию чертежных автоматов можно провести по следующим признакам: способу программного управления; методу обработки данных; принципу действия исполнительного механизма.

Чертежные автоматы работают как в автономном режиме от машинных носителей информации, так и непосредственно от ЭВМ (Benson серии 100, 200, 300). Недостатки чертежных автоматов: малое быстродействие; низкая надежность. Чертежные автоматы входят в комплекс периферийных устройств со своей малой ЭВМ, которая сопрягается с вычислительными устройствами.

Чертежные автоматы типа «Итекан», различны по назначению, программному управлению и конструктивному исполнению. Изображение вычерчивается цветными чернилами, тушью или карандашом на обычной бумаге или кальке линиями различной толщины. Размеры рабочего поля

818x40000 мм, скорость вычерчивания 40 мм/с.

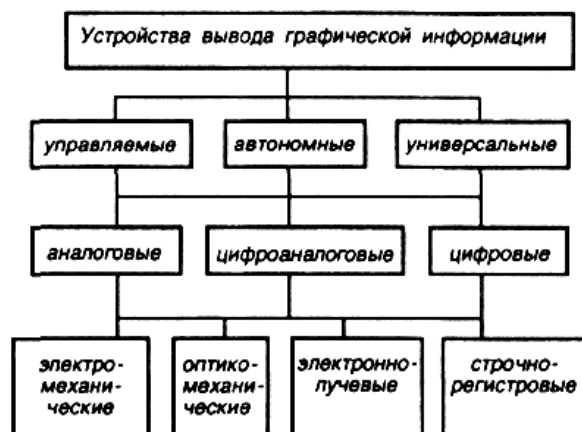


Рис. 1.3 – Устройство вывода графической информации

К устройствам графического вывода информации относятся программно-управляемые координатографы, предназначенные для изготовления прецизионных фото оригиналов печатных плат, полосковых, микрополосковых линий. От чертежных автоматов координатографы отличаются повышенной точностью и способом нанесения изображения. Изображение наносится экспонированием, вырезанием, гравированием, скрайбированием и другими способами.

Программно-управляемые координатографы отличаются большими размерами рабочего поля. Управление осуществляется через каналы связи или с помощью промежуточных носителей информации.

Координатограф КПА-1200 предназначен для изготовления фотошаблонов микросхем и печатных плат. В состав координатографа входят: фотосчитыватель; пульт управления; координатный стол с размерами рабочего поля 1200x1200 мм; устройство управления с блоками ввода информации; операционное устройство; интерполятор; блок задания скоростей; блок обработки информации; блок ориентации инструмента; блок технологических операций; блок управление приводом; цифровая индикация; блок центрального управления.

Скорость перемещения от 25 до 90 мм в секунду.

Наиболее перспективные устройства ввода-вывода графической информации — дисплеи. Скорость обмена информации этих устройств сравнима со скоростью обработки информации в ЭВМ.

Дисплеи классифицируются по признакам:

- назначение и вид выводимой информации;
- метод формирования изображения;
- физические принципы создания информации.

Дисплеи служат для обработки символьной информации (высокая надежность и экономичность).

Сканеры осуществляют ввод изображения по контуру рисунка. Дисплеи позволяют выводить на экран графические изображения, имеют широкий набор встроенных функций преобразования информации: сдвиг, масштабирование, поворот, редактирование и мультиплексирование.

1.4. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СОПРОЦЕССОРЫ

Для решения задач САПР применяют специализированные ЭВМ. Создание таких СВС оправдано, если достигаемый с их помощью экономический эффект превышает затраты на разработку и эксплуатацию. Целью создания специализированных ЭВМ является повышение производительности труда проектировщика.

Основная идея создания заключается в аппаратной реализации типовых методов решения задач проектирования (замена программ схемами). Частые обращения к программам приводят к большим затратам машинного времени, а при замене схемами имеют большой выигрыш во времени. Другой путь повышения производительности связан с применением параллельной обработки информации.

Способы реализации специализированных ЭВМ:

- 1) расширение системы команд универсальных ЭВМ путем включения команд вычисления часто встречающихся функций (например, $y = \sin X$, $y = \ln X$);
- 2) разработка периферийных процессоров (приставок), подключаемых к универсальной ЭВМ для реализации специализированных вычислительных процедур (например, трассировки печатной платы) или операций;
- 3) создание специализированных ЭВМ или сопроцессора, структура которого ориентирована на решение узкого класса задач большой сложности.

По функциональному назначению специализированные ЭВМ разделяются на группы:

- 1) ЭВМ и процессоры для решения частных простых задач проектирования;
- 2) ЭВМ и СВС для выполнения отдельных проектных процедур;
- 3) ЭВМ и процессоры для обеспечения удобного взаимодействия с проектировщиком (например, графический процессор);
- 4) процессоры для обеспечения отладки задач проектирования (эмулятор системы команд ЭВМ для отладки программ на уровне АРМ);
- 5) ЭВМ и процессоры для решения задач структурной организации КТС САПР (ЭВМ-СУБД, ЭВМ-шлюзы для связи локальных и глобальных ВС).

1.5. РЕЧЕВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ СВЯЗИ ПРОЕКТИРОВЩИКА

Средства речевого ввода недостаточно совершенны, но постоянно модернизируются. *Активный речевой терминал* (типа MIKE) применяется для оперативного сообщения об аварийных ситуациях, а также для указания пароля при входе в систему. *Пассивный речевой терминал* (типа LISA) выделяют из информационного потока адресованные им речевые команды и данные, не мешая обычной работе за дисплеем. Включается синтезатор речи обычно между дисплеем и центральным процессором. Для генерации фразы он использует специальный словарь (несколько сот слов или фраз). Чтобы устройство не мешало работе других проектировщиков, предусмотрен головной телефон (наушники).

1.6. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ САПР

Локальную вычислительную сеть (ЛВС) объединяют в единую информационную систему АРМ, ЭВМ, графопостроители, терминальные станции и другую специализированную аппаратуру. ЛВС имеют открытую архитектуру, обеспечивающую возможность подключения к сети любых других ЛВС. Основное достоинство — низкая стоимость системы передачи данных. ЛВС САПР обеспечивают:

- 1) использование режимов пакетной и диалоговой обработки, разделения времени, виртуальной памяти;
- 2) экономичную обработку информации по принципу «наиболее важные процессы САПР выполняются КТС с высокой производительностью, меньше всего на дешевых ЭВМ»;
- 3) высокую надежность и достоверность функционирования, высокую производительность;
- 4) применение разнообразного проблемно-ориентированного ПО, централизованных и локальных БД;
- 5) работу с АРМ различного назначения;
- 6) Централизованную и децентрализованную обработку информации.

Использование ЛВС позволяет создать САПР нового поколения, объединяющие контрольно-измерительные комплексы и места сбора информации с АРМ конструкторов, механиков и т. д. Основное назначение ЛВС — распределение ресурсов ЭВМ (программ, периферийных устройств, терминалов, памяти) для эффективного решения задач САПР. ЛВС должна иметь надежную, быструю и дешевую систему передачи данных (СПД). Для достижения этого ЛВС выполняется на основе следующих принципов.

7) *Принцип единых протоколов.* Протоколы межмашинной связи в ЛВС предназначены для организации обмена информацией между компонентами сети. Протоколы сети определяют форму сообщения или пакета сообщений (длину, заголовков, знак окончания, дополнительную информацию для повышения достоверности передачи информации и др.). Все процедуры управления и соответствующие им протоколы едины для всей сети и не зависят ни от типа ЭВМ, ни от происходящих в них процессов.

8) *Принцип единой передающей среды.* При построении СПД для ЛВС используют активную или пассивную структуру передающей среды. Активная структура выполняется на основе распределенных усилителей и преобразователей, обеспечивающих передачу информации в параллельном и последовательном кодах. Пассивная структура выполняется на основе пассивного носителя (коаксиального либо плоского кабеля) и использует преобразователи-усилители одного типа, обеспечивающие возможность работы либо в параллельном, либо в последовательном коде.

Структура передающей среды реализована с применением либо моноканала, либо многопроводной связи. Более дешевой является структура с моноканалами, так как снижаются издержки на эксплуатацию и прокладку соединений. Моноканалами являются физическая среда, аппаратные и программные средства, предназначенные для параллельной передачи одновременно всем абонентским системам. Моноканал предназначен для

коллективного использования большим числом абонентских систем (с высокой пропускной способностью передачи информации). Физическая среда моноканала реализуется посредством волоконно-оптических линий связи, коаксиальных или плоских кабелей, скрученных пар проводов и т. д.

9) *Принцип единого метода управления.* Протоколы ЛВС применяют централизованные и децентрализованные формы управления одноузловой структурой моноканала. Принцип единого метода управления проявляется в выборе одной из этих форм, обеспечивающей достаточную надежность работы СПД и максимальную загрузку каналов связи. При этом для определения метода управления следует учитывать структуру соединений, их длину, число абонентов и сложность обработки информации с помощью ресурсов ЛВС.

Для централизованных форм управления характерны обилие служебной информации и приоритетность подключаемых к моноканалу станций. Защита от конфликтов в моноканале реализуется центральной управляющей вычислительной машиной. В децентрализованных формах управления, допускающих одинаковый приоритет всех станций, подключаемых к моноканалу, применяют многоступенчатые тракты защиты от конфликтов, учитывающие противоречивые требования надежности и максимальной загрузки моноканала. При использовании в ЛВС нескольких методов управления средой передачи данных существенно увеличивается сложность схемных решений контроллеров, с помощью которых станции ЛВС подключаются к СПД.

10) *Принцип информационной и программной совместимости* предусматривает совместимость операционных систем, программ и систем управления базами данных, рассредоточенных в рамках ЛВС (возможность адаптации процессов к пересылаемой информации и применения единых систем кодирования и контроля информации).

11) *Принцип гибкой модульной организации* предусматривает проектирование СПД ЛВС на основе набора гибких конструктивно законченных модулей. ЛВС классифицируются (рис. 1.4):

- *по топологическим признакам* — иерархической, кольцевой и звездообразной конфигурации, конфигурации типа «общая шина»;
- *по методам управления ресурсами СПД*, т. е. с детерминированным и случайным доступом к моноканалу;
- *по программному обеспечению* — с единой операционной поддержкой и едиными методами теледоступа, ориентированными на конкретную ЛВС и ЛВС с наборами компонентов поддержки;
- *по методу передачи данных* — сети с коммутацией каналов, с коммутацией сообщений и коммутацией пакетов, при чем в современных ЛВС характерно использование коммутации пакетов;
- *по техническому обеспечению* — гомогенные (применение в станциях однотипного оборудования), и гетерогенные (подключение любых абонентских комплексов) ЛВС.

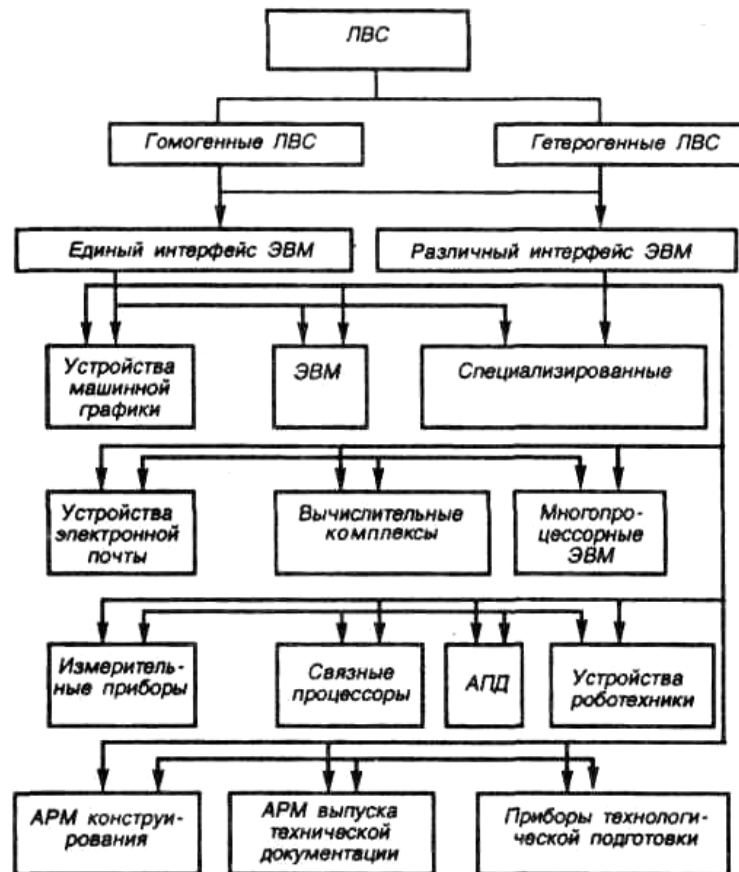


Рис. 1.4 – Классификация ЛВС

Анализируя способы реализации технического обеспечения САПР на базе стандартных многоуровневых структур вычислительных систем коллективного пользования и на базе ЛВС, можно сделать следующие выводы. Сетевая архитектура по сравнению со стандартной многоуровневой имеет ряд преимуществ:

- 1) возможность взаимодействия с одного и того же терминала с ресурсами всех рабочих и терминальных машин ЛВС;
- 2) обеспечение высокой надежности обработки путем замены вышедшей из строя рабочей машины резервной;
- 3) повышение эффективности функционирования ЭВМ за счет их специализации на выполнение определенных функций хранения и управления данными, геометрического моделирования, подготовки управляющей информации для программного управляемого оборудования.

2. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

2.1. БАЗЫ ДАННЫХ В САПР

Основу ИО САПР составляет совокупность данных, которые необходимы для выполнения процесса проектирования. Совокупность данных, используемых всеми элементами САПР, называется *информационным фондом*. В этом фонде выделяют БД и архивы. Архивами пользуются редко и их помещают в долговременные ЗУ. Но в определенные моменты времени содержимое архивов помещают в БД. Информационное обеспечение представляет собой совокупность информационного фонда и средств его

ведения. Основное назначение ИО состоит в создании, поддержки и организации доступа к данным. Ядром ИО является БД, которая в САПР играет роль инструмента, объединяющего отдельные элементы.

Базой данных называется структурированная совокупность связанных данных конкретной предметной области разнообразного назначения, в которой отражаются состояния объектов, их свойства и взаимоотношения.

Данные несут информацию об объектах, которые могут быть материальными (схема, плата) и нематериальными (методы оптимизации). Каждый объект характеризуется *атрибутами*. Например, объект ЭВМ можно характеризовать скоростью вычисления, объемом оперативной памяти, числом элементарных операций, числом процессоров, габаритными размерами, количеством мультимплексных каналов. Сведения, содержащиеся в каждом атрибуте, называют *значениями данных*. Каждый объект характеризуется рядом основных атрибутов (*элементов данных*). Среди элементов данных выделяют *ключевые*, по которым можно определить другие атрибуты объекта. Например, если известен заводской номер ЭВМ, то можно определить какая это вычислительная машина, ее скорость и т. д. Объединение значений связанных атрибутов называют *записью данных* (ф.и.о., должность). Упорядоченную совокупность записей данных называют *файлом данных* или *набором данных*. *База данных* — совокупность файлов, отображающая состояние объектов и их отношений в условиях САПР, совокупность файлов специально организованная и обрабатываемая с целью создания массивов данных, их обновление и получение справок (СУБД). Основное различие между БД и файлом данных состоит в том, что файл данных имеет несколько назначений, но соответствует одному представлению хранимых данных, а база данных имеет также несколько назначений, но соответствует различным представлениям о хранимых данных.

Требования к БД:

- 1) целостность данных — их непротиворечивость и достоверность;
- 2) организация БД должна обеспечивать согласование времени выборки данных прикладными программами с частотами их использования прикладными программами САПР;
- 3) универсальность, т. е. наличие в БД всех необходимых данных и возможность доступа к ним в процессе решения проектной задачи;
- 4) открытость БД для внесения в нее новой информации;
- 5) наличие языков высокого уровня взаимодействия пользователей с БД;
- 6) секретность, т. е. невозможность несанкционированного доступа к информации и ее изменений;
- 7) оптимизация БД — минимизация избыточности данных.

Одним из принципов построения САПР является информационная согласованность частей ее программного обеспечения, т. е. пригодность результатов выполнения одной проектной процедуры для использования другой проектной процедуры без их трудоемкого ручного преобразования пользователем. Отсюда вытекают следующие условия информационной согласованности:

- использование программами одной и той же подсистемы САПР

единой БД;

- использование единого внутреннего языка для представления данных.

Единство информационного обеспечения достигается либо созданием единой БД, либо сопряжением нескольких БД с помощью специальных программ, которые перекодируют информацию, приводя ее к требуемому виду. Части ПО и методы, осуществляющие управление базой данных, составляют *систему управления базами данных*. СУБД позволяет получить доступ к интегрированным данным и допускает множество различных представлений о хранимых данных. Программное обеспечение, которое позволяет прикладным программам работать с БД без знания конкретного способа размещения данных в памяти ЭВМ называют СУБД (рис. 2.1.).



Рис. 2.1 – Схема СУБД

СУБД выступает как совокупность программных средств, предназначенных для создания, ведения и совместного использования БД многими пользователями. СУБД должна обеспечивать простоту физической реализации; возможность централизованного и децентрализованного управления БД; минимизацию избыточности хранимых данных; предоставление пользователю по запросам непротиворечивой информации; простоту разработки, ведение и совершенствование прикладных программ; выполнение различных функций.

СУБД реализует два интерфейса:

- 1) между логическими структурами данных в программах и в БД;
- 2) между логической и физической структурами БД.

Опишем порядок работы СУБД в одном из режимов:

- 1) программа запрашивает возможность чтения данных у СУБД, она передает необходимую информацию о программисте, типе записи;
- 2) программа осуществляет поиск описания данных, на которые выдан запрос;
- 3) определяет, какого типа логические и физические записи необходимы;
- 4) выдает ОС запрос на чтение требуемой записи;
- 5) ОС взаимодействует с физической памятью;
- 6) записывает запрошенные данные в системные буферы;
- 7) выделяет требуемую логическую запись, выполняя необходимые преобразования;

- 8) передает данные из системных буферов в программу пользователя, а затем программе пользователя информацию о результатах выполнения запроса;
- 9) прикладная программа обрабатывает полученные данные.

2.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗ ДАННЫХ

Процесс разработки структуры БД на основании требований пользователя называют проектированием БД. Результатом проектирования БД является структура БД, состоящая из логических и физических компонент, и руководство для прикладных программистов.

Жизненный цикл БД делится на стадии анализа, проектирования и эксплуатации.

Анализ — формулирования требований, концептуального проектирования — основная цель обеспечить согласованность целей пользователей и представлений об информационных потоках.

Проектирование — реализация БД, анализ функционирования и поддержки, модификация и адаптация.

Логическое проектирование: проектирование БД и программ — результатом является логическая структура БД и функциональное описание программных модулей и наборы запросов БД.

Физическое проектирование: выбор физической структуры БД и отладка программных модулей, полученных при проектировании программ, — результатом является подготовка к эксплуатации БД.

Реализация БД — задача разработки программ доступа к БД.

Языки, используемые в БД: языки описания данных (ЯОД) и языки манипулирования данными (ЯМД). ЯОД определяет различные типы записей, их имена, форматы, служит для определения типов элементов данных, которые нужны в качестве ключей; отношений между записями или их частями; типа данных, которые используются в записях; диапазона их значений; числа элементов, их порядка; режима доступа.

Различают три уровня абстракции для описания данных:

- концептуальный (с позиции администратора);
- реализации (с позиции программиста и пользователя);
- физический (с позиции системного программиста).

На концептуальном уровне описывают объекты, атрибуты и значения данных. На уровне реализации имеют дело с записями, элементами данных и связями между записями. На физическом уровне оперируют блоками, указателями, данными переполнения, группировкой данных. ЯМД дает возможность манипулирования данными без знания несущественных для программиста подробностей. Они могут реализовываться как расширение языков программирования общего назначения путем введения в них специальных операторов или путем реализации специального языка.

Процесс проектирования БД начинают с построения *концептуальной модели* (КМ), которая состоит из описания объектов и их взаимосвязей без указания способов физического хранения. Построение КМ ведется с анализа данных об объектах и связей между ними, сбора информации о данных в существующих и возможных прикладных программах. КМ является моделью

предметной области.

Версия КМ обеспечиваемая СУБД, называется *логической моделью* (ЛМ). Подмножества ЛМ, которые выделяются для пользователей, называются *внешними моделями* (подсхемами). ЛМ отображается в физическую, которая описывает размещение данных и методы доступа. Физическую модель называют *внутренней*.

Внешние модели не связаны с используемыми КТС и методами доступа к БД (рис. 2.2). Они определяют первый уровень независимости данных. Второй уровень независимости данных связан с отсутствием изменений внешних моделей при изменении КТС (КМ). При разработке и проектировании БД важным является *словарь данных* (СД), который предназначен для хранения сведений об объектах, атрибутах, значениях данных, взаимосвязях между ними, их источниках, форматах представления. СД позволяет получить информацию обо всех ресурсах данных. Назначение СД — документирование данных, централизованное ведение и управление данными, взаимодействие между разработками САПР. Словарь данных (рис. 2.3) может быть в виде части пакета программ СУБД или отдельного пакета программ в виде дополнения к СУБД.

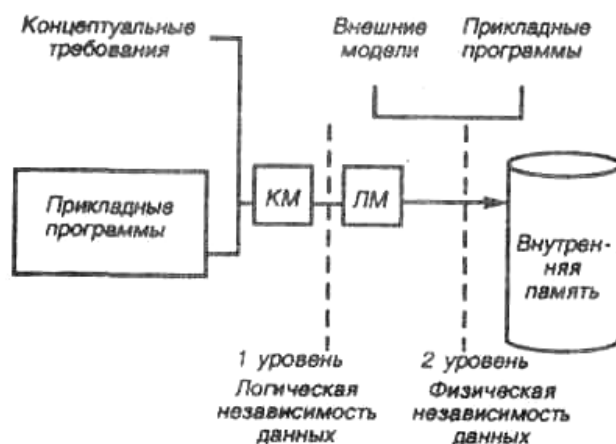


Рис. 2.2 – Логическая и физическая независимость данных

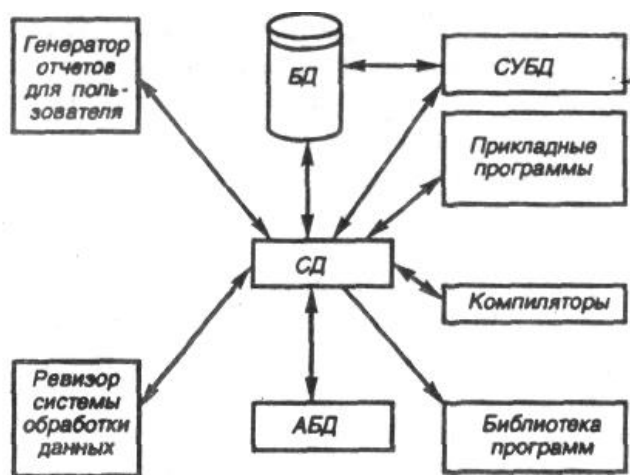


Рис. 2.3 – Интерфейсные СД в системе с БД

СД — связующее звено в ПО обработки данных, которое включает в себя процессор, СУБД, языки запросов, монитор телеобработки. СД обязаны поддерживать КМ, ЛМ, внешнюю и внутреннюю модели; обеспечивать обмен информации с СУБД и процесс изменений БД. Словарь данных имеет свою БД

которая включает в себя атрибут; объект; групповой элемент данных; выводимый объект данных; *синонимы*, т. е. атрибуты, имеющие одинаковое назначение, но различные идентификаторы; *омонимы*, т. е. атрибуты с различным назначением, но с одинаковыми идентификаторами; описание КМ, ЛМ, внешних и внутренних моделей; описание, позволяющее пользователям формально и однозначно выбирать атрибуты для решения задач. При проектировании БД (рис. 2.4) выполняется идентификация основных объектов предметной области и прикладных программ, подлежащих использованию; определяются объекты и их взаимосвязи; разрабатываются СД, КМ, ЛМ, ФМ с проведением анализа и оценок.

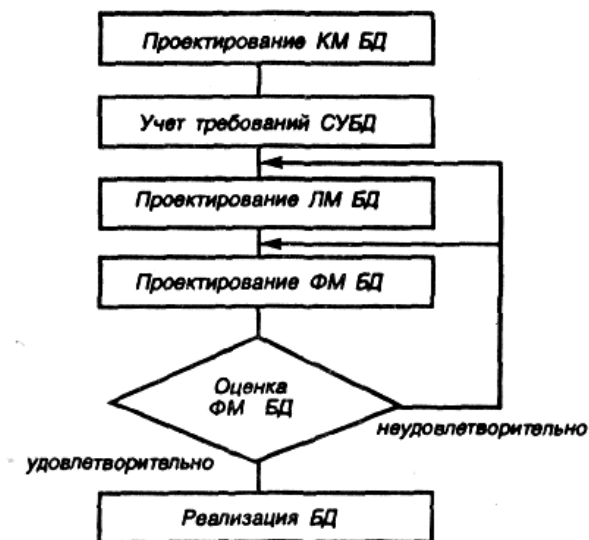


Рис. 2.4 – Структурная схема проектирования БД

Например, концептуальное структурное представление информации (ISP-информация) не связано с конкретными способами обработки и приложениями, а описывает концептуальные связи в БД:

<i>Описание сущности</i>	
наименование	ЭВМ
количество	10
<i>Описание атрибута</i>	
наименование	номер
скорость вычислений	5 000 000 оп/с
вероятность существования	1,0
<i>Описание связи</i>	
наименование	—
сущность	работает на ВЦ
отображение	1 : 1
вероятность существования	1,0

Информация, описывающая концептуальное представление (UP-информация), определяет требование организации к обработке данных и описывает данные и связи:

Описание процесса

наименование	компоновка
частота применения	еженедельно
вероятность применения	1,0
приоритет	высший
требуемые данные	схема
правила проектирования	ГОСТ
объем данных	100 схем
<i>Оператор</i>	
оператор	разбивка
критерий поиска	минимум внешних связей
вероятность события	1,0

Концептуальное представление информации обеспечивает эффективность проектирования, структурное представление информации создает гибкость и адаптивность.

2.3. МОДЕЛИ ДАННЫХ

Современные СУБД основываются на использовании моделей данных (МД), позволяющих описывать объекты предметных областей и взаимосвязи между ними. Существуют три основные МД и их комбинации, на которых основываются СУБД: реляционная модель данных РМД, сетевая модель данных (СМД), иерархическая модель данных (ИМД).

Основное отличие между МД состоит в описании взаимодействий между объектами и атрибутами. Взаимосвязь выражает отношение между множествами данных, используя взаимосвязи «один к одному», «один ко многим», «многие ко многим».

«Один к одному» — это взаимно однозначное соответствие, которое устанавливается между одним объектом и одним атрибутом. Например, в определенный момент времени в одной ЭВМ используется один определенный процессор. Номеру выбранной ЭВМ соответствует номер выбранного процессора.

«Один ко многим» — соответствие между одним объектом и многими атрибутами.

«Многие ко многим» — соответствие между многими объектами и многими атрибутами. Например, на множестве ЭВМ может одновременно работать множество пользователей. Взаимосвязи между объектами и атрибутами удобно представлять в виде графов и гиперграфов.

2.3.1. РЕЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ

Реляционная модель данных (РМД) — это где объекты и взаимосвязи между ними представляют в виде таблиц, и операции взаимодействия между данными осуществляются по правилам реляционной алгебры (объединение $\cup$, пересечение, вычитание $\setminus$, декартово произведение $\times$, проекция, ограничение, соединение, деление).

Основу РМД составляют данные, сформированные в виде таблиц. Формальным аналогом таблицы является отношение. Напомним, что для совокупности множеств $D_1, \dots, D_n$ отношением R является некоторое подмножество декартова произведения этих множеств:

$$R \subseteq D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n,$$

где множество D_i - сомножители; n — степень отношения R ; декартово произведение $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$ — домен. Из домена извлекают фактические значения. Набор конкретных значений R называется *кортежем*. Если кортежи записать друг под другом и обозначить столбцы, то получается *таблица*.

Например, $D_1 = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, $D_2 = \{b_1, b_2, b_3\}$

Тогда $D_1 \times D_2 = \{(a_1b_1), (a_1b_2), (a_1b_3), \dots, (a_4b_3)\}$ содержит 12 элементов — пар вида $(a_i b_j)$.

Пусть $R = \{(a_2b_2), (a_4b_1), (a_4b_2)\}$

Тогда R можно записать в виде таблицы (табл. 2.1.), где $A_1 = \{a_2b_4\} \subset D_1$, $A_2 = \{b_1b_2\} \subset D_2$.

Таблица 2.1 Представление множества

A_1	A_2
a_2	b_2
a_4	b_1
a_4	b_2

В реляционной модели оперируют только с *нормализованными отношениями*, когда каждый столбец сам отношением не является. Ненормализованные отношения приводятся к нормализованной форме путем корректировки обозначений столбцов.

Таблица, состоящая из строк и столбцов, называется *отношением*. Каждый столбец в таблице является атрибутом. Строки таблицы являются *кортежами*, т. е. упорядоченными множествами. Значения в столбце определяются из множества значений, которые принимает атрибут. Столбцы таблицы — элементы данных, а строки — записи. Первичным ключом в таблице является номер этапа проектирования. Таблица имеет два атрибута и шесть кортежей (табл. 2.2.).

Таблица 2.2 Представление данных с помощью РМД

Номер	Этапы проектирования	Атрибуты	
		Сложность	Время реализации
1	Покрытие	$O(n^3)$	минуты
2	Типизация	$O(n^2)$	секунды
3	Компоновка	$O(n^3)$	минуты
4	Размещение	$O(n^3)$	минуты
5	Трассировка	$O(n^4)$	часы
6	Контроль	$O(n^3)$	минуты

Достоинства РМД — простота и доступность. Пользователи абстрагированы от физической структуры памяти. Это позволяет эксплуатировать БД без знания методов и способов ее построения. Также достоинствами РМД являются независимость данных, гибкость,

непроцедурные запросы.

Недостатки РМД: низкая производительность по сравнению с НМД и СМД, сложность ПО, избыточность.

2.3.2. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ

Модель основана на понятии «деревьев», состоящих из вершин и ребер. Вершина «дерева» ставится в соответствие совокупности атрибутов данных, характеризующих некоторый объект. Вершины и ребра «дерева» образуют иерархическую древовидную структуру, состоящую из n уровней (рис. 2.5.).

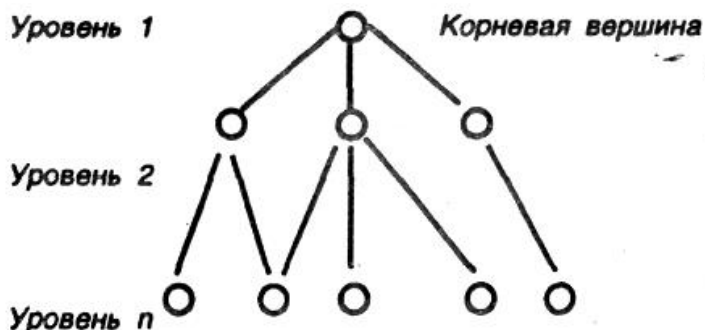


Рис. 2.5 – Пример иерархической древовидной структуры

Первую вершину в «дереве» называют *корневой вершиной*. НМД удовлетворяет следующим условиям:

- 1) Иерархия начинается с корневой вершины.
- 2) Каждая вершина соответствует одному или нескольким атрибутам.
- 3) На уровнях с большим номером находятся зависимые вершины. Вершина предшествующего уровня является начальной для новых зависимых вершин.
- 4) Каждая вершина, находящаяся на уровне I , соединена с одной и только одной вершиной уровня $(I - 1)$, за исключением корневой вершины.
- 5) Корневая вершина может быть связана с одной или несколькими зависимыми вершинами.
- 6) Доступ к каждой вершине происходит через корневую по единственному пути.
- 7) Существует произвольное количество вершин каждого уровня.

ИМД, состоящая из нескольких деревьев, является «лесом». Каждая корневая вершина образует начало записи логической БД. В ИМД вершины, находящиеся на уровне I , называют порожденными вершинами на уровне $(I - 1)$. Рассмотрим пример представления информации в ИМД, реализующей отношение «один ко многим» (рис. 2.6.). Для каждого пользователя может иметься экземпляр корневой вершины. ИМД позволяет для каждого пользователя получать представление о нескольких операциях и нескольких ЭВМ.

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ соответствует корневой вершине и находится на более высоком уровне иерархии, чем ЭВМ, ОПЕРАЦИЯ и РЕЗУЛЬТАТ. Выбор ИМД осуществляет администратор БД на основе операционных характеристик.

Введение двух ИМД, связанных между собой, позволяет решать вопросы включения и удаления данных. Достоинства ИМД: простота построения и использования, обеспечение определенного уровня независимости данных,

наличие существующих СУБД, простота оценки операционных характеристик.

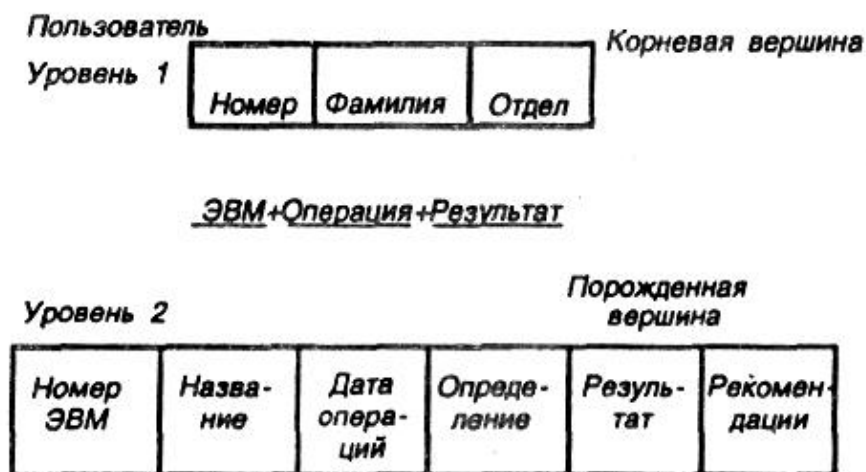


Рис. 2.6. Представление информации в ИМД, реализующей отношение «один ко многим».

Недостатки:

- отношение «многих ко многим» реализуется очень сложно, дает громоздкую структуру и требует хранения избыточных данных, что нежелательно на физическом уровне;
- иерархическая упорядоченность усложняет операции удаления и включения;
- доступ к любой вершине возможен через корневую, что увеличивает время доступа.

2.3.3. СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ

В СМД элементарные данные и отношения между ними представляются в виде ориентированной сети (вершины — данные, дуги — отношения). БД, описываемая сетевой моделью, состоит из нескольких областей. Область содержит записи. Одна запись состоит из нескольких полей. Набор, состоящий из записей, может размещаться в одной или нескольких областях (рис. 2.7).

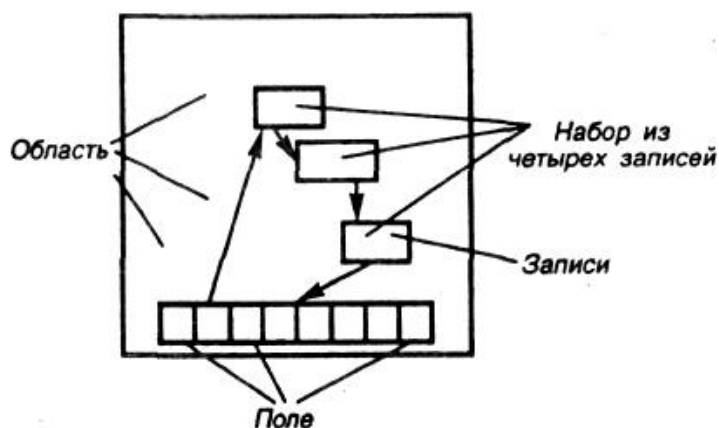


Рис. 2.7 – Пример размещения записей в областях

В СМД объекты предметной области объединяются в сеть. Графически сетевая модель описывается прямоугольниками и стрелками. Каждый тип записи может содержать несколько атрибутов. На рис. 2.8. показан пример представления области в СМД. Здесь область — это часть БД, в которой

располагаются записи, наборы и части наборов. Стрелками соединены несколько типов записей, изображающих типы набора. Тип набора предоставляет логическую взаимосвязь «один ко многим». Рассмотрим экземпляр набора в СМД (рис. 2.9). Каждый экземпляр набора ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ — ВЫПОЛНИЛ — ПРОЦЕДУРУ реализует иерархическую связь между пользователем и операцией.

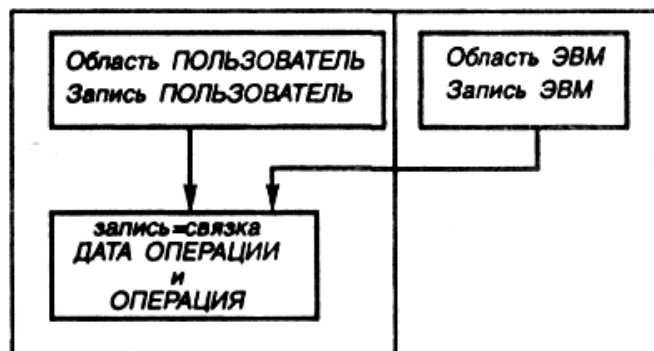


Рис. 2.8 – Пример представления в СМД

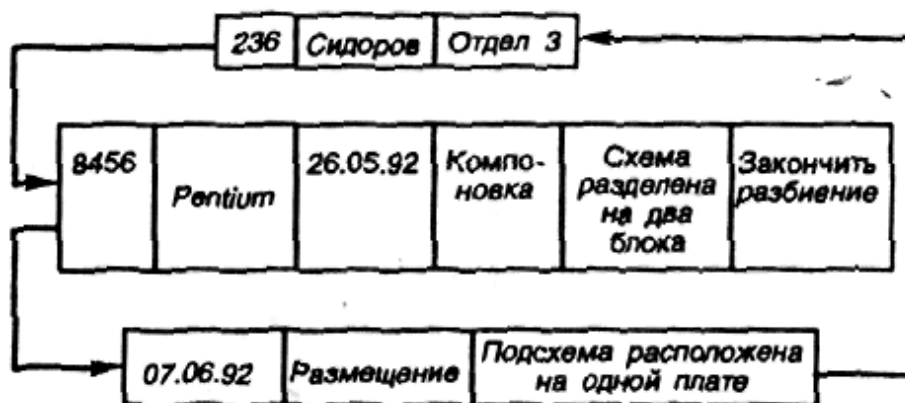


Рис. 2.9 – Экземпляр набора в СМД:
ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ – ВЫПОЛНИЛ - ПРОЦЕДУРУ

Важное отличие СМД от НМД состоит в том, что в СМД каждая запись может быть в любом числе наборов и может находиться как на верхнем, так и на нижнем иерархическом уровне. Следовательно, любая запись может быть задана как точка входа.

Существует три типа наборов:

а) первый тип образуется типами записей: ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ и ОПЕРАЦИЯ (рис. 2.10, а);

б) второй тип образуется из трех и более записей и называется многочисленным (рис. 2.10, б);

в) третий тип представляется сингулярными наборами и объединяет записи, у которых нет корневой вершины, но которые могут иметь ее впоследствии (рис. 2.10, в).

Достоинства СМД — наличие реализованных СУБД обеспечивающих; простота реализации отношений «многие ко многим».

Недостаток СМД — сложность. При реорганизации БД возможна потеря независимости данных.

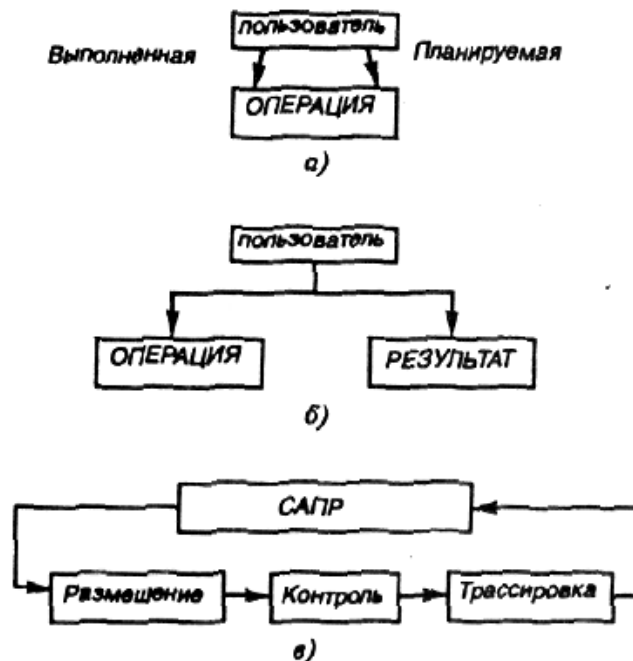


Рис. 2.10 – Виды записей в СМД:

а – тип записи; б – многочисленный тип; в – тип сингулярных наборов

2.4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ

Задачи автоматизации проектирования и производства связаны с хранением значительного объема информации в виде единообразных записей и сравнительно простой их обработкой для извлечения новой информации в удобной для пользователя форме. Предназначенные для этого программные средства обычно объединяются под общим названием *системы управления базами данных* (СУБД), в котором под *базой данных* понимается совокупность взаимосвязанных и хранящихся в удобном для использования виде данных.

Наилучшая форма организации данных зависит как от их содержания, так и от того, как эти данные должны использоваться. Например, существуют немало СУБД, предназначенных для обработки списков, содержащих разные сведения о перечисленных в этих списках людях. Эти СУБД существенно различаются в зависимости от того, какие сведения о каждом лице имеются в списке (в зависимости от логической структуры данных), и от того, как осуществляется поиск того или иного лица.

Вообще, *логической структурой данных* принято называть конкретные логические взаимосвязи между данными, обусловленные содержанием этих данных. Например, логической структурой стипендиальной ведомости студенческой группы является взаимосвязь каждой фамилии студента с величиной его стипендии и взаимосвязь всех перечисленных в ведомости фамилий с номером группы.

Совокупность количества взаимосвязанных данных (или, как их еще называют, *полей*) принято называть *логической записью*, а совокупность логических записей данного вида — *файлом*. Таким образом, каждая точка стипендиальной ведомости образует отдельную логическую запись, состоящую из двух полей — фамилии и величины стипендии (например, ИВАНОВ 9000), а вся ведомость образует файл.

В базе данных может одновременно храниться много различных файлов, поэтому пользователь присваивает каждому файлу свое имя. Всякая БД должна храниться в ЗУ ЭВМ. Поэтому форма организации данных зависит не только от логической структуры, но и от ее физического представления, т. е. от способа хранения данных в памяти ЭВМ. Порцию данных, которую СУБД считывает из ЗУ или записывает в ЗУ как единое целое, принято называть *физической записью*.

Одной из самых важных функций СУБД является поиск логической записи в файле. Поиск производится по ключу, который может состоять из поля, части поля, из комбинации полей. Например, при поиске величины стипендии студента по фамилии ИВАНОВ ключом является фамилия ИВАНОВ.

2.4.1. КАТЕГОРИИ БАЗ ДАННЫХ

По характеру связи между логическими записями, полями и ключами все БД делятся на три категории: иерархические, сетевые и реляционные.

Иерархическая БД — в ней существует упорядоченность полей внутри каждой логической записи: одно поле считается главным, а другие поля ему подчинены (рис. 2.11). Группы логических записей упорядочиваются в определенную последовательность как ступеньки лестницы, и поиск данных ключей осуществляется прохождением по этой лестнице в соответствии с порядком, определенным последовательностью главных полей. В качестве примера рассмотрим данные о размерах стипендии всех студентов института.

Первый уровень в организации логической структуры такой базы может включать таблицу, содержащую название факультетов, численность студентов этих факультетов, получающих стипендию, и стипендиальный фонд факультетов. Название факультета выступает в качестве главного поля и, выбрав нужный факультет, можно получить доступ к таблице второго уровня.

Второй уровень иерархии может включать таблицы, содержащие перечни специализаций каждого факультета. При этом в качестве главного поля выступает название специализации.

В таблицах следующих уровней может содержаться информация о номере студенческих групп (главное поле) по каждой специализации, их численности и о размерах стипендии, получаемых студентами каждой группы. Последовательно пройдя через несколько уровней иерархии, можно отыскать нужную информацию, такую, например, как размер стипендии студента по фамилии Иванов. В результате для многоуровневой иерархической БД время ответа на запрос может быть весьма большим.

2.4.2. СЕТЕВАЯ БАЗА ДАННЫХ

Сетевая база данных обладает несколько большей гибкостью по сравнению с иерархической, поскольку в сетевой БД можно установить связи не только между файлами соседних уровней, но и перескакивать через один или несколько уровней.

Первый уровень

Факультет	Численность	Фонд
ФСТ	935	490 тыс.
ЭНФ	455	240 тыс.

Второй уровень

ФСТ		ЭНФ	
Специализация	Численность	Специализация	Численность
ЭВМ	204	Эл.станции	159
АСУ	178	Эл.снабжение	120
ГАП	180	Релейная защита	168
ИИТ	75		
АиТ	224		

Третий уровень

ЭВМ		АСУ		ГАП			Эл.станции	
гр.	чис.	гр.	чис.	гр.	чис.	.....	гр.	чис.
1-2	20	1-4	15	1-5	20	.....	.....	.....
1-2a	18	1-4a	18	1-6	18	.....	.....	.....
2-2	23	2-4	17	2-5	23	.....	.....	.....
.....								

Четвертый уровень

1-2	
Фамилия	Сумма
Букин	8000
Зуев	9000
.....	

Рис. 2.11 – Структурная схема иерархической БД

Так, в БД связь может быть установлена между списком факультетов и таблицей номеров студенческих групп, и тогда станет возможным отыскать номер студенческой группы без предварительного поиска промежуточной таблицы, содержащей перечень специализации данного факультета.

2.4.3. РЕЛЯЦИОННАЯ БАЗА ДАННЫХ

Эта БД обладает наиболее гибкой логической структурой. При иерархической (или сетевой) организации БД ответы на одни виды запросов занимают значительно меньше времени, чем на другие. Более того, сказать, на какие запросы идет много времени, а на какие мало, можно только после того, как база данных уже создана.

Например, в иерархической БД наибольшее время займет ответ на запрос о размере стипендии конкретного студента, поскольку поле «сумма», содержащее размер стипендии, находится в таблице самого последнего уровня.

Факультет системотехники	ЭВМ	ФСТ-3-2	5000
--------------------------	-----	---------	------

Рис. 2.12 – Пример логической записи в БД

К тому же лишь только после затраты большого труда на создание такой БД может выясниться, что «неудобные» для базы запросы, требующие большого времени на ответ, поступают чаще всего. От подобной неприятности избавлена реляционная БД, потому что все поля в логических записях такой базы равноправны: нет главного поля и подчиненных ему полей. Например, если преобразовать иерархическую БД в реляционную, то получится файл, содержащий $935 + 455 = 1390$ логических записей (по одной записи на каждого студента). Каждая из этих записей может содержать, например, следующие поля: факультет, специализация, группа, фамилия, сумма. Так, студенту ИВАНОВУ из группы ФСТ-3-2 соответствует следующая логическая запись (рис. 2.12).

Не следует думать, что не возникает проблем при поиске информации в реляционной БД. Если 1390 логических записей, подобных этой, не подчиняются никакому заранее установленному в файле порядку, то ответ на запрос о размере стипендии студента ИВАНОВ связан со сплошным просмотром всех записей файла. С увеличением общего количества записей в файле такая процедура поиска потребует весьма большого времени. Чтобы ускорить процесс поиска, записи в файле можно упорядочить, например, по алфавитному порядку фамилий студентов. Упорядочение записей позволяет ускорить их поиск с помощью, так называемой *двоичной схемы* или *двоичного поиска*.

Согласно двоичной схеме выбирается запись, находящаяся посередине файла. По фамилии студента в этой записи легко судить, в какой из двух половин файла находится искомая запись. Затем процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдена нужная запись. Пусть, например, в самой середине файла оказалась запись с фамилией ОСОКИН. Сравнивая первые буквы этой фамилии и искомой фамилией ИВАНОВ, легко понять, что искомая запись находится в первой половине файла. Пусть далее записью, которая делит первую половину файла пополам, оказалась запись (рис. 2.13). Тогда искомая запись находится во второй четверти файла. Продолжая далее точно так же деление второй половины файла пополам, получим $1/8$ и $1/16$ части файла и т. д. В конце концов будет найдена нужная запись и дан ответ на запрос о размере стипендии студента ИВАНОВ.

Энергетический	Электрические станции	Э-1-4
----------------	-----------------------	-------

Зайцев	8000
--------	------

Рис. 2.13 – Запись делящая файл БД пополам

Двоичный поиск ведется быстрее, чем поиск просмотром. Пусть файл, в котором ведется поиск, включает N логических записей. Если эти записи не упорядочены, то окажется, что среднее арифметическое количество записей,

которое нужно просмотреть, чтобы ответить на большое количество запросов, приближается к $N/2$ с ростом числа запросов. Если записи упорядочены, то при двоичном поиске количество просмотренных при ответе на любой запрос записей не будет превышать числа $\log_2 N$, округленного до ближайшего целого.

Поскольку $\log_2 N$ во всяком случае намного меньше $N/2$ при большом N , то максимальное время, необходимое для ответа на запрос при двоичном поиске, значительно меньше среднего времени ответа при поиске в неупорядоченном файле.

Однако упорядоченный файл имеет и недостатки, во-первых, при большом количестве логических записей пополнение такого файла новыми записями связано с перемещением старых записей, чтобы не нарушать упорядоченность файла в целом, во-вторых, всякая запись упорядоченного файла может быть найдена только по значению того поля, по которому упорядочены все записи файла. Например, если бы все 1390 записей в примере были упорядочены в файле не по фамилиям, а скажем по номерам студенческих групп, то найти размер стипендии студента ИВАНОВА (с помощью двоичного поиска, не зная номера группы этого студента) было невозможно. Конечно, можно создать несколько дубликатов одного и того же файла, упорядоченных по значению разных полей, но для этого потребуется много дополнительного места в памяти ЭВМ. Еще более гибкая (двоичная схема), процедура связана с *хешированием* (перемешивание — *англ.*).

Согласно этой процедуре, каждой логической записи в файле по некоторому правилу ставится в соответствие число, которое аналогично адресу этой записи в памяти компьютера. Например, если пронумеровать все буквы русского алфавита, то отдельные буквы фамилии студента ИВАНОВ будут иметь соответственно двухрядные номера: 10, 03, 01, 15, 16, 03. Составленное из этих номеров число 100301151603 порождает адрес логической записи в памяти ЭВМ.

Сложность такого подхода заключается в том, что адреса логических записей будут получаться очень большими (например, адрес записи с фамилией ИВАНОВ получится больше 100 млрд!), так что для размещения этих записей потребуется невероятно большой объем памяти компьютера, а при этом память может оставаться очень слабо заполненной, поскольку большинство комбинаций букв не образуют фамилий.

Выход из этого затруднения можно найти, если предложить другое правило вычисления адреса логической записи, например, если сложить номера ($10 + 3 + 1 + 15 + 16 + 3 = 48$) букв фамилии ИВАНОВ, то полученную сумму 48 тоже можно рассматривать, как адрес записи и разместить эту запись в 48-й ячейке памяти.

Как видим, здесь адрес не является очень большим числом, а для размещения записи уже не требуется, чтобы память компьютера имела большой объем. Однако такой метод приводит иногда к ситуациям, когда в двух записях получится один и тот же адрес. Например, для записи, соответствующей студенту по фамилии ИВАНОВ, тоже получится адрес 48.

Вообще, всякий метод вычисления адреса логической записи по ее содержимому называется *хеш-функцией*. Практически никакая хеш-функция не

гарантирует от конфликтов, поэтому на случай конфликтов договариваются использовать некоторую другую (дополнительную), хеш-функцию. Этого бывает достаточно для устранения всех конфликтов. Если хеш-функция выбрана удачно, то логические записи распределяются более или менее равномерно по ячейкам памяти компьютера (точнее, по той области памяти, которая отведена на данный файл), и конфликты будут встречаться редко. Если бы, например, заданию была известна относительная доля появления каждой буквы алфавита в большом количестве фамилий студентов, то можно было бы раз и навсегда сконструировать самую удачную из всех возможных хеш-функций. Однако такой благоприятной ситуации не бывает.

При хешировании значение хеш-функции, т. е. адрес логической записи, вычисляется всякий раз при поиске этой записи в файле. Вычислить хеш-функцию несложно, и когда ее значение, т. е. адрес искомой ячейки, известно, выбор нужной логической записи осуществляется прямо по адресу хеширования — чрезвычайно быстрый метод поиска. При использовании хеширования дополнение файла новыми логическими записями тоже эффективно, поскольку при этом не сохраняют какую-либо упорядоченность файла в целом.

Все рассмотренные методы поиска информации в настоящее время получили широкое распространение в системах управления небольшими БД для ПЭВМ. Для СУБД, создаваемых на мощных компьютерах, разработаны другие, более сложные методы поиска, требующие более сложных, но зато и более эффективных программ.

3. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ САПР С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

3.1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К САПР

Основные поколения существующих САПР:

- моделирующие (системы автоматизированного моделирования);
- синтезирующие (синтез выполняется не через многократное моделирование или оптимизацию, а путем создания сразу работоспособного варианта — генерационный синтез);
- САПР с формальными языками, где средства общения с пользователем ограничены определенными конструкциями, не подлежащими изменениям;
- САПР с неформальными языками, где имеется переменная (перестраиваемая) лексика со свободной грамматикой и синтаксисом.

Существующие САПР представлены поколениями, где описание объекта выполнено формальными языками. Создание синтезирующих САПР с неформальными языками зависит от использования методов ИИ. Поэтому все САПР можно разделить на интеллектуальные и неинтеллектуальные.

Обычно САПР работала в жестком режиме, по строго заданным алгоритмам, не используя опыт проектировщика, не обеспечивая взаимодействия пользователя с ЭВМ на языке, близком к естественному. Существует три метода интеллектуализации САПР:

1) Внешняя универсальная интеллектуализация с помощью инструментальных систем (ИСИИ), где используются различные оболочки экспертных, диалоговых, обучающих систем. Главное достоинство — высокая скорость разработки и малые финансовые затраты. Недостаток — низкое качество проектирования (скорость работы, требуемая память, надежность, мощность, учет всех особенностей предметной области). ИСИИ удобно пользоваться на начальных этапах разработки ЭВМ.

2) Внешняя специализированная интеллектуализация с помощью специализированных программных приставок, работающих на принципах ИИ. Этот метод (как развитие предыдущего), но с более высоким качеством работы. Здесь все сводится к улучшению сервисных характеристик САПР, что обеспечивает возможность формулировки типовой задачи проектирования на предметно-ориентированном языке, организации обучения пользователя и т. д. Совокупность средств общения пользователя с САПР представляют собой интеллектуальный интерфейс.

3) Внутренняя интеллектуализация со встроенными в САПР алгоритмов и методов ИИ (увеличены возможности синтеза, адаптации, самоорганизации, работы с нечеткой формулировкой задачи).

Как известно, в ИИ можно выделить бессловесный ИИ (низкий уровень, где нет интеллектуального интерфейса, пользователь работает в терминах предметной области, но присутствуют процедуры, имитирующие целесообразное поведение, например, адаптацию, самоорганизацию), словесный ИИ (высокий уровень, где есть интеллектуальный интерфейс с языком предметной области, используя понятия для представления знаний на любых символах и знаках с явно заданной семантикой) и искусственный разум (технически не реализован) [1,42].

Системы, в которых существенную роль играют понятия, миры слов, т. е. семиотические (знаковые) с их явно заданной семантикой, называют *понятийными*.

Традиционные САПР, дополненные адаптационными процедурами приспособления к оперативной проектной обстановке, самонастройке на особенности постановки задачи, поиска и обоснованного выбора цели среди множества вариантов, т. е. процедурами, имитирующими целенаправленное поведение, следует считать ИСАПР нижнего уровня. Понятийные САПР, способные работать с различными понятиями, семантика, смысл которых определяется либо пользователем на входном языке, либо автоматически внутри программы, уровень интеллекта выше.

Традиционные САПР работают по строгому алгоритму, понятийные САПР порождают иной алгоритм решения. Это позволяет пользователю применять эвристические, словесные, нематематические правила. Понятийные САПР (развитие традиционных САПР, алгоритмических) используют информацию не в количественном, а в качественном виде, например «если X_1 имеет свойство a , то X_2 имеет свойство b ». Эти высказывания (предикаты) можно рассматривать как качественные аналоги количественных формул.

Наглядным примером понятийной формулы является *фрейм*. Фрейм-прототип можно рассматривать как понятийный аналог функции

$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, где F — имя фрейма-прототипа (сложного понятия), а $X_1, X_2, \dots, X_n$ имена его незаполненных слотов (простых понятий). Заполняя слоты различными значениями имен (понятийных аргументов), получаем различные значения имени фрейма, т. е. понятийной функции.

Логическим развитием понятийных формул являются *понятийные уравнения*, т. е. уравнения вида $f(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ где f — высказывание над понятиями $(X_1, X_2, \dots, X_n)$, а равенство 0 понимается как обозначения неявного задания результата этого высказывания. Например, «Верно ли, что в телевизоре неисправен резистор R10, если на экране исчезла цветность, упала яркость и нет синхронизации строчной развертки?».

3.2. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ САПР

Традиционная САПР характеризуется:

- описанием объекта и задач проектирования с помощью формализованных, фиксированных, символично-цифровых языковых конструкций;
- ориентацией работы САПР на жесткую, формализованную постановку задачи проектирования;
- использованием процедуры моделирования как основы процесса проектирования;
- использованием алгоритмов, не адаптируемых и не учитывающих опыта пользователя;
- фиксированием функциональной структуры САПР;
- применением в качестве основы математического аппарата теории численных методов, теории множеств, имитационного моделирования;
- представлением информации в численном виде;
- использованием традиционных языков: Паскаль, Си и др.;
- хранением больших объемов информации в виде БД;
- представлением выходной информации в виде таблиц, графиков, чертежей.

Архитектура традиционных САПР отражает черты административно-командной системы, перенесенные в технику: чрезмерная централизация управления, штампы в языковых средствах, негибкость алгоритмов и принципов работы, представление информации в неосмысленном виде, сложность модификации, невозможность учета человеческого фактора, т. е. опыта и его психологии.

Основные концепции ИСАПР состоят в следующем.

Входная информация представляется в виде фраз на ограниченном естественном языке или на предметно-ориентированном языке, допускающем описание пользователем не только объекта, но самого алгоритма проектирования. Тем самым достигается высокая функциональная гибкость САПР. Постановка задачи может быть нечеткой или некорректной, тогда ИСАПР, путем диалога с пользователем, устраняет нечеткость и некорректность. Это заключается в распознавании задачи и отнесение ее к

типовой при определении необходимых уточнений. В этом случае ИСАПР имеет архив типовых постановок задач [45] с соответствующими наборами корректной входной информации.

Представляется не в виде данных (чисел), а в виде знаний, т. е. характеризуется независимостью от пользователя, активностью и ситуативными связями. Это влечет за собой:

- представление и обработку информации не только в числовом, но и в символьном виде;
- переход к языкам программирования, удобным для работы с символьной информацией (Си, Лисп, Пролог);
- разработку и применение в ИСАПР способов представления информации в виде знаний (правил, фреймов, семантических сетей);
- хранение информации в виде баз знаний, частью которых могут быть БД.

Активность знаний выражается в том, что ИСАПР функционируют под управлением алгоритмов (процедур) и данных, т. е. диспетчирование работ подсистем в ИСАПР выполняется не с помощью внешней управляющей программы, и автоматически по факту наличия или отсутствия необходимых для работы этих подсистем данных или знаний, а с помощью процедуры контроля необходимой информации. Как только эта информация появляется, то автоматически срабатывают процедуры ее обработки. Таким образом, информация побуждает к действию.

Представление информации в виде знаний, а не чисел, позволяет вести обработку данных не численными, а логическими методами. Основным математическим аппаратом ИСАПР является аппарат алгебры логики, в условиях детерминированной, не четкой или вероятностной информации. Тогда применяют язык Пролог.

ИСАПР ориентированы не на процедуры моделирования анализа, а на процедуры синтеза (переход от общего к частному: декомпозиции, поиск знаний по образцу, составление документации), т. е. дедуктивного или индуктивного вывода (композиция, агрегирование, обобщение (целое из частей), формализация эвристических знаний, построение понятий).

Входная и выходная информация представляются с использованием принципов когнитивной психологии (приемы визуального отображения информации (иерархические меню, многооконный графический интерфейс, различные способы образного отображения действий пользователя — мультипликация)). Это примеры графического «интеллектуального интерфейса».

ИСАПР имеют ЭС для консультации пользователя, методики проектирования. Это: диагностика ошибок, сбоев работы ИСАПР, выдача советов, обучение.

ИСАПР представляют объект проектирования многоаспектно, даны связи с другими объектами, правила модификации свойств объекта, правила взаимодействия с другими объектами с целью его эквивалентного представления. Такое описание значительно облегчает многоуровневое проектирование объекта.

3.3. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ САПР

Количественные характеристики имеют следующие величины:

- число входных, внутренних и выходных языков;
- число слов (понятий) в каждом из языков;
- глубина «дерева» диалога ИСАПР — пользователь;
- среднее время реакции ИСАПР на вопрос пользователя;
- число уровней иерархии представления объекта;
- число ЭС (или число проблем, по которым пользователь может получить консультацию);
- объем базы знаний (число правил, фреймов).

Качественные характеристики содержат следующие показатели:

- 1) функциональные возможности (моделирование, расчет, оптимизация, параметрический и структурный синтез);
- 2) тип структуры ИСАПР:
 - с внешней инструментальной интеллектуализацией (рис. 3.1, а);
 - с внешней специализированной интеллектуализацией (рис. 3.1, б);
 - с внутренней локализованной интеллектуализацией (рис. 3.1, в);
 - с внутренней распределенной интеллектуализацией (рис. 3.1, г);
- 3) тип интеллектуального интерфейса:
 - языковой (ограниченный естественный язык, предметно-ориентированный);
 - графический (иерархическое или простое меню, графический ввод, графический вывод, многооконный интерфейс);
- 4) способ представления знаний (правила продукций, фреймы, семантические сети, предикаты, парадигмы);
- 5) тип логического вывода (прямой или обратный логический вывод, с поиском в глубину или ширину, комбинированный);
- 6) аппарат логической обработки знаний (метод резолюции, логический вывод);
- 7) тип обрабатываемых знаний (четкие, нечеткие, вероятностные).

Наряду со специфическими характеристиками ИСАПР имеются и традиционные — тип языков программирования, объем памяти, тип ОС, тип технических средств.

Рассмотрим более подробно типовые структуры ИСАПР. При *внешней интеллектуализации* к САПР присоединяется готовая инструментальная интеллектуальная система, наполняемая знаниями. Достоинствами такой системы являются высокая скорость и простота разработки.

Недостаток состоит в низкой эффективности из-за избыточности памяти и нерациональной организации работы системы (рис. 3.1, а). *Внешняя специализированная интеллектуализация* заключается в том, что ЭС специально создается под данную САПР. Такую систему называют *гибридной* (рис. 3.1, б).

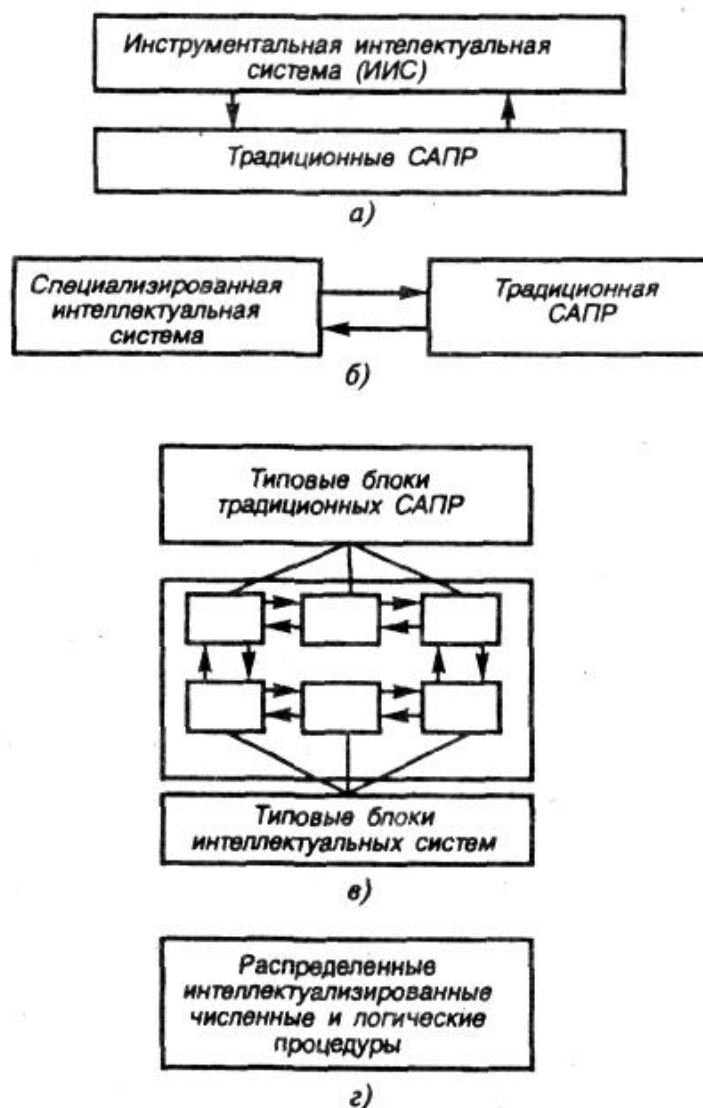


Рис. 3.1 – Типы структур ИСАПР:

а – внешняя интеллектуализация; *б* – внешняя специализированная внешняя интеллектуализация; *в* – внутренняя локализованная интеллектуализация; *г* – с внутренней распределенной интеллектуализацией

Развитием предыдущей системы будет *внутренняя локализованная интеллектуализация*, где имеются хорошо отработанные блоки лингвистического транслятора, логического вывода, представления знаний. Характеристики традиционной САПР значительно улучшаются, используя по необходимости отдельные блоки, а не весь ИИ (рис. 3.1, в). При *внутренней распределенной интеллектуализации* каждый алгоритм САПР и принцип ее работы в целом основаны на использовании не данных, а знаний (рис. 3.1, г). На основе знаний строится ИСАПР — моделирующая (интеллектуальные аналоги традиционных САПР) и синтезирующая.

3.4. МОДЕЛИРУЮЩАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ САПР

Моделирующая ИСАПР выполняет описание объекта и основной задачи моделирования (задачи расчета, анализа, оптимизации) на предметно-ориентированном языке (рис. 3.2.).

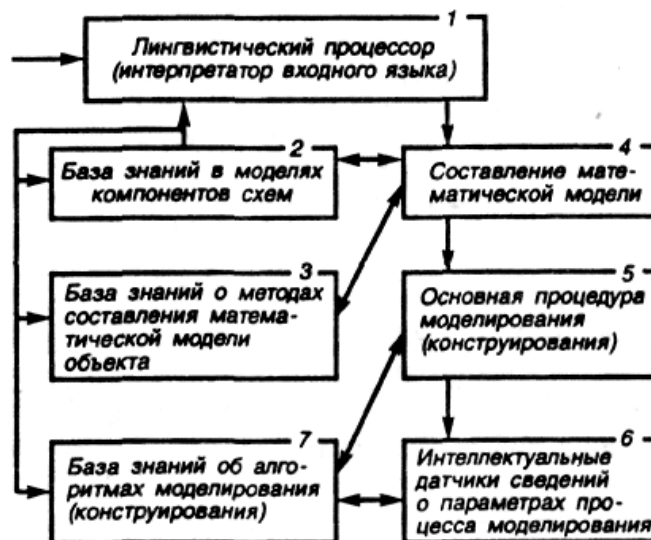


Рис. 3.2 – Структура адаптивной моделирующей ИСАПР:

→ - управляющие связи, ↔ - информационные связи

Структура и начальные параметры считаются известными, задача состоит в выявлении конечных параметров и характеристик заданного объекта. Интеллект моделирующей ИСАПР заключается в адаптации работы ИСАПР к особенностям объекта: при составлении математической модели объекта база знаний 2, используя покомпонентное описание объекта 1, выдает те модели его компонента, которые наиболее соответствуют требованиям точности и скорости моделирования с учетом сложности всего объекта, а база знаний 3 инициирует в соответствии с этими требованиями способ составления математической модели объекта. Моделирование состоит в том, что база знаний 7 на основе сведений, поступающих от «датчиков», анализирующих параметры и качество моделирующей процедуры (анализ, оптимизация, размещение, трассировка), управляет ходом моделирования — изменяет параметры моделирующей процедуры или меняет алгоритмы.

Основным отличием баз знаний в этой ИСАПР от БД в традиционной САПР является активный характер баз знаний, так как кроме декларативных знаний (параметры компонентов, алгоритмов, оптимальные условия их применения) в этих базах хранятся и знания процедур — алгоритмы и методы инициируемые знаниями, содержащимися в описании объекта и задачи, либо знаниями, извлекаемыми с помощью *интеллектуальных датчиков* из самого процесса моделирования.

В состав *моделирующей адаптивной ИСАПР* дополнительно включаются подсистемы диагностики, указывающие пользователю как его ошибки (на семантическом уровне) при составлении описания объекта, так и ошибки системы (на естественном языке).

Для проектирования вычислительных систем решается задача фрагментации объектов, т. е. моделирование по частям и агрегирования результатов моделирования.

3.5. СИНТЕЗИРУЮЩАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ САПР

Ее структура изображена на рис. 3.3. Она решает задачи структурного и параметрического синтеза. Предполагается, что эти задачи можно решать

отдельно и последовательно.

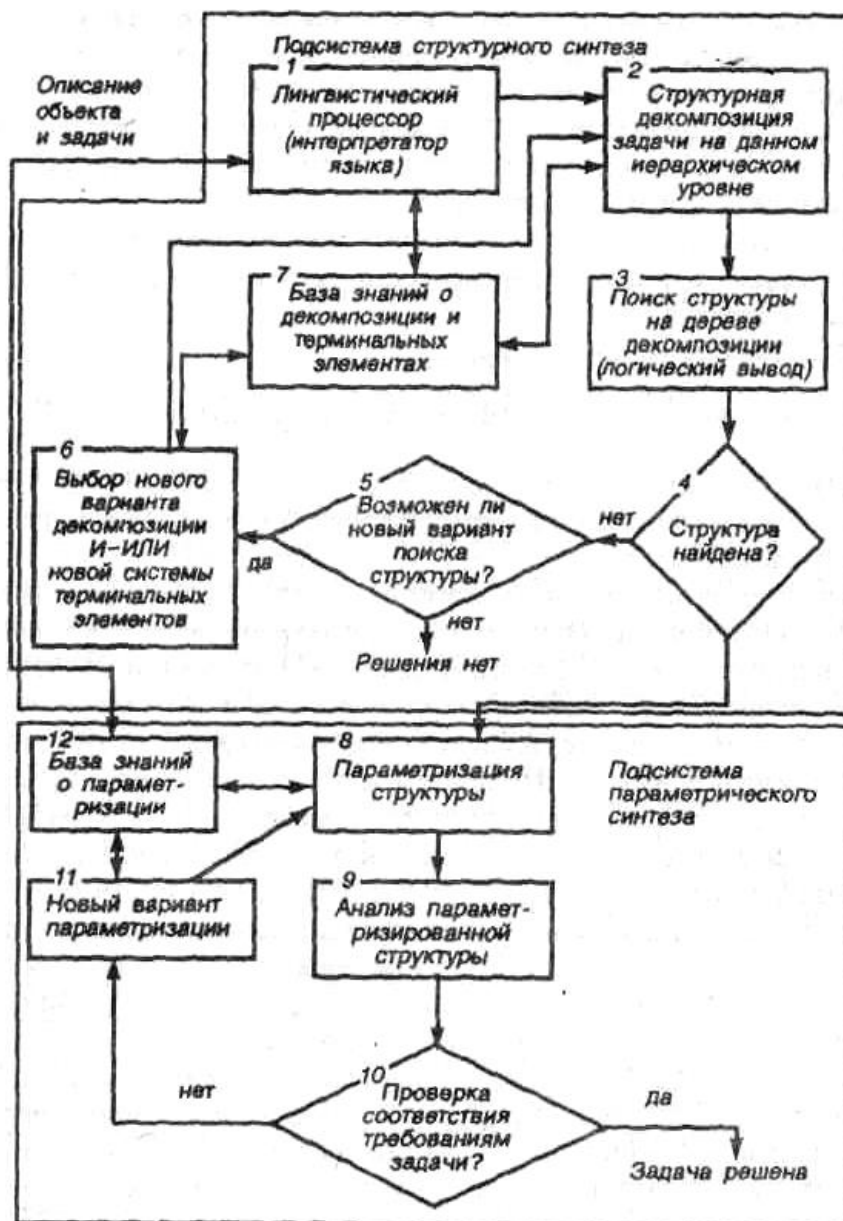


Рис. 3.3 – Структура синтезирующей ИСАПР:

→ - управляющие связи, ↔ - информационные связи

В блоке логического вывода может частично выполняться и параметризация синтезируемой структуры, если она имеет важное значение для функционирования структуры. Синтез в такой ИСАПР состоит в построении «дерева» декомпозиции задачи на подзадачи (в качестве задачи может выступать объект или процесс) в блоке 2 и поиске варианта декомпозиции в блоке логического вывода 3, удовлетворяющего заданным требованиям (блок 4). В качестве дерева декомпозиции можно использовать И—ИЛИ «дерево» или «дерево» состояний и свойств. Вместо блоков 2 и 3 можно использовать любой эвристический прием синтеза.

Если на выбранном базисе терминальных элементов «дерева» декомпозиции структура не синтезируется, нужно сменить базис, а если синтезируется, то дальше выполняется ее параметризация. Параметризация может выполняться различными способами — либо эвристически, на основе знаний экспертов, либо формально, с помощью оптимизирующей системы,

аналогичной адаптивной моделирующей ИСАПР, но с использованием в качестве основной процедуры программы оптимизации. Описанная процедура синтеза может быть применена на каждом иерархическом уровне.

3.6. МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

3.6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА

В задачах синтеза наиболее эффективно используются методы ИИ. Особенностью этих задач является необходимость многократного принятия решений в процессе их реализации. Поскольку эти решения неоднозначны, результаты синтеза тоже неоднозначны. Рассмотрим основные типы синтеза (рис. 3.4.).



Рис. 3.4 – Основные типы синтеза

Оптимизационный синтез состоит в том, что сначала разработчик сам создает начальный вариант проектируемого объекта, т. е. задает его структуру и параметры. Если после расчета и анализа математической модели этого начального варианта окажется, что характеристики объекта отличаются от требуемых, то изменяются сначала параметры, а если это не поможет, то и структура объекта в соответствии с каким либо методом оптимизации.

Каждый шаг оптимизации требует повторного моделирования, расчета и анализа объекта. Так как для оптимизации по нескольким переменным требуется обычно не менее ста шагов, а приемлемое время оптимизации составляет не более нескольких минут. Это требование ограничивает применение оптимизационного синтеза параметров и особенно структуры объектов. Обычно оптимизационный синтез используется при расчете параметров (классические непрерывные оптимизации). Задачи структурного синтеза решаются методами дискретной оптимизации (направленный перебор).

Генерационный синтез, в отличие от оптимизационного, состоит не в

последовательном улучшении первоначального варианта объекта, а в создании (генерации) сразу модели работоспособного объекта. Есть две разновидности генерационного синтеза. Первая — синтез по теоретически строго обоснованным соотношениям, определяющим структуру или чаще параметры объекта проектирования. Эти соотношения отражают необходимые условия работоспособности объекта. Примерами строгого теоретического синтеза является структурный синтез цифровых устройств (ЭВМ).

Строгий синтез возможен при строгой формализации постановки задачи — получении заданной логической функции на выходе цифрового устройства. Но такие случаи редки и формулировки задач синтеза трудны из-за разнообразия и сложности математизации, поэтому трудно иметь строгий общий теоретический аппарат и приходится прибегать к прошлому опыту, выраженному в виде методик, отношений, зависимостей, просто к здравому смыслу и творчеству.

Вторая разновидность генерационного синтеза — эвристический синтез. Большинство задач (технологических) вычислительных процессов решается именно этим способом.

В целом, если задача синтеза формулируется как задача поиска параметризированной структуры, то ее решение можно искать на путях теоретического синтеза (хотя результаты могут быть неточными). Например, преобразование множества X во множество Y , или сигнала X в сигнал Y . Если таким образом задачу сформулировать нельзя, то прибегают к эвристическому синтезу.

Различие методов теоретического и эвристического синтеза:

- теоретический синтез реализуется с помощью алгоритмов, обладающих свойством определенности, т. е. его результат однозначен и не зависит от точности исполнителя;
- эвристический синтез допускает множество альтернативных решений, так как в нем важную роль играет выбор исполнителем того или иного способа синтеза, включая выбор типа элементов, из которых должен состоять объект, способа их соединения, способа расчета их параметров.

3.6.2. МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

Синтез ВС и вычислительных процессов (ВП) включает три этапа:

- выбор типовых элементов структуры (синтез базиса);
- построение структуры (структурный синтез);
- параметризация элементов структуры (параметрический синтез).

Выбор типовых элементов структуры выполняется эмпирически. Для формализации используют матрицу «элементы — свойства» (или, что то же самое, матрицу «средства — цели»). Строкам этой матрицы соответствуют различные альтернативные элементы, выполняющие одни и те же функции, а столбцам — свойства этих элементов, важные для проектируемой ВС (ВП). В каждой клетке a_{ij} матрицы по балльной системе проставляется экспертная оценка i -го свойства у j -го элемента. Анализ этой матрицы проектировщиком позволит составить наглядное и достаточно полное представление о

приемлемости того или иного элемента.

Структурный синтез редко бывает полностью независим от параметрического, обычно выбор структуры и определение значений параметров ее элементов тесно связано, составляя вместе структурно-параметрический синтез. Тем не менее, структурный синтез можно выполнять независимо от параметрического в тех случаях, когда формирование определенной структуры объекта является необходимым условием его работоспособности, а параметры лишь обеспечивают более высокое качество функционирования. К таким случаям относятся, например, структурный синтез цифровых устройств, вычислительных процессов. Рассмотрим типовые приемы структурного синтеза.

1) *Выбор из готовых структур-прототипов.* Этот прием предполагает наличие библиотеки готовых структур. Основной недостаток — необходимость прямого перебора всех структур. Если подобрать полностью подходящую структуру не удастся, выбирают наиболее близкую и модифицируют ее под заданные требования путем удаления или добавления новых элементов, введения дополнительных или исключения ненужных связей и т. д.

2) *Построение частной структуры из общей.* В этом случае сначала создают структуру с максимальной избыточностью, являющуюся обобщением всех известных структур объекта данного типа. Нужная структура синтезируется путем удаления лишних элементов и связей обобщенной структуры. Этот прием традиционно используется при синтезе вычислительных процессов, когда обобщенный процесс представляет собой цепочку всех вычислительных операций, применяемых для изготовления объекта данного класса, а синтез состоит в выборе из этой цепочки только тех операций, которые нужны в каждом конкретном случае. Так как выбор выполняется самим разработчиком на основе своего опыта, этот прием, как и предыдущий, относится к методам эмпирического синтеза.

3) *Направленный поиск по И—ИЛИ «дереву».* Этот прием можно рассматривать как специальный случай построения частной структуры из общей. В качестве общей структуры выступает заранее составленное И—ИЛИ «дерево», в котором каждая группа путей от корневой вершины через вершины И, ИЛИ до терминальных вершин соответствует одной частной структуре (рис. 3.5). Синтез по И—ИЛИ «дереву» удобно применить в тех случаях, когда объект легко декомпозируется на составляющие его части, которые декомпозируются на еще более мелкие и т. д., каждая декомпозиция порождает вершину типа И, а каждый уровень декомпозиции — ярус «дерева» из вершин И. Альтернативные варианты реализации каждой части объекта порождают вершину типа ИЛИ. Ветви «дерева», выходящие из вершин ИЛИ — имена способов реализации этих частей или их свойств, играющих определенную роль при синтезе. В качестве примера на рис. 3.5 приведено «дерево» И—ИЛИ для некоторого абстрактного объекта, который декомпозируется на части *a*, *b*, затем каждая из них соответственно на части *c*, *d* и *e*, *f*, *g*, *h*.

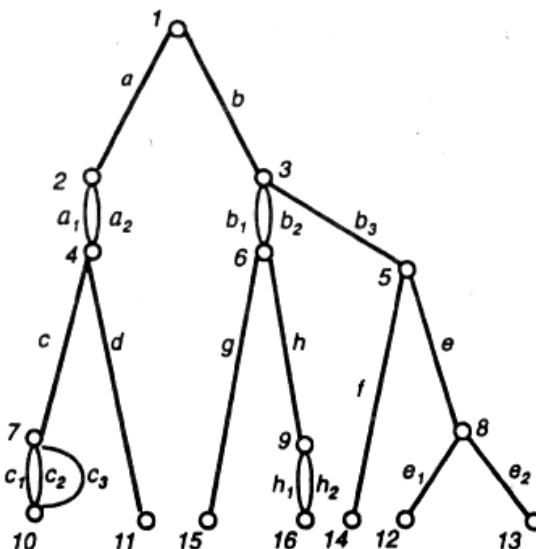


Рис. 3.5 – Структура И-ИЛИ дерева, где
1, 4, 5, 6 – вершины И; 2, 3, 8, 9 – вершины ИЛИ;
10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 – терминальные вершины

Части a , c , h могут быть реализованы соответственно способами a_1 , a_2 , c_1 , c_2 , h_1 , h_2 . При этом способ декомпозиции части a на c и d не зависит от способа реализации части a (a_1 или a_2), тогда как способ декомпозиции части b — зависит (при реализации b_1 , то b делится на e и f , а при реализации b_2 или b_3 — на g и h). Очевидно, если «дерево» состоит только из вершин И, то оно описывает одну структуру объекта. Альтернативный выбор структуры определяется вершинами ИЛИ. Обход «дерева» из вершин ИЛИ возможен либо в глубину, либо в ширину. При этом с каждой альтернативной реализацией (a_1 или a_2 ; c_1 , c_2 или c_3 и т. д.) связывается оператор перехода, разрешающий переход в следующую вершину И только при выполнении определенных ограничений в вершине ИЛИ. Ограничения могут быть глобальными, относящиеся ко всему объекту (общая масса или общая стоимость ВС, общее время вычислительного процесса и т. д.), и локальными, относящимися к данной реализуемой части объекта (условия стыковки с другими ЭВМ, ВС; ограничения на параметры части ВС).

Условием успешного окончания синтеза является прохождение по всем вершинам И до терминальных вершин. Практически строить «дерево» И—ИЛИ не обязательно, достаточно иметь «дерево» декомпозиции И, в каждой вершине которого нужно программно проверять альтернативные возможности реализации, задаваемые списком этих реализаций и списком ограничений. Отметим, что проверка этих ограничений означает, что синтез носит структурно-параметрический характер, поскольку в процессе синтеза отбираются элементы с определенными значениями параметров.

Направленный поиск по «дереву» состояний и свойств. Структурно-параметрический синтез можно выполнить не только на основе И—ИЛИ «дерева», но и с помощью «дерева» состояний и свойств (рис. 3.6).

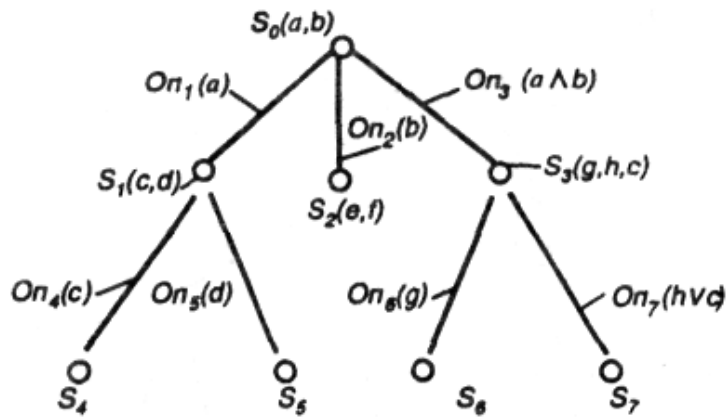


Рис. 3.6 – Дерево состояний и свойств

Каждая вершина $S_i(a_1, \dots, a_n)$ в этом «дереве» трактуется как задача, возможное решение которой обладает свойствами $a_1, \dots, a_n$, а каждый оператор перехода $On_i(a)$ имеет смысл: «Если решение задачи S_{i-1} должно обладать свойством a , то перейти к решению задачи S_i ». Таким образом, чтобы решение задачи S_0 обладало свойством $a \wedge b$, нужно решить задачу S_3 , а чтобы решение задачи S_3 обладало нужным свойством $h \vee c$, нужно решить задачу S_7 . Корневое состояние S_0 имеет смысл исходной задачи, промежуточные состояния S_1, S_3 — смысл промежуточных задач, на которые разбивается исходная задача синтеза, а S_2, S_4, S_5, S_6, S_7 — смысл базовых, терминальных, неделимых далее подзадач. Рассмотрим методику синтеза. Пусть известно, что решение должно одновременно удовлетворять свойствам (a, b, h, c) . Нужно найти терминальную вершину, имеющую указанные свойства.

Решение заключается в поиске пути от S_0 к той терминальной вершине, которая обладает указанными свойствами $a, b, h \vee c$. В этом случае имеем $S_4 (a \wedge c)$, $S_5 (a \wedge d)$, $S_2 (b)$, $S_6 (a \wedge b \wedge d)$, $S_7 (a \wedge b \wedge (h \vee c))$, решение должно привести в S_7 . Приведенный пример позволяет иллюстрировать некоторые характерные особенности обработки знаний в ИИ при использовании «дерева» состояний.

1) *Наследование свойств.* Из рис. 3.6 видно, что состояние $S_1(c, d)$ на самом деле кроме свойств c, d должно также обладать и свойством a предыдущей вершины S_0 состояние $S_2(e, f)$ — свойством b , а состояние $S_3(d, h, c)$ — свойством $a \wedge b$. Вследствие этого более точным было бы обозначение этих состояний в виде $S_1(c, d, a)$, $S_2(e, f, b)$, $S_3(d, h, c, a \wedge b)$. Аналогично можно было бы уточнить запись операторов $On_4(c)$ в виде $On_4(c \wedge a)$; $On_5(d)$ в виде $On_5(d \wedge a)$ и т. д. Обеспечиваемое последовательным прохождением вершин при поиске по «дереву» передача свойств отцовской вершины к дочерним называется в ИИ «наследованием свойств». Механизм автоматического наследования свойств позволяет упростить запись и реализацию операторов перехода, не учитывая в них свойств предыдущих состояний. Он «по умолчанию» обеспечивает присутствие в последующих

состояниях свойств предыдущих. Заметим, однако, что «наследование свойств» в «дереве» поиска необязательно и его можно отменить, если условиться, что «отцовское» и «дочернее» состояние по своим свойствам друг с другом не связаны, например, относятся к понятиям с разной семантикой (S_0 — рабочий, S_1 — станок). Если же состояния в «дереве» относятся к одному классу, то механизм наследования свойств позволяет «наращивать» свойства состояний в процессе последовательного раскрытия вершин «деревя». Это особенно важно при решении задач классификации и диагностики.

2) *Наследование условий перехода.* По аналогии с наследованием свойств состояний можно говорить о наследовании условий перехода в операторах перехода On . Это позволяет объяснить результат поиска. Например, приход к состоянию S_7 вызван наличием свойства $h \wedge c$ в S_3 и одновременно свойства $a \wedge b$ в S_0 , что легко установить, анализируя условия перехода в On_7 и On_3 . Обычно процесс последовательного применения операторов перехода к раскрытию вершин «деревя» состояний запоминается в программе поиска и может быть легко воспроизведен в виде «трассы поиска», вследствие чего процедуру объяснения результатов часто называют «трассировкой поиска».

3) *Поиск правил по образцу.* Этот часто используемый в работах по ИИ термин означает, что левая часть правила «если S_i -1 обладает свойством a , то переход к S_i » «сравнивается с образцами», т. е. с перечнем фактически имеющихся имен состояний и их свойств. Совпадение левой части правила с каким-либо образцом вызывает активизацию правила, т. е. срабатывание его правой части. Кроме описанных существует большое число других методов синтеза — метод морфологического ящика, весьма близкий к поиску по «дереву» состояний и «И—ИЛИ-дереву», методы «мозгового штурма» и контрольных вопросов, относящиеся к методам решения изобретательских задач, однако в САПР они не получили распространения из-за сложности их формализации.

3.6.3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

После синтеза структуры (если она не сопровождалась синтезом параметров) выполняется параметрический синтез. Вариант синтеза путем решения задачи оптимизации широко описан в литературе, поэтому рассмотрим генерационный параметрический синтез, т. е. расчет параметров по системе формул или уравнений без оптимизации, обеспечивающей получение работоспособного варианта объекта. Задача ставится таким образом. Пусть функционирование ВС обеспечивается при выполнении системы соотношений (формул) $Y_i = f_i(x_1, \dots, x_m)$ $i=1, m$, $x_1, \dots, x_m$ - параметры ВС. Необходимо определить последовательность применения формул расчета при задании некоторой части параметров, т. е. необходимо синтезировать методику расчета по известным формулам.

Решение состоит в определении такой цепочки причинно-следственной связи в формулах (ранжирование формул), в которой расчет по первой формуле в этой цепочке позволил бы найти величины, необходимые для расчета, по второй формуле и т. д. По существу данная задача состоит в планировании

вычислений. Алгоритмы и программы, решающие эту задачу, в теории ИИ получили название *концептуальных решателей или планировщиков*. Суть алгоритма планирования заключается в следующем. Найдем сначала формулу с минимальным числом неизвестных, например, с одной неизвестной, и вычислим ее. Далее снова найдем новую формулу с новой неизвестной и также вычислим ее и т. д. Легко заметить, что если построить матрицу, столбцы которой соответствуют неизвестным $x_1, \dots, x_m$ (часть из них задана), а строки — номерам формул, то при отыскании искомой последовательности расчета эта матрица будет иметь строго трапециевидную структуру:

- а) расчет только по формулам (рис. 3.7, а);
- б) расчет с решением системы уравнений относительно X_7, X_6 ; На рисунке показан случай, когда X_1 рассчитывается по формуле на основе известных X_2, X_5 , а для расчета X_7, X_6 , нужно решить систему из двух уравнений, после чего X_4, X_3 опять можно рассчитать по формулам (рис. 3.7, б).

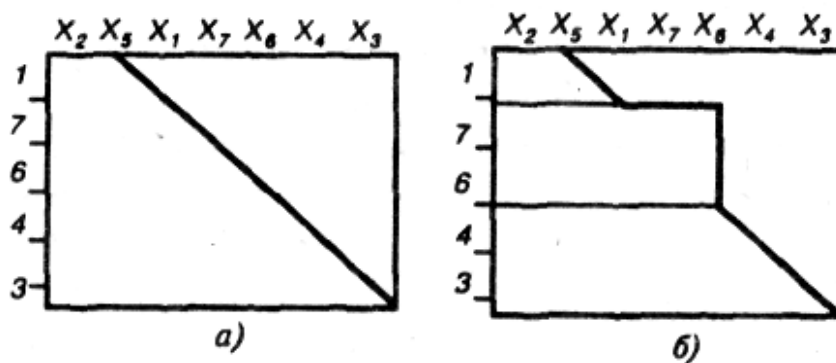


Рис. 3.7 – Построение матрицы по алгоритму планирования:

а – расчет только по формулам; б – расчет с решением системы уравнений относительно X_7, X_6 ; 1, 7, 6, 4, 3 – номера формул;

X_2, X_5 - заданные вершины; X_1, X_7, X_6, X_4, X_3 - искомые вершины

Для автоматизации планирования можно каждую формулу заменить фреймовой системой инструкций. Например, для формулы $X_1 = f_1(X_2, X_5)$ можно записать:

- если известно X_5, X_2 , то известно X_1 ;
- если известно X_1, X_2 , то известно X_5 ;
- если известно X_5, X_1 , то известно X_2 ;
- если известно X_5, X_2, X_1 , то неизвестных нет;
- если известно X_1 , то неизвестно X_2, X_5 и т. д.

Представляя каждую формулу в указанном виде (этот процесс легко автоматизировать, записывая и вводя в программу через дисплей лишь исходную формулу) и последовательно многократно просматривая их, можно определять порядок активизации каждой формулы, т. е. последовательность их использования в синтезируемой методике расчета. Но данный формализм правил соответствует формированию семантической вычислительной сети. Однако возможны и другие алгоритмы прямого определения структуры матриц, не связанные с построением семантических сетей (рис. 3.8).

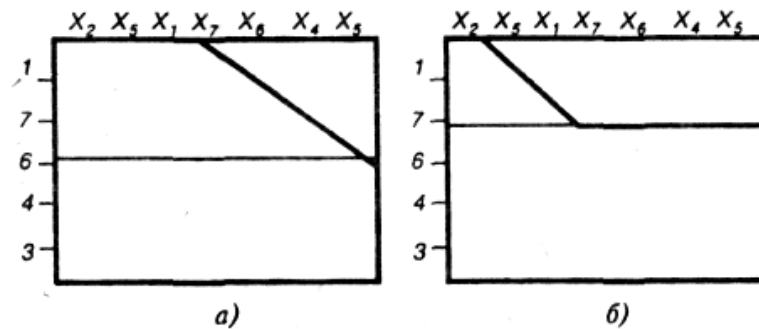


Рис. 3.8 – Алгоритм прямого определения структуры матрицы:
а – случай переопределения (число формул больше неизвестных);
б – случай недоопределения; 1, 7, 6, 4, 3 – номера формул

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технические средства, информационное обеспечение САПР позволяют создавать качественно новые вычислительные системы.

Усложнение функций проектирования потребовало разработки интеллектуальных САПР: моделирующих и синтезирующих. Организация САПР с элементами искусственного интеллекта позволяет по-новому подойти к проблеме создания вычислительных устройств с переменной структурой, использовать методы структурного и параметрического синтеза, применять количественные и качественные характеристики.

ЧАСТЬ 4

ТЕХНОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ЭВМ

В четвертой части изложены вопросы технологии и экологии производства средств вычислительной техники, надежности конструкции, методов обработки изделий, защитных покрытий. Надежность конструкции ЭВМ рассмотрена в зависимости от структуры вычислительной техники, информационной нагрузки, волоконно-оптической линии связи. По защите окружающей среды при производстве ЭВМ предложены основные меры, которые выполняются с учетом источников и видов загрязнений.

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Производственный процесс (ПП) — совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта изделий — это получение, транспортирование, контроль и хранение; подготовка производства, процесс изготовления технологической оснастки.

Производственный процесс делится на вспомогательный и основной. Основной — изготовление продукции, вспомогательный — изготовление оснастки, ремонт оборудования, энергоснабжение.

Технологический процесс (ТП) — часть производственного процесса, содержащих целенаправленные действия по изменению и последующему определению состояния предмета труда (заготовки и изделий).

Основной частью ТП является *технологическая операция* (ТО) — это законченная часть ТП, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте (сверление и т. д.). ТО состоит из установа, технологического перехода, вспомогательного перехода и позиции.

Установ — часть ТО, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы.

Переход — законченная часть ТО, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

Вспомогательный переход — законченная часть ТО, состоящая из действий человека и оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода (закрепление заготовки, смена инструмента и так далее).

Рабочий ход — законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров и качества поверхности или свойств заготовки.

Вспомогательный ход — законченная часть технологического перехода, состоящего из однократного перемещения инструмента относительно заготовки и необходимого для подготовки рабочего хода.

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 операции. Например, обработка в поворотном приспособлении.

Типы производственного процесса — это единичное, серийное, массовое.

Единичное производство — малый объем выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт, которых, как правило, не предусматривается.

Серийное производство — характеризуется изготовлением или ремонтом изделий, периодически повторяющимися партиями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство.

Массовое производство — характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

Программа выпуска в массовом производстве обеспечивает возможность узкой специализации рабочих мест, за которыми закрепляется выполнение только одной операции. В этом случае оборудование располагается в полном соответствии с технологическим процессом. Если производительность и количество рабочих мест рассчитаны так, что переход с одной операции на другую осуществляется без задержек, то такая организация производства называется *поточной*.

Выполнение каждой технологической операции на потоке должно осуществляться с установленным тактом и ритмом выпуска.

Такт выпуска — интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий или заготовок определенных наименований, размеров и исполнений.

Ритм выпуска — количество изделий или заготовок определенных наименований, размеров и исполнений, выпускаемых в единицу времени.

Для производства больших вычислительных машин характерно изменение серийности производства. На этапах изготовления элементов и блоков производство надо рассматривать, как массовое или крупносерийное, а на этапах окончательной сборки (сборки всего изделия) — как мелкосерийное.

1.2. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Правильно разработанный технологический процесс обеспечивает выполнение требований, указанных в чертеже и технологических условиях, высокую производительность труда и высокие экономические показатели.

Исходными данными для проектирования технологических процессов являются чертеж детали и общие виды изделий, спецификация всех деталей, монтажные и полумонтажные схемы (для сборки), технические условия на наиболее ответственные детали, сборочные единицы и изделия, размер производственного задания, руководящие технические материалы (данные об оборудовании, нормаль на инструмент, типовые ТП и другое).

1.2.1. ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Виды технологических процессов бывают: единичный, типовой и групповой.

Единичный ТП — разрабатывается для изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства. Создание ТП имеет этапы:

- 1) анализ данных и выбор аналога ТП;
- 2) выбор заготовки и метод ее получения;
- 3) определение ТО, составление технологического маршрута;
- 4) выбор технологического оборудования;
- 5) назначение и расчет режимов выполнения ТО, определение профессии и квалификации исполнителей;
- 6) расчет точности, производительности, эффективности ТП;
- 7) оформление технологической документации.

Типовой ТП — характеризуется единством содержания и последовательности большинства ТО и переходов для групп изделий с общими конструктивными признаками. Типизацию начинают с классификации изделий. *Классом* называют совокупность деталей, характеризуемых общностью технологических задач. В пределах класса детали разбивают на группы, подгруппы и так далее до типа. Практически к одному типу относят детали, для которых можно составить один технологический процесс. Типовой ТП составляют на основе последних достижений науки и техники, опыта производства. При изготовлении ЭВМ применяют типовые ТП изготовления гибридных и полупроводниковых микросхем, ПП, ТЭЗ.

Групповой ТП — для совместного изготовления или ремонта групп изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками. Групповые ТП используют для сборочных ТО и комплексной детали.

1.2.2. ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ

Подразделяются на конструкторские, технологические и измерительные. *Конструкторская база* — для определения положения детали или сборочной единицы в изделии. *Технологическая база* — для определения положения заготовки или изделия при изготовлении. *Измерительная база* — для определения относительного положения изделия или заготовки и средств измерения.

1.2.3. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Технический контроль охватывает весь технический процесс и предотвращает попадание дефектных материалов и изделий на последующие этапы изготовления или ремонта. На этапе производства устанавливают три вида контроля: входной, операционный, приемочный.

Входной контроль — для проверки соответствия материалов, заготовок, изделий, поступающих на предприятие.

Операционный контроль — для проверки деталей в процессе изготовления или ремонта, а также количественных и качественных

характеристик ТП.

Приемочный контроль — для проверки соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации.

Сплошной контроль — в условиях высокого качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов.

Выборочный контроль — для изделий при большой трудоемкости контроля или при контроле, связанном с разрушением изделий или с операциями, выполняемыми на автоматизированных комплексах.

Непрерывный контроль — для проверки ТП при их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения количественных и качественных характеристик (автоматическими или полуавтоматическими методами).

Периодический контроль — для проверки изделий при установившемся производстве и стабильных ТП.

Летучий контроль — применяют в специальных случаях, установленных стандартами предприятия. Показателями контроля является точность измерений, достоверность, трудоемкость и стоимость контроля.

1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Состав и правила выполнения технологической документации определяется ГОСТ 3.1001—81 Единой системой технологической документации (ЕСТД). Она 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 — в установлении 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); карты маршрутная (МК), технологического процесса (КТП), операционная (ОК), типового (группового) ТП (КТТП), типовой (групповой) операции (КТО), комплектовочная (КК), технико-нормировочная (ТНК), 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 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 так далее). Для обозначения позиций допускается применять римские цифры. Формы МК и правила ее оформления установлены 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 ТО или ТИ.

1.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

ТПП представляет собой совокупность мероприятий, обеспечивающих готовность предприятия к выпуску изделия (наличие всей конструкторской, технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для осуществления заданного объема выпуска продукции с установленными технико-экономическими показателями).

Организация и управление технологической подготовкой производства ведется в соответствии с Единой системой технологической подготовки производства (ЕСТПП), предусматривающей широкое применение прогрессивных типовых ТП, стандартной технологической оснастки и оборудования средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ.

Основное назначение ЕСТПП заключается в решении задач обеспечения технологичности конструкции изделия; разработки ТП; проектирования и изготовления средств технологического оснащения, организации и управления технологической подготовкой производства (ТПП).

Важнейшей составляющей ТПП является проектирование ТП. Оно требует больших затрат времени и труда технолога (решение комплексных сложных задач, а именно: вычислительные, составление текста технологической документации, вычерчивание эскизов).

Проектирование ТП традиционным методом зависит от опыта и навыка технолога, наличия справочного материала и так далее. Создание автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) позволяет повысить производительность и качество проектных работ, сократить сроки ТПП.

1.4.1.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. Различают производственную и эксплуатационную технологичности.

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 — 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 (трудоемкость изготовления изделия, технологическая себестоимость). 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), применяемости электрорадиоэлементов (0,18), прогрессивности формообразования деталей (0,11).

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.

2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ЭВМ

2.1. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Электроэрозионные методы обработки — это совокупность электрических, химических воздействий на обрабатываемую деталь для придания ей заданной формы и размеров. Эти методы делятся на группы: электроэрозионные, лучевые, ультразвуковые, электрохимические, электрофизические (плазменная обработка, формование в магнитном поле).

Эти методы обработки применяются при изготовлении изделий из материалов высокой твердости: ферриты, германий, кремний, алмазы, рубины, кварц, твердые сплавы, керамика, — используемые в производстве ЭВМ. Основное преимущество этих методов является возможность копирования формы инструмента сразу по всей поверхности, вследствие чего процесс легко автоматизируется. Для всех методов обработки (кроме ультразвуковых) производительность не зависит от твердости и вязкости обрабатываемого материала.

Электроэрозионные методы используют для всех токопроводящих материалов, они основаны на явлении электрической эрозии, т. е. разрушении поверхности электродов электрическим разрядом, проходящим между ними. Разрушение материала происходит путем его оплавления с последующим выбросом из рабочей зоны в виде парожидкостной смеси. Основными методами электроэрозионной обработки являются электроискровая и анодно-механическая.

Для этих методов характерно наличие жидкой диэлектрической среды между электродами и подача энергии в форме импульсов. Жидкая среда повышает эффективность разрушения металла и является средством эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки. Электроэрозионные методы различают в зависимости от формы и параметров импульсов тока и напряжения, а также метода генерирования импульсов. Импульсы могут иметь униполярную, знакопеременную и другие формы. Основными параметрами импульсов являются их длительность t_n и скважность q . По длительности импульсы ($t_n < 10^{-4}$ с) делят на короткие ($t_n < 10^{-4}$ с), средние ($t_n = 10^{-4} \dots 10^{-2}$ с), длинные ($t_n > 10^{-2}$ с)/

Скважностью импульса q называют отношение периода импульса к его длительности: $q = T/t_n$.

2.1.1. ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА

Этот метод основан на использовании импульсных искровых разрядов малой длительности (несколько микросекунд) и большой скважности $q > 8$. Обработка ведется методом копирования формы электрода-инструмента и непрофилированным электродом. Обработка методом копирования производится при поступательном движении одного из электродов и неподвижно закрепленном втором электроде, при этом форма электрода-инструмента копируется (рис. 2.1).

При напряжении, равном величине пробоя, происходит заряд конденсатора через межэлектродный зазор и энергия, накопленная конденсатором, мгновенно выделяется в процессе разряда. Искровой разряд протекает в миллионные доли секунды и практически не нагревает обрабатываемое изделие. Так как место приложения импульсов строго определено, то обработку можно производить в намеченном месте.

При прохождении искрового разряда в жидкости возникают гидравлические явления и газообразования, создающие взрывной эффект, который способствует удалению из межэлектродного промежутка разрушенного разрядом металла. Источником питания служат обычно

генераторы постоянного тока напряжением 30...220 В, создающие силу тока зарядного контура в пределах 1...5 А. Время зарядки лежит в пределах 10^{-3} с, а время разрядки — от 10^{-5} до 10^{-8} с.

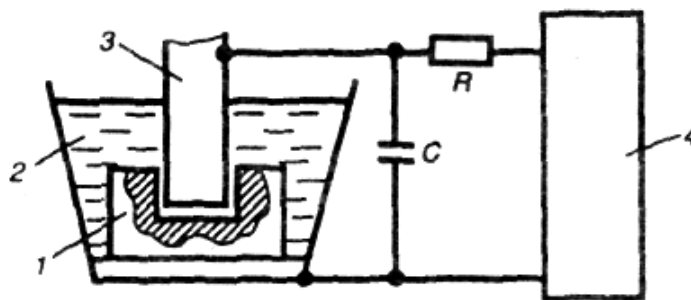


Рис. 2.1 – Схема электроискровой обработки:

1 – деталь, 2 – рабочая жидкость (керосин, трансформаторное масло),
3 – инструмент, 4 – источник постоянного тока,
R - сопротивление, C - конденсатор

Основная часть энергии, получаемой при разрядке конденсаторов, выделяется в виде теплоты (температура доходит до 11000 °С). При этом теплота расходуется на испарение и плавление металла, только лишь небольшая ее часть поглощается электродами. Последовательное действие разрядов, вызывающих электрическую эрозию, приводит к образованию в изделии выемки, представляющей собой как бы отпечаток электрода инструмента. Во время работы разрядного контура вследствие эрозионного разрушения металла зазор между электродами постоянно увеличивается. В какой-то момент времени зазор возрастает настолько, что разряд не возникает и съем металла прекращается.

Для обеспечения непрерывности процесса станки для электроискровой обработки снабжаются регуляторами, автоматически меняющими положение одного из электродов и регулирующими подачу. Производительность процесса электроискровой обработки зависит от частоты, с которой будут следовать разряды, и от количества металла, вырабатываемого при каждом разряде.

Большое влияние на производительность оказывает материал электрода. Основным требованием, предъявляемым к материалу, является высокая эрозионная устойчивость. Этим требованиям лучше всего отвечает латунь ЛС59-1, красная медь и медно-угольная композиция. Форма электрода подобна форме прошиваемого отверстия, но размеры его меньше размеров отверстия.

2.1.2. МЕТОД ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ (ПРОВОЛОЧНЫМ) ЭЛЕКТРОДОМ

Электрод-проволока 2 диаметром 0,02...0,5 мм перематывается при определенном натяжении с подающей катушки 1 на приемную 5, прорезая (в результате электроэрозионного процесса) помещенную на ее пути обрабатываемую деталь 3 (рис. 2.2).

Направляя движение детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно вырезать любой заданный контур. Траектория обрабатывающего электрода-проволоки относительно детали задается копиром, имеющим соответствующие размеры. Для улучшения условий удаления

продуктов эрозии проволока натянута в вертикальном направлении. В заготовке имеется технологическое отверстие 4.

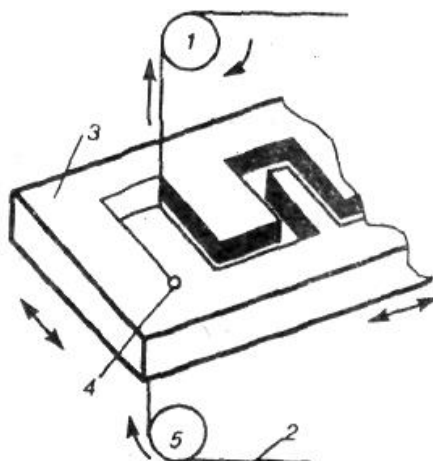


Рис. 2.2 – Схема электроискровой обработки непрофилированным (проволочным) электродом

В качестве материала проволоки применяют медь, а при диаметре менее 0,05 мм — вольфрам, так как прочность медной проволоки в этом случае недостаточна. Диаметр проволоки определяется требуемой шириной реза, значение которого складывается из диаметра проволоки и удвоенного значения зазора, который берется от 0,075 до 0,015 мм на сторону. В качестве рабочей жидкости применяют керосин. Основное достоинство такого способа — возможность полной автоматизации на станках с ЧПУ.

2.1.3. АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Этот метод основан на использовании комбинированного процесса анодного растворения и эрозионного воздействия на обрабатываемую деталь. При грубых режимах доминирует электроэрозионный процесс, за счет которого и осуществляется сьем металла.

Обрабатываемая деталь 1 (рис. 2.3) включается в цепь постоянного тока в качестве анода, а рабочий инструмент 3 (диск, лента, проволока) — в качестве катода. Источником питания является генератор постоянного тока 4. Межэлектродное пространство заполняют рабочей жидкостью 2 (обычно водным раствором жидкого стекла). Под действием постоянного напряжения (22...26 В) на поверхности детали образуется силикатная пленка 5, имеющая повышенное электрическое сопротивление и исключающая замыкание электродов. Снятие пленки движущимися инструментами вызывает электротермическую эрозию обрабатываемого материала.

Наиболее целесообразно анодно-механическую обработку применять для разрезания твердых материалов, для наружного и внутреннего шлифования и заточки режущего инструмента из твердых сплавов.

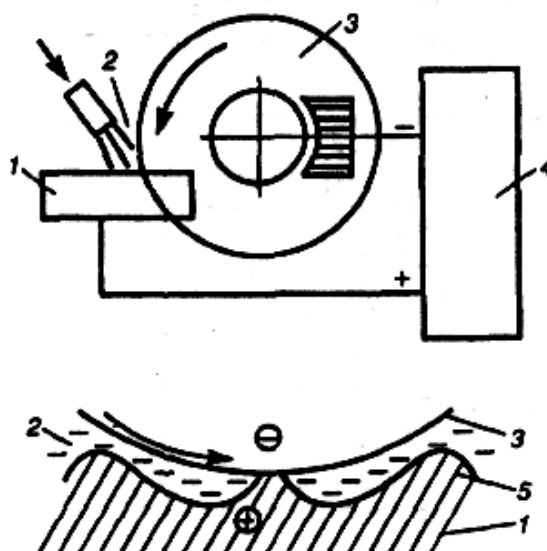


Рис. 2.3 – Схема анодно-механической резки

2.2. ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Особенностью лучевых методов обработки является отсутствие рабочего инструмента, роль которого выполняет непосредственно луч. Лучевые методы обработки особенно целесообразны для получения отверстий небольших размеров, так как изготовление инструмента в этих случаях очень трудоемко. Он быстро выходит из строя вследствие поломки, а при точных размерах изделия — из-за износа. Основными разновидностями лучевой обработки являются электронно-лучевая и светолучевая.

2.2.1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА

Она основана на использовании теплоты, выделяющейся при резком торможении потока электронов поверхностью обрабатываемого изделия (рис. 2.4). При этом кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую и только незначительная часть (0,1...3%) — в рентгеновское излучение. Чем выше кинетическая энергия потока электронов и чем меньше площадь, на которой она сосредоточена, тем быстрее проходит нагрев. В качестве источников свободных электронов (термокатода) используют металлическую проволоку (вольфрам, тантал), нагретую до высокой температуры в глубоком вакууме.

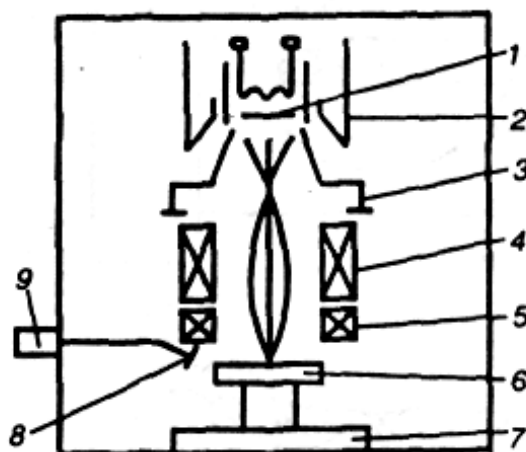


Рис. 2.4 – Схема для обработки и сварки с помощью электронного луча

В этих условиях электроны не испытывают столкновений с молекулами

воздуха и друг с другом. При этом вся энергия, получаемая отдельными электронами, затрачивается на придание электрону определенной скорости. Количество электронов, испускаемых термокатодом, зависит от температуры нагрева и его материала. Электроны сжимаются и формируются в узкий луч с высокой концентрацией энергии с помощью магнитных линз, представляющих собой катушки специальной формы.

Источником электронов является катод 1, помещенный в формирующий электрод 2. При нагреве катода с его поверхности излучаются электроны, которые под воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между анодом 3 и катодом, приобретают высокую скорость и направляются в фокусирующую катушку 4. С помощью отклоняющей катушки 5, луч можно перемещать по поверхности детали 6, установленной на столе 7. Оптическая система наблюдения состоит из зеркала 8 и микроскопа 9. Если система, отклоняющая луч, не работает, а изделие стоит неподвижно, то луч выполняет роль сверла.

Обработка осуществляется лучом малого диаметра (1...10 мкм) при плотности энергии от 10^7 до 10^9 Вт/см². Длительность импульса составляет от 10^{-2} до 10^{-5} с. Электронный луч оказывает очень небольшое давление (примерно 1 Па) на поверхность, а температура в месте воздействия луча достигает 8000 °С. При этом, металл мгновенно испаряется. Электроннолучевая обработка применима для всех материалов (металлов, ферритов, стекла, алмазов, графитов). Благодаря малому времени воздействия теплоты термическое влияние на периферийные области незначительно. Недостатком метода является сложность установки из-за необходимости иметь вакуумную камеру.

2.2.2. СВЕТОЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА

Светолучевая обработка основана на применении лазера (квантовый генератор (усилитель) когерентного излучения оптического диапазона). Температура в зоне действия луча доходит до 8000 °С. Важное свойство лазерного излучения — когерентность (волновые лучи идут друг за другом, распространяются в одном направлении, имеют одинаковую длину волны и находятся в фазе друг с другом). Луч лазера фокусируется в пятно диаметром 1... 10 мкм.

Лазер на основе синтетического рубина показан на рис. 2.5. Он представляет собой оксид алюминия, в котором некоторые из атомов алюминия заменены атомами хрома (до 0,05%), являющимися активными центрами. Рубиновый стержень изготавливают из монокристалла, полученного выращиванием в плазменной индукционной печи. Диаметр стержня 2—20 мм, длиной 80—200 мм.

Торцы рубина 1 отполированы и представляют собой зеркала. Один торец покрыт плотным непрозрачным слоем серебра, а другой (со стороны линзы 4) имеет коэффициент пропускания около 8%. Линза 4 формирует испускаемое излучение и направляет его к обрабатываемому изделию 3. Рубин 1 и импульсная лампа вспышки 5 устанавливаются в камере 2. Внутренняя поверхность камеры отполирована и является отражателем света. Зарядный

агрегат 6 состоит из батареи конденсаторов 7. С помощью пускового устройства 8 происходит разряд конденсаторов и появляется вспышка света длительностью 10^{-3} с. Свет фокусируется на рубиновом стержне, в результате чего атомы хрома переходят на более высокий энергетический уровень. Если большинство атомов окажется на верхнем уровне, то будут происходить процессы индуцированного (вынужденного) излучения.

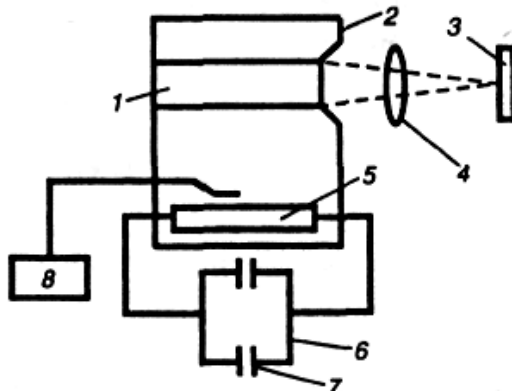


Рис. 2.5 – Схема квантового генератора

Основной задачей при создании квантовых генераторов является получение инверсионного состояния, т. е. такого, когда число атомов на верхнем уровне превышает их число на нижнем уровне. Луч света, образовавшийся в результате возвращения атомов в исходное состояние, проходя вдоль оси рубина и многократно отражаясь достигает большой интенсивности и проходит через полупрозрачный торец рубина.

Лазерную технологию используют при производстве электронных устройств, для получения отверстий малого размера в твердых материалах (ферритах, стекле), сварки, термообработки, скрайбирования, маркировки и так далее. Светолучевая сварка имеет малую длительность термического цикла, что обеспечивает возможность обработки материалов, чувствительных к воздействию теплоты. Краткость импульсов предотвращает возможность получения крупнозернистой структуры и окисления металлов (сварка монтажных соединений в интегральных микросхемах (ИС)).

Сварка световым лучом выполняется в воздухе, в атмосфере инертных газов, в вакууме. При этом не требуется защиты обслуживающего персонала от рентгеновского облучения, вследствие чего оборудование значительно упрощается. В производстве ИС используют процесс *скрайбирования*, который заключается в нанесении на поверхность материала канавок, после чего материал легко раскалывается. Лазеры применяют при маркировке хрупких изделий малых размеров и для зачистки монтажных проводов.

2.3. ОБРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОМ

Ударно-абразивный метод обработки твердых и хрупких материалов осуществляется инструментом 1, колеблющимся с ультразвуковой частотой 18—20 кГц. Под торец инструмента подается водная суспензия абразивного порошка. Зерна абразива 2 скалывают материал заготовки 3 мелкими частицами, которые вместе с абразивом уносятся жидкостью (рис. 2.6).

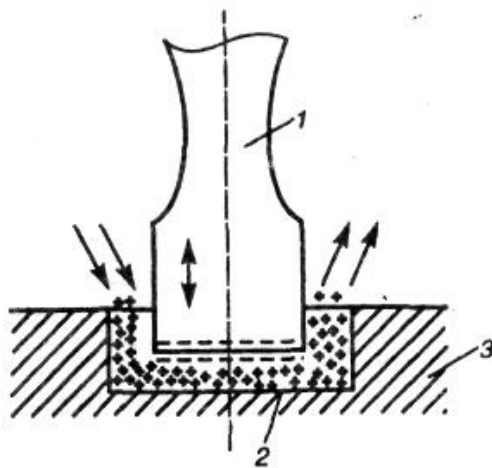


Рис. 2.6 – Схема ультразвуковой обработки

Этим методом обрабатываются твердые и хрупкие материалы: керамика, кварц, рубин, алмаз, кремний, твердые сплавы. Скорость съема материала по обработке стекла составляет 9000 мм/мин, а по твердому сплаву 200 мм/мин. У вязких материалов (незакаленная сталь) зерна абразива внедряются в обрабатываемый материал и не происходит сколов материала изделия. Максимальные амплитуды колебаний 45—50 мкм, увеличение амплитуды приводит к разрушению инструмента (сталь 45 с последующей закалкой до твердости HRC 48—56). Точность обработки 0,06 мм.

2.4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Электрохимическая обработка основана на явлении анодного растворения металла и удаления продуктов электрохимической реакции с обрабатываемой поверхности (для токопроводящих материалов). Точность обработки от 12 мкм до 18 мкм. Разновидности такой обработки: анодно-гидравлическая в проточном электролите, электрохимическое полирование в неподвижном электролите и анодно-механические способы чистовой обработки.

2.4.1. АНОДНО-ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В ПРОТОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Анодное растворение происходит без образования механически прочных анодных пленок, вследствие чего удаление продуктов электролиза осуществляется в результате принудительного потока электролита (водный раствор соли: нейтральной, кислотной или щелочной). При анодно-гидравлическом сверлении инструментом служит медная трубка, изолированная снаружи. Под давлением вытекающего электролита между торцевой поверхностью трубки и детали образуется зазор, исключающий замыкание электродов (рис 2.7).

При прохождении электрического тока через электролит происходит растворение металла детали. Продукты электролиза удаляются электролитом. По мере растворения изделия трубка углубляется в деталь, поддерживая постоянство межэлектродного зазора.

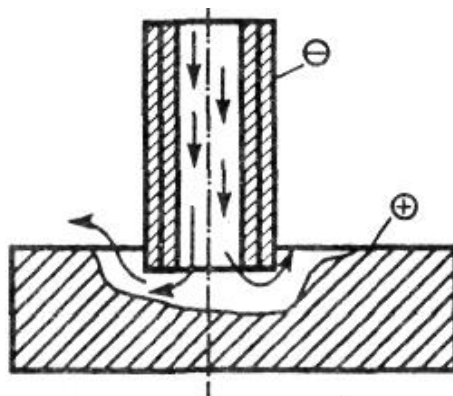


Рис. 2.7 – Схема анодно-гидравлической обработки в электролите

Примером формообразования более сложных поверхностей может служить операция изготовления кольцевых канавок (рис. 2.8).

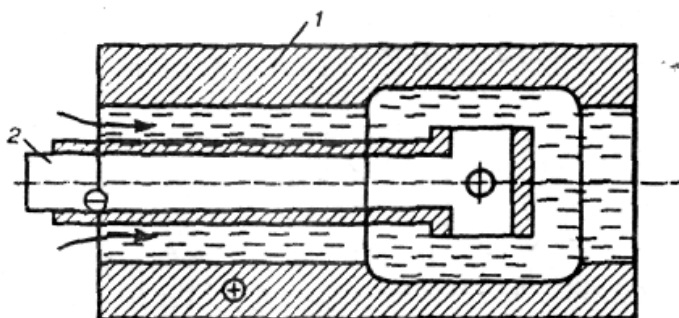


Рис. 2.8 – Схема изготовления кольцевых канавок

Деталь 1 подключена к положительному источнику тока, а инструмент 2 к отрицательному. Анодно-гидравлическую обработку целесообразно применять для снятия заусенцев у деталей сложной формы (мелкомодульные шестерни и др.). Механическое удаление заусенцев является весьма трудоемкой операцией и не обеспечивает высокого качества деталей. При анодно-гидравлической обработке удаляются мельчайшие заусенцы и значительно повышается производительность труда. В практике находят применение анодно-механическое шлифование наружных цилиндрических поверхностей и чистовая обработка плоскостей.

Обычно используют комбинированные методы обработки, у которых анодное растворение металла сочетается с эрозионным или ультразвуковым разрушением, а продукты реакции удаляются с обрабатываемой поверхности механическим путем и выносятся из рабочей зоны потоком электролита.

2.5. ОБРАБОТКА ПЛАЗМОЙ

Плазма — ионизированный газ, перешедший в это состояние в результате нагрева до очень высокой температуры или вследствие столкновения частиц газа с быстрыми электронами (в газовом разряде). При этом молекулы распадаются на атомы, от которых отрываются электроны и возникают ионы. Последние ионизируют газ и делают его электропроводным.

Однако не всякий ионизированный газ можно назвать плазмой. Необходимым условием существования плазмы является ее электрическая квазинейтральность, т. е. она должна содержать в единице объема примерно равное количество электронов и положительно заряженных ионов. Наряду с

ними в плазме может находиться некоторое количество неионизированных атомов и молекул. На плазму могут воздействовать электрические и магнитные поля. Внешнее магнитное поле позволяет сжимать струю плазмы, а также управлять ею (т. е. отклонять, фокусировать).

Большая степень ионизации обуславливает высокую температуру газоразрядной плазмы, которая может достигать 50 000 °С и выше. Свойства плазмы можно изменять путем применения различных газов (азота, аргона, водорода, гелия и др.). Основным методом получения плазмы для технологических целей является пропускание струи сжатого газа через пламя электрической дуги. Современные плазменные горелки делят на горелки прямого действия (с внешней дугой) и косвенного действия (с внутренней дугой).

Горелки прямого действия применяют для обработки электропроводящих материалов (рис. 2.9). Дуга возбуждается между обрабатываемым изделием 4 (анодом) и вольфрамовым электродом 1 (катодом). Поток газа поступает в охлаждаемую водой 3 медную оболочку 2. Дуга, выходя из сопла, направляется вместе с потоком газа к изделию. В качестве рабочего газа используют аргон, который ионизируется. Напряжение зажигания и рабочее напряжение при этом небольшие а электрическая дуга получается стабильной и инертной.

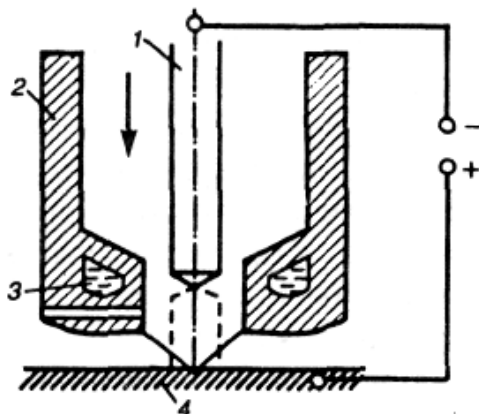


Рис. 2.9 – Схема горелки прямого действия

При использовании в качестве рабочего газа гелия скорость истечения струи при $t = 10\,000\text{—}15\,000\text{ °С}$ приближается к скорости звука. Плазменная горелка потребляет мощность 50 кВт и создает концентрацию мощности плотностью 3 мВт/дм².

Горелка косвенного действия применяется для обработки токопроводящих материалов и диэлектриков (рис. 2.10). Дуга образуется между вольфрамовым катодом 1 и стенками медного сопла 2. Поток газа, охлаждаемого водой 3, поступает в медную оболочку и, проходя через дугу, ионизируется. Дуга под действием струи газа выходит за пределы сопла, и плазма в виде факела направляется на обрабатываемое изделие 4, которое изолировано от дуги.

Применение плазменных горелок оказалось возможным из-за способности плазмы сжиматься в узкий пучок. Защитой сопла от разрушения служит оболочка газа, которая образует прослойку между факелом и стенками сопла.

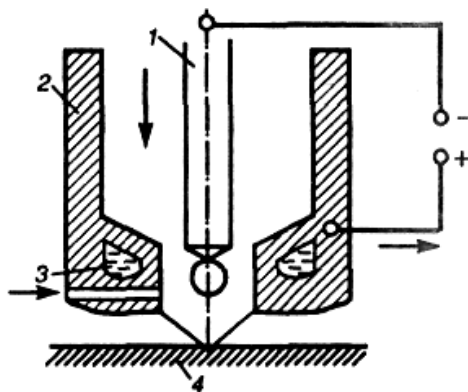


Рис. 2.10 - Схема горелки косвенного действия

Плазменный нагрев используют для напыления тугоплавких неметаллических материалов, которые вводятся в плазму в виде порошка. Этим методом можно получать многослойные покрытия из одного или нескольких порошков. Качество покрытия зависит от подготовки поверхности, вида применяемого порошка и материала основания. Подготовка поверхности заключается в очистке и обезжиривании.

Плазменной горелкой обрабатывают материалы любой твердости и любого химического состава. Эффективно применение плазмы при резке нержавеющей сталей и других материалов. Поверхность среза при этом получается гладкой, глубина зоны влияния — незначительной.

3. ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

3.1. ВИДЫ ПОКРЫТИЙ

Назначение покрытий — защита от коррозии, придание красивого внешнего вида и некоторых свойств поверхностному слою, отличных от основного металла (твердости, электропроводности и др.). *Виды покрытий* определяются способами их получения, материалом и толщиной покрытия и его последующей обработкой. Различают покрытия на неорганической основе — металлические и химические (оксидные) и покрытия на органической основе, лакокрасочные, полимерные и пластмассовые.

Условия эксплуатации. При выборе покрытой необходимо учитывать условия эксплуатации: легкие (л), средние (с), жесткие и очень жесткие. *Легкие условия эксплуатации* — для закрытых, отапливаемых и вентилируемых помещений с относительной влажностью 65% и температуре 25 °С; *средние условия* — в атмосфере, загрязненной небольшим количеством промышленных газов и пылью, при отсутствии прямого воздействия атмосферных осадков и прямой солнечной радиации, влажность среды 95% при температуре 35 °С. *Жесткие условия* — негерметизированная аппаратура при непосредственном воздействии атмосферных осадков, сернистых газов в атмосфере, загрязненной промышленными газами.

3.2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

Металлические покрытия представляют собой тонкий слой металла, нанесенного на поверхность. Покрытия бывают анодные и катодные. *Анодными защитными покрытиями* называют такие покрытия, электрохимический

потенциал металла которых в данной среде более электроотрицателен, чем электрохимический потенциал основного металла; *катодными* — покрытия с обратным соотношением потенциалов. Требования, предъявляемые к металлическим покрытиям, — это прочное сцепление с основным металлом; мелкокристаллическая структура, обеспечивающая наилучшие механические свойства; минимальная пористость; равномерная толщина покрытия (высокая твердость, износоустойчивость).

Технологический процесс покрытий имеет этапы:

а) *подготовка поверхности*, ТО: механическая обработка, т. е. удаление заусенцев, неровностей; обезжиривание поверхностей (бензин, керосин, известь, химический или электрохимический способ); декапирование (легкое травление), т. е. погружение изделия в 10%-ный раствор серной или соляной кислоты (назначение этой ТО — удаление тонких оксидных пленок и выявление структуры основного металла), затем промывка водой;

б) *нанесение покрытий* электрохимическим (гальваническим) или химическим способом. *Цинком* покрывают для защиты от коррозии детали из черных металлов (выдерживает изгибы, но плохо сваривается и спаивается); *кадмием* покрывают изделия, эксплуатируемые в условиях морской среды; *хромом по стали* — изделия для повышения твердости, износоустойчивости, жаропрочности (покрытие хрупкое, пористое); *никелем по меди* — изделия для придания им магнитных свойств, блеска, полирования; *оловом по меди* — изделия для предохранения деталей от окисления, облегчения пайки, герметизации резьбовых соединений;

в) промывка и сушка деталей.

3.3. ЛАКОКРАСОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ

Для придания поверхности детали антикоррозионных свойств и красивого внешнего вида используют лакокрасочные покрытия. Это покрытие не применяется для деталей высокой точности, трущихся поверхностей, подверженных нагреву. Имеется семь классов покрытий (ГОСТ 9.032—74), высший класс — первый. По степени блеска покрытия делятся на глянцевые, полуглянцевые и матовые.

Технологический процесс нанесения покрытий:

- *подготовка поверхности* (ТО: очистка от загрязнений (химическая или механическая), обезжиривание);
- *грунтование* — нанесение слоя фунта толщиной около 20 мкм. Основное назначение — создание адгезии между металлом и последующими слоями лакокрасочного покрытия. Грунт наносится распылением, окунанием или кистью (после нанесения каждого слоя — сушка);
- *шпатлевание* — выравнивание загрунтованной поверхности. Шпатлевка — это пастообразная масса (пигменты, наполнители, лаки с добавкой пластификаторов). Шпатлевки наносят шпателем или краскораспылителем (добавка растворителя). Затем поверхность сушат и шлифуют;
- *нанесение лакокрасочных покрытий* — с помощью кисти, окунания,

распыления;

- *сушка* — в сушильных шкафах, рефлекторных сушилках, инфракрасными лучами.

3.4. КОНТРОЛЬ ПОКРЫТИЙ

Контроль покрытий ведется по внешнему виду, толщине, пористости и прочности сцепления с основным материалом. Внешний вид проверяется визуально с помощью лупы с четырехкратным увеличением, сравнивая с эталоном. Для контроля толщины покрытий используют физические (неразрушающие) и разрушающие (химические) методы.

Физические: магнитный — в зависимости от толщины покрытия изменяется сила отрыва постоянного магнита от поверхности детали; радиоактивный — интенсивность отражения β -излучения; электромагнитный — магнитный поток, возникающий между преобразователем прибора и деталью; весовой — средняя толщина покрытия рассчитывается по формуле:

$$H_{cp} = (g_1 - g_2) \cdot 1000 / (s \cdot \gamma) \quad (3.1)$$

где g_1, g_2 — масса детали до и после нанесения покрытия, г;

s — площадь покрытия, см^2 ;

γ — плотность материала покрытия, г/см^3 .

Химический метод контроля покрытий заключается в том, что участок покрытия растворяется каплями раствора. Они наносятся и выдерживаются в течение определенного промежутка времени. Толщину покрытия рассчитывают по числу капель, которые наносят до тех пор, пока не обнаруживается участок основного металла.

Контроль пористости покрытия ведется путем наложения фильтрованной бумаги и паст. Эти методы основаны на химическом взаимодействии основного металла с реагентом в местах пор и других погрешностей покрытия с образованием окрашенных соединений. После снятия бумаги промывают и подсчитывают число пор, которые видны в виде точек или пятен.

Прочность сцепления покрытия определяют методом изгиба под углом 90° или путем нанесения сетки царапин (4—6 параллельных линий глубиной до основного металла, на расстоянии 2—3 мм друг от друга и 4—6 параллельных линий, перпендикулярных им). На контролируемой поверхности при этом не должно быть отслоений.

Покрытия обозначают в чертежах в соответствии с ГОСТ 9.303—84 (способ нанесения, вид покрытия, толщина покрытия, степень блеска, вид дополнительной обработки). Например, цинковое покрытие толщиной 12 мкм, матовое наносится гальваническим методом, обозначается Ц12М В обозначении лакокрасочных покрытий (в соответствии с ГОСТ 9.032—74) указывается материал покрытия, внешний вид (класс покрытия) и условия эксплуатации (группа покрытия). Например, эпоксидная эмаль ЭП-140, цвет синий, 4 класс отделки для изделий, эксплуатируемых внутри помещений (П). Обозначение в этом случае имеет вид: Эм Эп-140, синий, 4, П.

4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Печатной платой (ПП) называют материал основания, вырезанный по размеру, содержащий необходимые отверстия и проводящий рисунок. Виды ПП: односторонние, двусторонние, гибкие (имеют гибкое основание), гибкий печатный кабель состоит из тонких полосок проводящего материала (меди), расположенных параллельно и закрепленных между двумя пленками изоляционного материала (число проводников от 2 до 50, их ширина — под стандартные расчеты).

4.1. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Этапами механической обработки ПП являются:

- *входной контроль материала* — это проверка размеров листа, состояние поверхности фольги и диэлектрика, прочность сцепления фольги в исходном состоянии и при воздействии расправленного припоя, гальванических растворов;
- *получение заготовки* — это резка листа из фольгированного и нефольгированного материала дисковой фрезой с охлаждением сжатым воздухом и отсосом образующейся пыли (резка осуществляется роликовыми или гальваническими ножницами);
- *сверление монтажных отверстий* спиральным сверлом из твердого сплава с углом при вершине сверла 130° ;
- *обработка по контуру* выполняется вырубкой или фрезированием после изготовления печатных проводников.

4.2. ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Рисунок ПП выполняется фотопечатью и трафаретной печатью.

4.2.1. ФОТОПЕЧАТЬ

Фотопечать — способ нанесения изображения рисунка печатных проводников на материал основания, покрытый светочувствительным слоем, экспонируемым через фотошаблон с требуемым изображением.

Для получения оригиналов рисунка печатной платы применяют вычерчивание, наклеивание липкой ленты, резание по эмали и т. п.

Вычерчивание оригинала печатной платы выполняют на специальной чертежной бумаге с помощью сдвоенных рейсфедеров, плакатных перьев, лекал и др. Для ускорения процесса вычерчивания рекомендуется на бумагу предварительно нанести типографским способом координатную сетку. Из-за высокой трудоемкости процесса и низкой точности этот способ применяется редко.

Наклеивание липкой ленты сокращает трудоемкость изготовления оригинала печатной платы. На бумагу с координатной сеткой, наклеенную на недеформирующуюся основу (стекло, алюминий), наносят центры монтажных отверстий и контактные площадки, а проводники получают приклеиванием непрозрачной липкой ленты.

Резание по эмали применяют для печатных плат, требующих высокой точности выполнения проводников. Толщина слоя эмали, наносимого на

заготовку из стекла, составляет 30—50 мкм. Эмаль наносят в несколько слоев краскораспылителем. После сушки заготовку устанавливают на стол координатографа. Головка, в которой закреплен резец, может перемещаться по координатным осям и прорезать контуры элементов печатной платы с точностью $\pm 0,05$ мм. Надрезанную эмаль удаляют пинцетом.

Недостатком рассмотренных методов получения фотошаблонов является необходимость масштабного фотографирования. Этот недостаток устраняется при получении требуемой схемы в масштабе 1:1 на фотопластинке сканирующим световым пером с помощью координатографа. Рисунок печатного монтажа кодируется и переносится на перфоленту, которая помещается в считывающее устройство координатографа.

Информация одного кадра вводится в блок управления, где преобразуется в импульсы для шаговых двигателей, которые перемещают координатный стол по оси X или Y . При совместной работе двигателей стол перемещается под углом 45° . Точность установки координат ± 25 мкм. Форму и размеры контактных площадок определяют диафрагмы. Сменные диски содержат от 16 до 32 различных по конфигурации диафрагм. Требуемые размеры и яркость светового луча обеспечиваются оптической головкой.

Фоторезисты — тонкие пленки органических растворов, которые должны обладать свойствами после экспонирования полимеризоваться и переходить в нерастворимое состояние. Основное требование, предъявляемое к фоторезистам — высокая разрешающая способность, светочувствительность, устойчивость к воздействию химических растворов.

Участок *негативного* фоторезиста, находящийся под прозрачными участками фотошаблона, под действием света получают свойство не растворяться при проявлении. Участки фоторезиста, расположенные под непрозрачными местами фотошаблона, легко удаляются растворителем. *Позитивный* фоторезист под действием облучения изменяет свои свойства так, что при обработке в проявителях растворяются его облученные участки, а необлученные (находящиеся под непрозрачными участками фотошаблона) остаются на поверхности платы.

Метод фотопечати обеспечивает разрешающую способность, позволяющую получать проводники, ширина которых и расстояние между ними составляет 0,1 мм.

4.2.2. ТРАФАРЕТНАЯ ПЕЧАТЬ (СЕТКОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД)

Трафаретная печать основана на получении рисунка схемы на поверхности медной фольги путем продавливания защитной краски резиновым ракелем через сетчатый трафарет. Сетки для трафаретов изготавливают из капроновых или лавсановых нитей. Рисунок на трафарете получается с помощью фоторезистов. Открытые участки трафарета соответствуют рисунку ПП. Получение рисунка схемы методом трафаретной печати на 60% дешевле, чем фотохимическим. Трафаретная печать выполняется, если ширина проводников и расстояние между ними не менее 0,3 мм.

5. ЭКОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

5.1. ИСТОЧНИКИ И ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭВМ

Экология — наука о взаимоотношениях живых организмов и среды их обитания (рис. 5.1). Решение экологических проблем возможно при оптимальном взаимодействии природы и общества (развитие, сохранение и поддержание восстановления в природе).

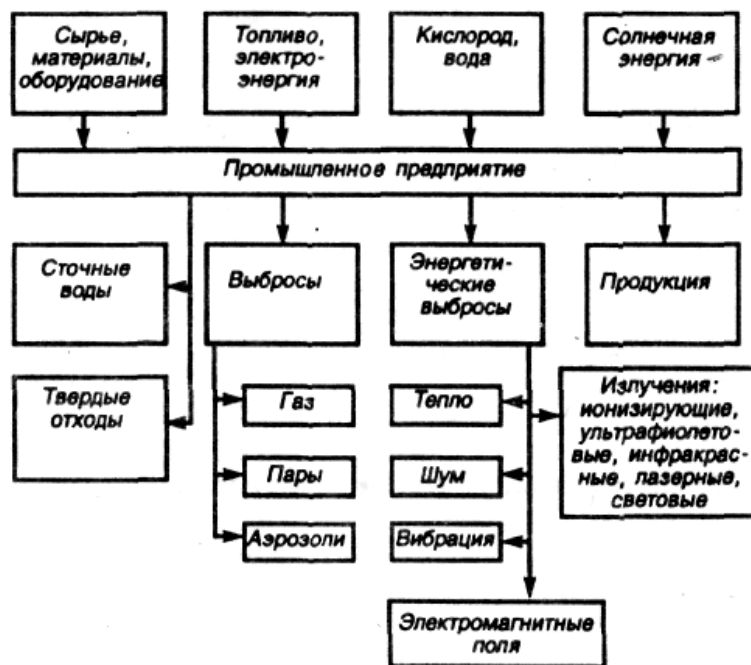


Рис. 5.1 – Схема взаимодействия предприятия со средой

Гальванические цехи. Вредные вещества в помещении находятся в виде пыли, тонкодисперсного тумана, паров и газов. Наиболее интенсивно вредные вещества выделяются при кислотном и щелочном травлении. Массу вредных веществ, выделяющихся при травлении с поверхности S , m^2 зеркала ванны, определяют по формуле:

$$M = QS, \text{ мг/мин,}$$

где Q — интенсивность выделения вредных веществ с единицы площади ванны $\text{мг}/(\text{м}^2 \text{мин})$.

При нанесении гальванических покрытий (воронение, фосфатирование, анодирование) образуются различные вредные вещества. При фосфатировании изделий выделяется фтористый водород, концентрация которого достигает $1,2—1,5 \text{ г/м}^3$. Концентрации HCl , H_2SO_4 , HCN , Gr_2O_3 , NO_2 , NaOH в удаляемом от гальванических ванн воздухе — в значительных пределах, что требует специальной очистки воздуха перед выбросом в атмосферу. При подготовительных операциях (механическая очистка, обезжиривание поверхностей) выделяются пыль, пары бензина, керосина, трихлорэтилена, туманы щелочей; в составе тумана — частицы $5—6 \text{ мкм}$ при травлении, $8—10 \text{ мкм}$ при хромировании, $5—8 \text{ мкм}$ при цианистом цинковании.

Цеха механической обработки. Обработка на станках сопровождается выделением пыли, стружки, туманов масел и эмульсий, которые через

вентиляционную систему выбрасываются из помещений. Количество выделяющейся пыли зависит от размеров и твердости обрабатываемого материала. При обработке текстолита, выделение пыли составляет от 20 г/ч до 120 г/ч на единицу оборудования; стеклоткани — от 9 г/ч до 20 г/ч; органического стекла от 800 г/ч до 950 г/ч.

Участки пайки и лужения. В воздух на этих участках выделяются токсичные газы (оксид углерода, фтористый водород), аэрозоли (свинец и его соединения).

Окрасочные цеха. Токсичные вещества выделяются в процессах обезжиривания поверхностей органическими растворителями перед окраской, при подготовке лакокрасочных материалов, при их нанесении на поверхность изделий и сушке покрытия. Воздух, удаляемый из окрасочных камер, напольный решеток, сушильных установок всегда загрязнен парами растворителей 10 г/м^3 , аэрозолями 1 г/м^3 . При окраске изделий порошковыми полимерными материалами в воздухе также содержится пыль.

5.1.1. СТОЧНЫЕ ВОДЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭВМ

Травленные и гальванические участки. Вода используется для приготовления технологических растворов, применяемых при травлении материалов, деталей и нанесения на них покрытий, а также для промывки деталей и ванн после сброса отработанных растворов и обработки помещения. Основные примеси сточных вод — пыль, металлическая окалина, эмульсии, щелочи и кислоты, тяжелые металлы.

5.1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Источники шума: транспорт, оборудование, вентиляторы, трансформаторы (электродинамический шум). Инфразвук возникает из-за обдувания сильным ветром строительных сооружений и промышленности (вентиляторы, транспорт), так при частоте 2—5 Гц и 100 дБ возникает головная боль; при 125 дБ — вибрация грудной клетки; 15—20 Гц — страх, нарушение вестибулярного аппарата.

Источники вибраций — технологическое оборудование, рельсовый транспорт, вибрация распространяется по фунту и достигает фундамента зданий (до 50 метров от рельс).

Источники электромагнитных полей (ЭМП) — радиолокационная станция (РЛС), линии электропередач (НЭП), термические цеха. Влияние ЭМП — это накопление заряда на предметах, у человека нарушение сердечно-сосудистой, дыхательной и нервной систем.

5.2. ОСНОВНЫЕ МЕРЫ ПО ЗАЩИТЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Основными мерами по защите окружающей среды являются:

- полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам важными направлениями экологии производства ЭВМ;
- совершенствование технологии производства и разработка нового оборудования с меньшим уровнем выбросов примесей и отходов;
- экологическая экспертиза всех видов производств и продукции;
- замена токсичных отходов на нетоксичные;

- замена не утилизируемых отходов на утилизируемые;
- применение дополнительных методов по защите окружающей среды, т. е. аппараты очистки газовых выбросов, сточных вод от примесей; глушители шума при сбросе газов в атмосферу; виброизоляторы оборудования; экраны для защиты от ЭМП.

Рациональное размещение источников загрязнений:

- вынесение предприятий из крупных городов в малонаселенные районы с непригодными и малопригодными для сельскохозяйственного использования землями;
- оптимальное расположение промышленных предприятий с учетом топографии местности и розы ветров;
- установление санитарно-защитных зон вокруг промышленных предприятий;
- рациональная планировка городской застройки, обеспечивающая экологические условия для человека и растений;
- организация движения транспорта с целью уменьшения выброса токсичных веществ в зону жилой застройки.

5.3. ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ

Циклон. Загрязненный воздух вводится в циклон через патрубок 3 по касательной к внутренней поверхности корпуса 1 и совершает вращательно-поступательное движение вдоль корпуса к бункеру 4. Под действием центробежной силы частицы пыли отбрасываются к стенке циклона и оседают в бункер. Освободившись от пыли воздух выходит через трубу 2 (рис.5.2).

Пылеуловитель ротационного типа. При работе вентиляторного колеса 1 за счет центробежной силы пыль отбрасывается к стенке спиралеобразного контура 2 и движется по ней в направлении выхлопного отверстия 3. Очищенный воздух поступает в трубу 4 (рис.5.3).

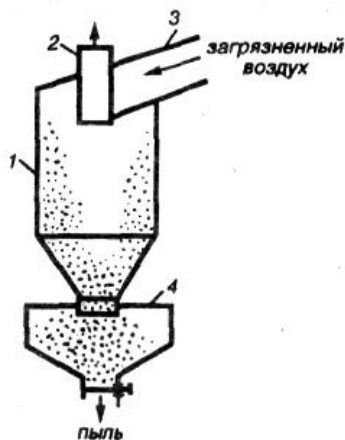


Рис. 5.2 – Циклон

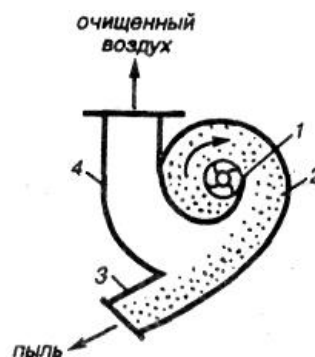


Рис. 5.3 – Пылеуловитель ротационного типа

Жалюзийный пылеотделитель. На жалюзийных решетках воздух разделяется на два потока. Отделение частиц пыли от основного потока на жалюзийных решетках происходит под действием инерционных сил, возникающих при повороте потока воздуха на входе в решетку, а также за счет эффекта отражения частиц от поверхности решетки при соударении (рис.5.4).

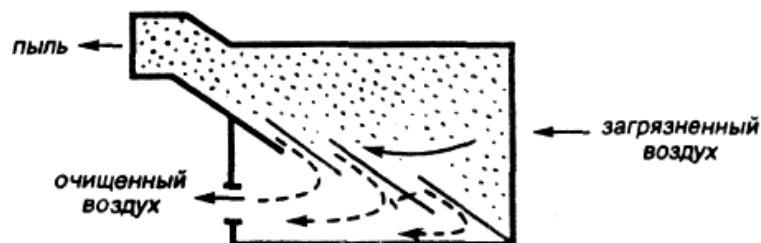


Рис. 5.4 – Жалюзийный пылеотделитель

Фильтры. Очистка воздушного потока выполняется сменными фильтрами при небольшой запыленности воздуха, иначе возникает потребность в частой смене фильтра (рис. 5.5).

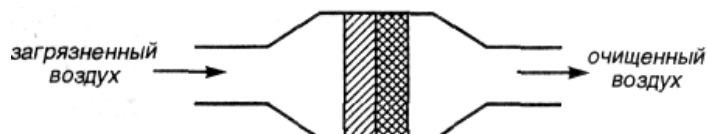


Рис. 5.5 - Фильтр

Электрофильтры. В зазоре между коронирующим 1 и осадительным 2 электродами возникает электрическое поле убывающей напряженности. Коронирующий заряд составляет 50 кВ. Частицы, поступающие в зону поля, приобретают отрицательный заряд (за долю секунды) и движется в сторону электрода с противоположным знаком. Движение частиц происходит под действием аэродинамических сил. Частицы (отдают свой заряд) прилипают к стенкам бункера. Периодически бункер встряхивается, частицы оседают на дно и удаляются (рис. 5.6).

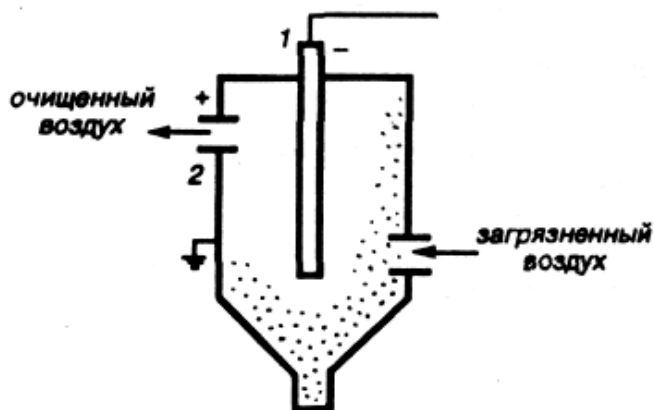


Рис. 5.6 - Электрофильтр

Мокрые пылеуловители. Предназначены для очистки от мелкодисперсной пыли ($d = 0,1—1$ мкм) и горящих (взрывоопасных) газов. Аппараты мокрой очистки работают по принципу осаждения частиц пыли на поверхности либо капель жидкости, либо пленки жидкости. Осаждения частиц пыли на жидкость происходит под действием сил инерции и броуновского движения.

Туманоуловители предназначены для очистки воздуха от туманов кислот, щелочей, масел. Используются волокнистые фильтры, принцип действия которых основан на осаждении капель на поверхности пор с последующим стечением жидкости под действием сил тяжести (рис. 5.7).

Фильтр — перфорированный барабан с глухой крышкой. В барабане установлен грубоволокнистый войлок толщиной 3—5 мм. Вокруг барабана на

его внешней стороне расположен брызгоуловитель, представляющий собой набор перфорированных плоских и гофрированных слоев винипластовых лент. Брызгоуловитель и фильтроэлемент нижней частью установлены в слоях жидкости (рис.5.7).

5.4. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

Очистка сточных вод от твердых частиц в зависимости от их свойств, концентрации осуществляется методами процеживания, отстаивания, отделения твердых частиц в поле действия центробежных сил и фильтрования (рис. 5.8).

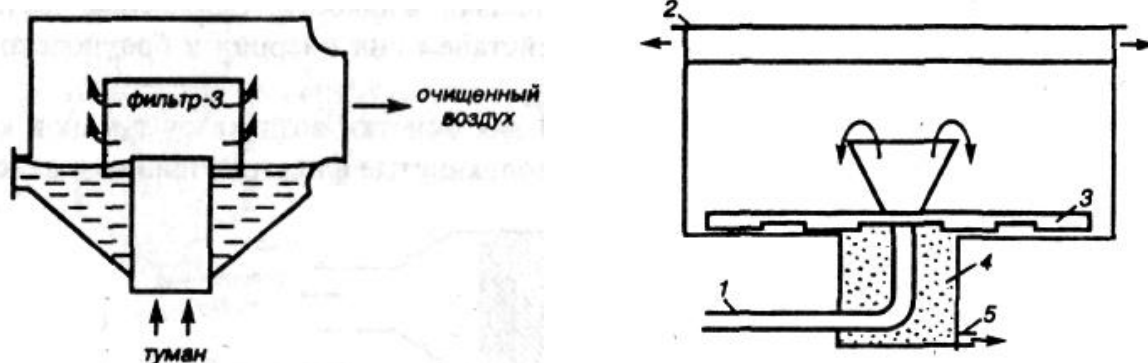


Рис. 5.7 – Туманоуловитель Рис. 5.8 – Схема очистки сточных вод

Процеживание (до 25 мкм) выполняется пропусканием воды через решетки и волокнуловители.

Отстаивание основано на особенностях процесса осаждения твердых частиц в жидкости при объемной концентрации частиц до 1%. Очищаемая сточная вода по входному патрубку 1 с расширяющимся диаметром сечения на выходе поступает в отстойник и движется в радиальном направлении. Очищенная сточная вода по отводящим трубопроводам 2 направляется для дальнейшей отработки вращающимся скребком 3 и через канал 5 периодически удаляется из отстойника.

Фильтрование предназначено для очистки от тонкодисперсных примесей с небольшой концентрацией. Фильтры зернистые (кварцевый песок, дробленый шлак, гравий), очищаемую жидкость пропускают через насадки несвязных пористых материалов.

Микрофильтры — фильтроэлементы которых изготовлены из связанных пористых материалов.

5.5. ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ,

где сточные воды после очистки вновь используют технологии производства

На заводах применяют оборотные системы водоснабжения отдельных цехов и участков, сточные воды которых имеют стабильный состав примесей, или двухступенчатую очистку, при которой сточные воды предварительно очищают в локальных очистных сооружениях от примесей, наиболее характерных для данных участков и цехов, а затем осуществляют доочистку на общезаводских сооружениях.

При разработке оборотных систем водоснабжения необходимо

планировать: раздельную организацию стоков с водосборных участков, отличающихся по составу и количеству примесей, поступающих в сточные воды, а также локальные очистные сооружения.

Сточные воды из водосборных коллекторов (рис. 5.9) по трубопроводу 2 поступают в отстойник 1, откуда насосом 4 они подаются на песчаный фильтр 6, а далее поступают в емкость 7 очищенной водой и по трубопроводу 8 направляются для пользования в различных целях. Осадок, скапливающийся в отстойнике 1, поступает в уплотнитель осадка 12, в который также по трубопроводу 11 подают осадок из резервуара промывной воды 10, образующейся при промывке фильтра 6 очищенной водой, отбираемой насосом по трубопроводу 9. Промывная вода из фильтра 6 поступает в резервуар 10 по трубопроводу 5 и насосом 4 через трубопровод 3 направляется в отстойник 1. Уплотненный осадок удаляется из уплотнителя 12 по трубопроводу 13.

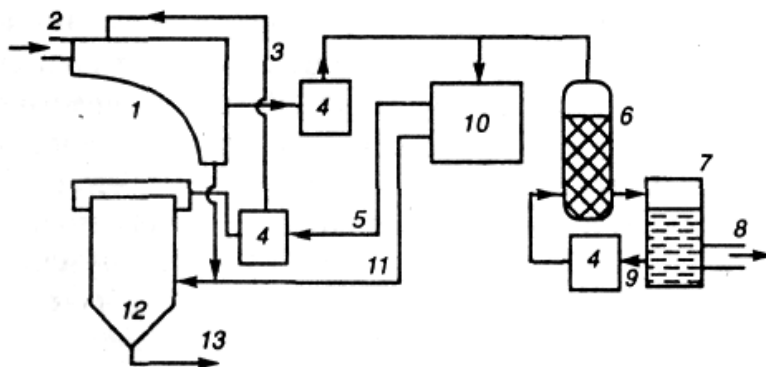


Рис. 5.9 – Схема очистного сооружения предприятия

Очищенные поверхностные сточные воды используют для подпитки оборотных систем водоснабжения. Используют их в системах пожарного тушения, при этом очистка сточных вод ограничивается, как правило, отстаиванием в прудах.

5.6. ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Обработка твердых отходов проводится в местах образования отходов, что сокращает затраты на погрузочно-разгрузочные работы, снижает безвозвратные потери при их перевалке и транспортировке и высвобождает транспортные средства. Основными операциями первичной обработки металлических отходов являются сортировка, разделка и механическая обработка. Сортировка заключается в разделении лома и отходов по видам металлов. Разделка лома состоит в удалении неметаллических включений. Механическая обработка включает рубку, резку и брикетирование на прессах.

Переработку промышленных отходов производят на специальных полигонах — для централизованного сбора, обезвреживания и захоронения токсичных отходов промышленных предприятий. Жидкие токсичные отходы перед вывозом на полигон должны быть обезврежены на предприятиях. Приему на полигон не подлежат отходы, для которых разработаны эффективные методы извлечения металлов; нефтепродукты, подлежащие регенерации; радиоактивные отходы.

6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭВМ И СИСТЕМ

Один из основных параметров ЭВМ — надежность. Она зависит как от надежности используемой элементной базы, так и от принятых схемотехнических и конструкторских решений. Учитывая значимость современной ЭВМ в хозяйственной деятельности человека, требования к ее надежности постоянно повышают. Это связано с тем, что от правильной работы ЭВМ зависят ход выполнения технологического процесса, достоверность получения результатов расчетов, жизнеобеспечение космического аппарата и т. д. Поэтому вопросам повышения надежности ЭВМ на всех этапах ее проектирования и производства уделяется самое большое внимание.

6.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ НАДЕЖНОСТИ

Надежность ЭВМ — свойство выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в допустимых пределах в течение требуемого промежутка времени, и возможность возобновления функционирования, утраченного по тем или иным причинам.

В любой момент времени ЭВМ может находиться в исправном или неисправном состоянии. Если ЭВМ в данный момент времени удовлетворяет всем требованиям, установленным как в отношении основных параметров, характеризующих нормальное выполнение вычислительных процессов (точность, быстродействие и др.), так и в отношении второстепенных параметров, характеризующих внешний вид и удобство эксплуатации, то такое состояние называют исправным состоянием. В соответствии с этим определением неисправное состояние — состояние ЭВМ, при котором она в данный момент времени не удовлетворяет хотя бы одному из этих требований, установленных в отношении как основных, так и второстепенных параметров.

Однако не каждая неисправность приводит к невыполнению ЭВМ заданных функций в отношении основных параметров. Например, образование вмятин или ржавчины на корпусе машины, выход из строя лампочек подсветки не могут препятствовать эксплуатации ЭВМ. Поэтому для оценки надежности систем введены понятия «работоспособность» и «отказ».

Работоспособность — состояние ЭВМ, при котором она в данный момент времени соответствует всем требованиям в отношении основных параметров, характеризующих нормальное протекание вычислительных процессов.

Отказ — событие, состоящее в полной или частичной утрате работоспособности системы. Так как не всякая неисправность приводит к отказу, то на практике различают неисправности основные и второстепенные. Основные неисправности приводят к отказу. Второстепенные неисправности не приводят к отказу, однако создают неудобства в эксплуатации и портят внешний вид ЭВМ. Поэтому второстепенные неисправности целесообразно своевременно устранять.

Возникновение отказа во времени — случайное событие, что позволяет для оценки надежности ЭВМ использовать методы теории вероятности и математической статистики. Чтобы определить влияние на характеристики ЭВМ отказов различного вида, целесообразно произвести их классификацию.

По характеру изменения параметров до момента возникновения отказы делят на внезапные и постепенные. *Внезапные* (катастрофические) отказы возникают в результате мгновенного изменения одного или нескольких параметров элементов, из которых построена ЭВМ (обрыв или короткое замыкание). Устранение внезапного отказа производят заменой отказавшего элемента (блока, устройства) исправным или его ремонтом. *Постепенные* отказы возникают в результате постепенного изменения параметров элементов до тех пор, пока значение одного из параметров не выйдет за некоторые пределы, определяющие нормальную работу элементов (старение элементов, воздействие окружающей среды, колебания температуры, влажности, давления, уровня радиации и т. п.), механические воздействия (вибрации, удары, перегрузки). Устранение постепенного отказа связано либо с заменой, ремонтом, регулировкой параметров отказавшего элемента, либо с компенсацией за счет изменения параметров других элементов. По характеру устранения отказы делят на устойчивые и самоустраниющиеся. Для устранения *устойчивых* отказов оператор, обслуживающий ЭВМ, должен отрегулировать или заменить отказавший элемент. *Самоустраниющиеся* отказы исчезают без вмешательства оператора, проявляются в форме сбоя или перемежающего отказа.

Сбой — однократно возникающий самоустраниющийся отказ. Если несколько сбоев следуют друг за другом, то наблюдается перемежающийся отказ. Отказ типа сбоя особенно характерен для ЭВМ. Появление сбоев обуславливается внешними и внутренними факторами. К внешним факторам относятся колебания напряжения питания, вибрации, температурные колебания. Специальными мерами (стабилизации питания, амортизация, термостатирование и др.) влияние этих факторов может быть значительно ослаблено. К внутренним факторам относятся флуктуационные колебания параметров элементов, несинхронность работы отдельных устройств, внутренние шумы и наводки.

Если в ЭВМ возникает сразу несколько отказов, то по их взаимной связи различают *независимые* отказы (возникновение их не связано с предшествующими отказами) и *зависимые* (появление их вызвано отказом в предыдущий момент времени). По внешним проявлениям отказы делят на явные и неявные. *Явные* отказы обнаруживаются при внешнем осмотре, а *неявные* отказы — специальными методами контроля.

Введенное выше понятие «отказ» позволяет рассмотреть основные эксплуатационные свойства ЭВМ: безотказность, ремонтоспособность, долговечность, сохраняемость.

Безотказность — свойство ЭВМ непрерывно сохранять работоспособность в заданных режимах и условиях эксплуатации без вынужденных простоев. Это свойство характеризует функционирование системы до первого отказа и используется при оценке надежности ЭВМ одноразового применения.

Ремонтоспособность — свойство ЭВМ, заключающееся в приспособлении к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Долговечность — свойство ЭВМ сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Необходимо отметить, что предельное состояние определяется технической непригодностью ЭВМ из-за снижения эффективности или требований техники безопасности и оговаривается в технической документации.

Сохраняемость — свойство изделия сохранять эксплуатационные показатели в течение заданного срока хранения и после него. Это свойство характеризует безопасность ЭВМ в режиме хранения.

Надежность как сочетание свойств безотказности, ремонтоспособности, долговечности и сохраняемости и сами эти качества количественно характеризуются различными функциями и числовыми параметрами. Правильный выбор количественных показателей надежности ЭВМ позволяет объективно сравнивать технические характеристики различных вычислительных систем как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации (правильный выбор системы элементов, технические обоснования работы по эксплуатации и ремонту ЭВМ, объем необходимого запасного имущества и др.).

При определении надежности ЭВМ необходимо знать:

- процесс возникновения отказов устройств ЭВМ;
- конфигурацию системы, которая описывает характер соединения устройств и правила их работы;
- порядок обслуживания и ремонт устройств ЭВМ.

Процесс возникновения отказов в ЭВМ обычно описывается сложными вероятностными законами. Поэтому в инженерной практике для оценки надежности ЭВМ вводят количественные характеристики, для определения которых обычно используют экспериментальные данные и последующую их обработку. Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида ЭВМ (восстанавливаемые и невосстанавливаемые ЭВМ).

Невосстанавливаемые ЭВМ называют ЭВМ, которые в процессе выполнения своих функций не допускают ремонта. Если происходит отказ какого-либо устройства, то выполняемая операция будет сорвана и ее необходимо начинать вновь в том случае, если возможно устранение отказа. К таким устройствам относят как устройства одноразового действия, так и устройства многократного действия (системы ПВО, системы управления воздушным движением, системы управления химическими, металлургическими и другими ответственными технологическими процессами).

Восстанавливаемые ЭВМ называют ЭВМ, которые в процессе выполнения своих функций допускают ремонт. Если произойдет отказ такой ЭВМ, то он вызовет прекращение функционирования изделия только на период устранения отказа.

Показатели надежности невосстанавливаемых ЭВМ:

- плотность распределения времени безотказной работы $f(t)$,
- вероятность безотказной работы $P(t)$,
- вероятность отказа $Q(t)$,

- интенсивность отказов $\lambda(t)$,
- средняя наработка до первого отказа $T_{\text{ср}}$.

Наиболее точная количественная мера надежности каждого изделия — его индивидуальная наработка до момента возникновения отказа. На практике же достаточно полная характеристика надежности — плотность распределения времени безотказной работы данного типа изделий $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$. Для определения функций $f(t)$ и $\lambda(t)$ используют экспериментальные данные по испытанию изделий на надежность. При этом опыт ставится следующим образом: испытанию подвергают большую партию изделий N_0 , время наблюдения разбивают на n небольших отрезков Δt , на каждом из этих отрезков определяют число отказавших изделий ΔN_i . Отказавшие изделия либо не заменяют новыми (при определении $f(t)$ и $\lambda(t)$ невосстанавливаемых элементов), либо заменяют новыми (для восстанавливаемых элементов). По полученным результатам значение вероятности безотказной работы изделия в момент времени t , характеризующее его надежность, может быть определено из следующих соображений.

Если в рассматриваемый момент времени $t=t_x$ имеется N_x работающих изделий, а $m=N_0 - N_x$ вышли из строя, то опытная статистическая вероятность безотказной работы $P^* = N_x / N_0$, а опытная статистическая вероятность отказов $Q^* = (N_0 - N_x) / N_0 = m_x / N_0$ где P^* и Q^* характеризуют частоту отказов в данном опыте и являются оценками соответствующих «математических» вероятностей, которые определяются как пределы:

$$\lim_{N_0 \rightarrow \infty} N_x / N_0 = P; \quad \lim_{N_0 \rightarrow \infty} (N_0 - N_x) / N_0 = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} m_x / N_0 = Q, \quad P = 1 - Q.$$

«Математические» вероятности характеризуют не отдельную выборку, а всю генеральную совокупность изделий.

Определим зависимость P^* от времени, для чего рассмотрим приращение Δm_x на ограниченном отрезке времени Δt . Число элементов Δm_x , которое выйдет из строя за ограниченный промежуток времени Δt , будет пропорционально отрезку времени Δt и числу имеющихся в работе изделий N_x , т. е.

$$\Delta m_x = \lambda_t N_x \Delta t$$

где λ_t — коэффициент пропорциональности, принимаемый постоянным на ограниченном отрезке времени.

Переходя к бесконечно малым приращениям dm_x и учитывая

$$dm_x = -dN_x$$

получим

$$dm_x = -dN_x = \lambda_t N_x dt; \quad dN_x / N_x = -\lambda_t dt.$$

Интегрируя последнее выражение и имея в виду, что при $t = 0$; $N_x = N_0$ найдем,

$$\ln N = -\int_0^t \lambda_t dt$$

или, если освободиться от логарифмов,

$$P^* = N_x / N_0 = \exp\left(-\int_0^t \lambda_t dt\right)$$

Значение λ_t равное

$\lambda_t = -dN_x / (N_x dt) = d(m_x / m_0) / dt \cdot 1 / (N_x / N_0) = dQ^* / dt \cdot 1 / P^* = -dP^* / dt \cdot 1 / P^*$ называют *интенсивностью (опасностью) отказов*.

Таким образом, интенсивность отказов в момент времени t представляет собой вероятность отказов в единицу времени при условии, что до момента времени t отказов не было.

Зависимость интенсивности отказов от времени может быть определена экспериментально (рис. 6.1). Анализируя полученную кривую t , снятую, допустим, при испытаниях в нормальных условиях, можно отметить три временных интервала:

- 1) от 0 до t_1 — время приработки (1—1,5%) всего времени испытаний;
- 2) от t_1 до t_2 — время нормальной работы;
- 3) от t_2 до ∞ — время старения.

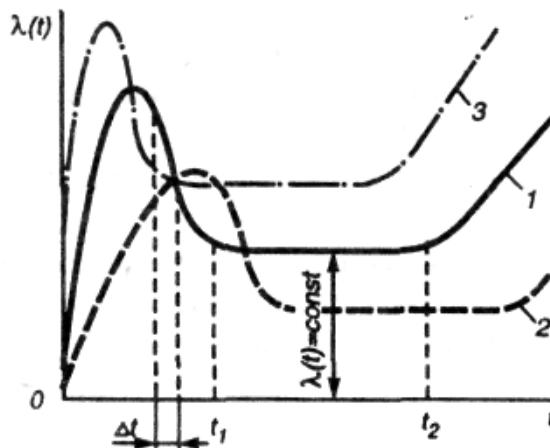


Рисунок 6.1 – График зависимости интенсивности отказов от времени

Время приработки характеризуется повышенным числом отказов и определяется проявлением технологических и производственных дефектов, время нормальной работы — высокой надежностью испытуемых изделий (интенсивность отказов на этом интервале практически постоянна).

При ослаблении (кривая 2) или ужесточении (кривая 3) условий испытаний зависимость $\lambda(t)$ изменится, но три характерных временных сохраняются. Полученные ранее зависимости вероятности безотказной работы $P(t)$ от интенсивности отказов $\lambda(t)$ называют *экспоненциальным законом* изменения $P(t)$ т. е.

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_t dt\right).$$

или $P(t) = e^{-\lambda t}$, если $\lambda = \text{const}$. Этот закон соблюдается в случае учета внезапных отказов. Известны и другие законы изменения $P(t)$.

1) *нормальный закон*, или распределение Гаусса (для постепенных отказов),

$$P(t) = 1/(2\pi\sigma)^{1/2} \int_0^{\infty} \exp[-(t - t_{cp})^2 / (2\sigma^2)] dt ,$$

где σ — дисперсия среднего времени безотказной работы;

T_{cp} — среднее время безотказной работы;

2) закон Вейбулла (при определении надежности электромеханических элементов) $P(t) = \exp(-t^k / T_{cp})$;

3) закон Эрланга (при определении надежности восстанавливаемых изделий) $P(t) = (1 + 2t / T_{cp}) \exp(-2t / T_{cp})$.

Один из важнейших числовых параметров надежности — среднее время безотказной работы, который определяется как математическое ожидание случайной величины, т. е.

$$T_{cp} = M_{\tau} = \int_0^{\infty} tq(t)dt ,$$

где $q(t)$ — плотность вероятности отказа.

Преобразуем этот интеграл к следующему виду, решив его по частям:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} tq(t)dt = -tP(t)|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t)dt ,$$

или

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt = 1/\lambda .$$

В общем случае интенсивность отказов λ_t зависит как от времени t , так и от параметров, характеризующих режим работы (U, I, W) и условия эксплуатации ($\mathcal{A}, z, a, \dots$), т. е. $\lambda_t = \varphi(t, U, I, \mathcal{A}, \dots, a, \dots)$. Исходя из анализа физических и физико-химических процессов, являющихся причинами возникновения отказов, определим зависимость λ_t от режимов работы.

Число отказов при прерывистом режиме работы элементов зависит как от времени их действительной работы t_p так и от числа циклов работы N , т. е. $m_x = \varphi(t_p, N)$. Бесконечно малое приращение числа отказов определим как полный дифференциал:

$$dm_x = \partial\varphi/\partial t_p dt_p + \partial\varphi/\partial N .$$

Так как $m_x = N_0 - N_x$ и, следовательно, $dm_x = -dN_x$, то после деления обеих частей на N_x имеем

$$dN_x / N_x = -(\partial\varphi/\partial t_p \cdot 1/N_x dt_p + \partial\varphi/\partial N \cdot 1/N_x dN) .$$

Обозначая $\partial\varphi/\partial t_p \cdot 1/N_x = \lambda_t$ и $\partial\varphi/\partial N \cdot 1/N_x = \lambda_N$ и учитывая, что при $t=0, N=0$ и $N_x=N_0$, получим

$$\ln(N_x / N_0) = - \left(\int_0^{t_p} \lambda_t dt_p + \int_0^N \lambda_N dN \right) .$$

Освободившись от логарифмов, имеем

$$P_1^* \approx N_x / N_0 = \exp \left(\int_0^{t_p} \lambda_t dt_p - \int_0^N \lambda_N dN \right).$$

Если примем, что $\lambda = \text{const}$ и $\lambda_N = \text{const}$, то

$$P_1^* \approx \exp[-(\lambda_t t_p + \lambda_N N)] = \exp[-(\lambda_t t_p / (N \tau_u) + \lambda_N N / t)] t = \exp[-(\lambda_t t_u / \tau_u + \lambda_N f)] t$$

где $t = N \tau_u$ — время, прошедшее с начала работы изделия;

$\tau_u = t_u + t_n$ — время цикла,

t_u и t_n — время использования (работы) изделия и время паузы,

$f = N / t$ — частота циклов.

Так как во время пауз наблюдаются отказы, то вероятность безотказной работы во время пауз можно определить как

$$P_2^* = \exp[-\lambda_p(t - t_p)] = \exp[-\lambda_p(1 - t_p / t)t] = \exp(-\lambda_p t_n t / \tau_u)$$

где λ_p — интенсивность отказов.

Вероятность отсутствия отказов за время t при прерывистой работе

$$P^* = P_1^* + P_2^* = \exp(-\lambda_t t_u / \tau_u - \lambda_p t_n / \tau_u - \lambda_N f) t = \exp(-\lambda_{\text{экр}} t)$$

где $\lambda_{\text{экр}} = \lambda_t t_u / \tau_u + \lambda_p t_n / \tau_u + \lambda_N f$

Интенсивность отказов также существенно зависит от режима использования элемента в конкретных функциональных блоках машины, условий окружающей среды и в общем случае равна

$$\lambda = \lambda_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 \dots a_n,$$

где λ_0 — значение интенсивности отказов, полученное в нормальных условиях;

a_1, a_2, a_3, a_4 — поправочные коэффициенты, соответственно учитывающие зависимость интенсивности отказов от значения электрической нагрузки;

$a_5, \dots, a_n$ — поправочные коэффициенты, учитывающие прочие факторы режима использования и условий окружающей среды.

Значение интенсивности отказов λ_0 определяется при температуре окружающей среды от 15 °С до 35 °С, атмосферном давлении (100 ± 4) Па; относительной влажности $(65 \pm 15)\%$; естественном фоне радиации; коэффициенте электрической нагрузки $K_H = 1$. Для случая, когда известны интенсивности отказов λ_{oi} отдельных элементов, составляющих конструкцию, интенсивность отказов последней определяется по формуле

$$\lambda = \sum_{i=0}^n \lambda_{oi},$$

где λ_{oi} — интенсивность отказов i -го элемента;

n — количество элементов.

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых устройств и восстанавливаемых

устройств до первого отказа.

Большинство современных ЭВМ относят к восстанавливаемым изделиям, количество элементов которых остается постоянным в течение всего срока службы, так как каждый из отказавших элементов заменяют новым. Поэтому при определении показателей надежности ЭВМ можно рассматривать как работающую непрерывно, но в которой время от времени возникают отказы (время исправной работы до очередного отказа и время восстановления случайны). На временной оси чередование времени исправной работы и времени восстановления может быть представлено в виде отрезков, длина которых случайна. Критерии надежности восстанавливаемых ЭВМ: параметр потока отказов $\omega(t)$; наработка на отказ T ; параметр потока восстановления $\mu(t)$; среднее время восстановления T_B , коэффициент готовности K_r ; коэффициент вынужденного простоя K_n .

При оценке надежности восстанавливаемых ЭВМ можно использовать или статистические характеристики случайного времени работы от момента восстановления предыдущего отказа до последующего, или статистические характеристики числа отказов за выбранное время наработки. Предположим, что для определения показателей надежности аппаратуры наблюдают за эксплуатацией N образцов ЭВМ в течение времени t , фиксируя число $m_i(t)$ отказов каждого образца. Среднее число отказов за время

$$t_N m_{cp}(t) = 1/N \sum_{i=1}^N m_i(t).$$

В число $m_i(t)$ входят как первоначальные отказы, так и отказы, возникающие после восстановления или замены отказавших элементов. Появление отказов в каждом из образцов аппаратуры можно рассматривать как поток требований к обслуживанию, в данном случае к восстановлению. Характеристику этого потока определяют как

$$H(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} 1/N \sum_{i=1}^N m_i(t).$$

По значению функции $H(t)$ вычисляют параметр потока отказов. Уравнение для этих вычислений имеет вид

$$\omega(t) = dH(t)/dt. \quad (6.1)$$

На практике используют другое уравнение, позволяющее определить приближенное значение параметра потока отказов:

$$\omega(t) \approx 1/(N\Delta t) \left[\sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t) \right],$$

где Δt — достаточно малый промежуток времени.

Для ЭВМ характерен так называемый период приработки, который заканчивается к моменту времени t_0 . В этом случае характеристика потока отказов становится линейной и уравнение кривой $H(t)$ может быть записано следующим образом:

$$H(t) = H(t_0) + (t - t_0)\omega, \quad (6.2)$$

где ω — постоянная величина. Используя (6.1), можно определить параметр

потока отказов:

$$\omega(t) = d[H(t_0) + (t - t_0)\omega]/dt = \omega = \text{const}.$$

В ЭВМ поток отказов равен сумме потоков отказов отдельных устройств. Если каждый в отдельности поток оказывает на суммарный поток достаточно равномерное и небольшое влияние, то суммарный поток будет простейшим. Простейший поток должен удовлетворять условиям стационарности, отсутствию последействия и ординарности. Стационарность потока означает, что вероятность появления k отказов за промежуток времени $t_0 - (t_0 + t)$ не зависит от t_0 и является функцией переменных t и k .

Отсутствие последействия потока состоит в том, что вероятность появления k отказов в течение промежутка времени $t_0 - (t_0 + t)$ не зависит от того, сколько было отказов и как часто они возникали до этого промежутка времени. *Ординарность потока* выражает условие практической невозможности появления двух или нескольких отказов в один и тот же момент времени. Основной тип потока отказов в ЭВМ, работающей в стабильных условиях эксплуатации, — *простейший поток*. Основной показатель надежности восстанавливаемых изделий — *наработка на отказ T* , определяемая как среднее значение наработки ЭВМ между отказами. В тех случаях, когда наработка на отказ выражена в единицах времени, используется другой термин — *среднее время безотказной работы*. Для интервала времени от наработки t_1 до наработки t_2 точное уравнение для вычисления наработки на отказ T имеет вид

$$T = (t_2 - t_1)/[H(t_2) - H(t_1)], \quad (6.3)$$

где $H(t)$ — характеристика потока отказов.

Для практических расчетов обычно используют приближенное уравнение

$$T \approx (t_2 - t_1)/[\omega(t_2) - \omega(t_1)].$$

Нетрудно убедиться, что по окончании периода приработки, когда характеристика потока становится линейной, наработка на отказ не зависит от выбора значений t_1 и t_2 . Представим, что $t_1 = t_0 + \Delta t_1$ и $t_2 = t_0 + \Delta t_2$. Используя (6.2) и (6.3), получим

$$T = [(t_0 + \Delta t_2) - (t_0 + \Delta t_1)]/[H(t_0) + \Delta t_2\omega - H(t_0) - \Delta t_1\omega] = 1/\omega,$$

где ω — параметр потока отказов.

Предполагая независимость наработки на отказ от времени, можно получить соотношение для вычисления величины T по данным эксплуатации одной ЭВМ:

$$T = 1/n \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i — наработка между соседними отказами;

n — число отказов за наблюдаемый период эксплуатации.

Точность определения времени наработки на отказ по приведенной выше формуле будет тем больше, чем больше число зафиксированных отказов. Для повышения достоверности можно использовать данные об отказах нескольких образцов аппаратуры, которые эксплуатируются в сходных условиях:

$$T = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m t_{ik} / \sum_{k=1}^N n_k ,$$

где t_{ik} — наработка между соседними отказами k -го образца аппаратуры;
 n_k — число отказов k -го образца аппаратуры;
 N — число наблюдаемых образцов.

Для оценки надежности работы восстанавливаемой аппаратуры такой показатель, как вероятность безотказной работы, используют редко. Однако при оценке эффективности работы сложных систем, куда входит ЭВМ, может возникнуть необходимость в вычислении вероятности безотказной работы за период между наработками t_1 и t_2 . Уравнение для этого случая имеет вид

$$P(t_2 - t_1) = \exp\{-[H(t_2) - H(t_1)]\}.$$

Если характеристика потока отказов $H(i)$ линейна, то эта формула упрощается, т. е.

$$P(t) = \exp(-\alpha t) = \exp(-t/T),$$

где $t = t_2 - t_1$.

Среднее время восстановления T_B — важный показатель качества восстанавливаемой аппаратуры, являющийся случайной величиной, статистические характеристики которой зависят от приспособленности аппаратуры к восстановлению. Определяется среднее время восстановления как среднее время вынужденного нерегламентированного простоя, вызванного отыскиванием и устранением одного отказа. Этот показатель можно рассчитывать по результатам эксплуатации ЭВМ в течение большого интервала времени наблюдения:

$$T_B^* = 1/m \sum_{i=1}^m \tau_i ,$$

где τ_i — время, затраченное на восстановление утраченных свойств аппаратуры при i -м отказе;

m — общее число восстановлений.

Если из последовательности операций сделать выборку промежутков восстановлений, то моменты восстановлений образуют поток требований, аналогичных потоку отказов. Этот поток называют *потоком восстановлений*. Его основная характеристика — *параметр потока* $\mu(t)$. Иногда этот параметр называют *интенсивностью восстановления*, которая статистически определяется как отношение числа восстановленной ЭВМ за период наблюдения к суммарному времени восстановления:

$$\mu^* = m / \sum_{i=1}^m \tau_i .$$

Из соотношения следует, что *интенсивность восстановления* — величина, обратная среднему времени восстановления. Сравнивая такие характеристики, как наработка на отказ и среднее время восстановления, необходимо отметить, что первая из этих характеристик является аппаратурной, т. е. характеристикой, зависящей в основном от внутренних свойств аппаратуры, а вторая — характеристикой системы человек — машина,

зависящей как от внутренних свойств ЭВМ, так и от квалификации обслуживающего персонала. Эти показатели связаны *коэффициентом готовности* K_G , определяемым отношением времени исправной работы к сумме времени восстановления и времени работы (при условии, что период приработки закончился):

$$K_G = \sum_{i=1}^m t_i / \left(\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i \right) = T / (T + T_B).$$

Этот коэффициент позволяет найти вероятность исправного состояния аппаратуры в любой момент времени.

Коэффициентом вынужденного простоя K_{Π} называют отношение времени вынужденного простоя к сумме времени исправной работы и вынужденных простоев ЭВМ, взятых за один и тот же календарный срок:

$$K_{\Pi} = t_{\Pi} / (t_p + T_{\Pi}).$$

Коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя связаны между собой зависимостью $K_{\Pi} = 1 - K_G$.

6.2. СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Структурная надежность любого радиоэлектронного аппарата, в том числе и ЭВМ, — это его результирующая надежность при известной структурной схеме и известных значениях надежности всех элементов, составляющих структурную схему. При этом под элементами понимаются как интегральные микросхемы, резисторы, конденсаторы и т. п., выполняющие определенные функции и включенные в общую электрическую схему ЭВМ, так и элементы вспомогательные, не входящие в структурную схему ЭВМ: соединения паяные (разъемные), элементы крепления и т. д. (*Примечание.* Надежность указанных элементов достаточно подробно изложена в специальной литературе. В дальнейшем при рассмотрении надежности ЭВМ будем исходить из того, что надежность элементов, составляющих структурную (электрическую) схему ЭВМ, задана однозначно.)

Количественные характеристики структурной надежности ЭВМ. Для их нахождения составляют структурную схему ЭВМ и указывают элементы устройства (блоки, узлы) и связи между ними. Затем производят анализ схемы и выделяют те ее элементы и связи, которые определяют выполнение основной функции данного устройства. Далее из выделенных основных элементов и связей составляют функциональную схему, причем в ней выделяют элементы не по конструктивному, а по функциональному признаку с таким расчетом, чтобы каждому функциональному элементу обеспечивалась независимость, т. е. чтобы отказ одного функционального элемента не вызывал изменения вероятности появления отказа у другого — соседнего функционального элемента. Поэтому при составлении отдельных функциональных схем (устройств узлов, блоков) иногда следует объединять те конструктивные элементы, отказы которых взаимосвязаны, но не влияют на отказы других элементов.

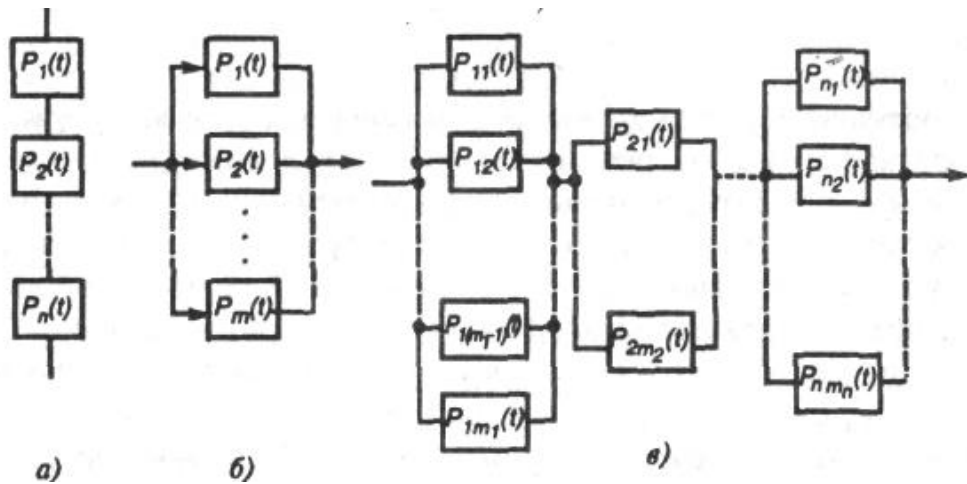


Рисунок 6.2 – Схемы последовательного (а), параллельного (б) и параллельно-последовательного (в) включения элементов в структурной схеме

Определение количественных показателей надежности ЭВМ с помощью структурных схем дает возможность решать вопросы выбора наиболее надежных функциональных элементов, узлов, блоков, из которых состоит ЭВМ, наиболее надежных конструкций ТЭЗ, панелей, рам, стоек, пультов, тумб, рационального порядка эксплуатации, профилактики и ремонта ЭВМ, состава и количества ЗИП. При построении структурных схем используют последовательное, параллельное и последовательно-параллельное включение элементов. При последовательном включении элементов (рис. 6.2, а) для надежной работы схемы необходима работа всех функциональных элементов. Тогда вероятность безотказной работы схемы будет равна произведению вероятностей безотказной работы всех функциональных элементов:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (6.4)$$

Если вероятности безотказной работы всех элементов одинаковы, т. е.

$$P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t) = P_0(t), \text{ то } P(t) = P_0^n(t).$$

Если $P_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, то

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right) = \exp(-\lambda_\Sigma t),$$

где $\lambda_\Sigma = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n$.

Среднее время наработки на отказ в этом случае

$$T_{\text{ср}} = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 / \lambda_\Sigma. \quad (6.5)$$

При равной надежности всех элементов $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$

$$\lambda_\Sigma = n\lambda; \quad P(t) = \exp(-n\lambda t); \quad T_{\text{ср}} = 1/n\lambda.$$

Для другого простейшего случая построения структурной схемы параллельного соединения элементов (рис. 6.2, б) вероятности отказов для каждого из элементов, входящих в схему,

$$q_j(t) = 1 - P_j(t).$$

Отказ всей схемы будет тогда, когда откажут все элементы,

$$Q(t) = q_1(t)q_2(t)...q_m(t) = \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)],$$

где m — число параллельно соединенных элементов.

При этом вероятность безотказной работы всей схемы

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)], \quad (6.6)$$

В случае применения равнонадежных элементов, если $P_1(t) = P_2(t) =$

$P_m(t) = P_0(t)$, то $Q(t) = q_0^m(t) = [1 - P_0(t)]^m$ и $P(t) = 1 - [1 - P_0(t)]^m$.

Если $P_0 = \exp(-\lambda t)$, то

$$T_{\text{ср}} = 1/\lambda + 1/(2\lambda) + \dots + 1/(m\lambda). \quad (6.7)$$

При параллельно-последовательном соединении элементов (рис. 6.2, в) следует найти вероятность безотказной работы для каждой из цепочек параллельно включенных элементов, а затем для всей схемы

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{ij}(t)] \right\}, \quad (6.8)$$

Пример. Рассчитать вероятность безотказной работы схемы, приведенной на рис. 6.3, при известных значениях вероятностей безотказной работы ее элементов: $P_1 = 0,9$; $P_2 = 0,97$; $P_3 = 0,88$.

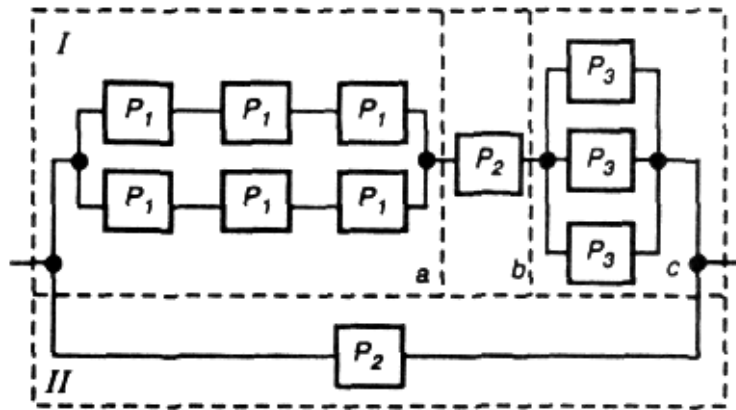


Рисунок 6.3 – К примеру расчета вероятности безотказной работы схемы

Разделим схему на цепи I и II, а цепь I — на участки a , b и c . Тогда с учетом принятых обозначений на основании (6.4) $P_I = P_a P_b P_c$ и на основании (6.6) $P = 1 - (1 - P_I)(1 - P_{II}) = 1 - (1 - P_a P_b P_c)(1 - P_{II})$.

$$P_a \text{ и } P_c \text{ } (P_b = P_{II} = P_2), P_a = 1 -$$

Из (6.4) и (6.6) находим $-(1 - P_I^3)^2$, $P_c = 1 - (1 - P_3)^3$.

Отсюда $P = 1 - \{1 - [1 - (1 - P_I^3)^2] P_2 [1 - (1 - P_3)^3]\} (1 - P_2)$.

Подставив в это выражение P_1, P_2, P_3 , получим $P = 0,996$.

Полученные аналитические выражения (6.1)—(6.5) позволяют произвести

расчет надежности функциональных элементов, узлов, блоков, устройств ЭВМ. Основой расчета количественных показателей надежности ЭВМ является предположение, что интенсивность отказов комплектующих элементов подчиняется экспоненциальному закону распределения. Однако наличие нескольких количественных характеристик не означает, что всегда нужно оценивать надежность устройств по всем показателям. Функциональные элементы представляют собой элементарные, но электрически законченные схемы (усилитель, генератор, триггер и др.), на которые разбивают структуру ЭВМ. Наиболее полно надежность функциональных элементов определяется интенсивностью отказов λ_e

$$\lambda_e = \sum_{i=1}^n K_{1i} \lambda_i n_i$$

где λ_i — интенсивность отказов комплектующего элемента i -го типа, входящего в состав функционального элемента;

n_i — число элементов i -го типа;

K_{1i} — коэффициент, учитывающий различие в интенсивности отказов элемента i -го типа при воздействии на него электрических нагрузок верхнего или нижнего уровней и продолжительности этих воздействий;

n — количество типов комплектующих элементов, входящих в состав функционального элемента;

i — номер комплектующего элемента.

Узел представляет собой совокупность функционально связанных между собой элементов (регистр, дешифратор, матрица). Количественно надежность узла достаточно полно характеризуется интенсивностью его отказов λ_g определяемой по формуле

$$\lambda_g = \sum_{i=1}^n K_{2i} \lambda_i n_i + \sum_{j=1}^m K_{2j} \lambda_{ej} n_j \quad (6.9)$$

где λ_i , λ_{ej} — интенсивность отказов отдельных комплектующих элементов i -го типа и интенсивность отказов функциональных элементов j -го типа, входящих в состав узла соответственно;

K_{2i} , K_{2j} — коэффициенты, учитывающие характер и длительность электрической нагрузки в соответствии с временной диаграммой работы узла;

n_i , n_j — количество комплектующих элементов i -го типа и функциональных элементов j -го типа соответственно; n , m — количество типов комплектующих элементов и функциональных элементов соответственно.

Блок представляет собой совокупность функциональных элементов и узлов (блок питания и др.). Количественно надежность блока целесообразно оценивать интенсивностью отказов λ_B и наработкой на отказ T_λ . Интенсивность отказов блока

$$\lambda_B = \sum_{i=1}^n K_{3i} \lambda_i n_i + \sum_{j=1}^m K_{3j} \lambda_{ej} n_j + \sum_{l=1}^p K_{3l} \lambda_{gl} n_l \quad (6.10)$$

где λ_i, λ_{ej} — интенсивности отказов отдельных комплектующих элементов i -го типа и отдельных функциональных элементов j -го типа, входящих в состав блока;

λ_{gl} — интенсивность отказов узла l -го типа, входящего в состав блока;

K_{3i}, K_{3j}, K_{3l} — коэффициенты временной загрузки комплектующих элементов, функциональных элементов и узлов при их работе в составе блока;

n_i, n_j, n_l — количество элементов, i -го, j -го и l -го типов;

n, m, p — количество типов комплектующих элементов, функциональных элементов и узлов в блоке.

Наработка на отказ блока

$$T_\lambda = 1/\lambda_B.$$

Среднее время восстановления блока

$$T_{\mu B} = \left(1/n_{ci} \sum_{i=1}^n t_{\mu i} + 1/n_{ej} \sum_{j=1}^m t_{\mu j} + 1/n_{gl} \sum_{l=1}^p t_{\mu l} \right) / N_{\mu B}$$

где $t_{\mu i}, t_{\mu j}, t_{\mu l}$ — соответственно среднее время восстановления отдельного комплектующего i -го элемента, функционального элемента j -го типа, узла l -го типа;

n_i, n_j, n_l — количество типов соответственно отдельных комплектующих i -х элементов, элементов в составе j -го типа функциональных элементов и l -го типа узла;

n_{ci}, n_{ej}, n_{gl} — суммарное количество типов комплектующих элементов, функциональных элементов и узлов соответственно;

m, p — количество функциональных элементов и узлов в составе блока;

$N_{\mu B}$ — количество частей оборудования блока, учитываемых при расчете.

Панель — конструктивная единица, служащая для электрического и механического объединения ТЭЗ. Интенсивность отказов панели λ_p определяется по формуле

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i n_i + \sum_{j=1}^m \lambda_j n_j + \sum_{r=1}^p K_{4r} \lambda_{er} + \sum_{q=1}^k \lambda_q n_q, \quad (6.11)$$

где λ_i, λ_j — интенсивность отказов элементов i -го типа (электрорадиоэлемент или специальный элемент) или j -го типа (интегральная схема), расположенных непосредственно на панели;

λ_{er} — интенсивность отказов типового элемента замены r -го типа;

K_{4r} — коэффициент, учитывающий временную загрузку ТЭЗ r -го типа в составе блока или устройства;

λ_q — интенсивность отказов элементов конструкции панели;

n, m, p, k — количество типов элементов;

n_i, n_j, n_r, n_q — количество элементов i -го, j -го типов ТЭЗ r -го типа, элементов конструкции панели q -го типа. Среднее время восстановления

панели

$$T_{\mu P} = \left(1/n \sum_{i=1}^n t_{\mu i} + 1/m \sum_{j=1}^m t_{\mu j} + 1/p \sum_{l=1}^p t_{\mu l} \right) / N_{\mu P}$$

где $t_{\mu i}$ — среднее время восстановления отдельного комплектующего элемента i -го типа;

$t_{\mu r}$ — среднее время восстановления ТЭЗ r -го типа;

$t_{\mu j}$ — среднее время восстановления элемента i -го типа в составе функционального элемента j -го типа;

m — количество типов элементов в составе функционального элемента j -го типа;

n, m, p — количество типов отдельных комплектующих элементов, функциональных элементов, ТЭЗ и элементов конструкции панели;

$N_{\mu P}$ — количество частей оборудования панели, учитываемых при расчете $T_{\mu P}$. Значения $N_{\mu P}$ соответствуют сумме чисел в числителе.

Рама — конструктивная единица, служащая для размещения и механического крепления одной или нескольких панелей. Интенсивность отказов рамы

$$\lambda_P = \sum_{g=1}^s K_{5g} \lambda_p n_g + \sum_{q=1}^k \lambda_q n_q, \quad (6.12)$$

где λ_{Pg} — интенсивность отказов панели g -го типа; K_{5g} — коэффициент, учитывающий временную загрузку работы панелей g -го типа в составе устройства или модели в случае, если на панели расположен целый блок или устройство; λ_q — интенсивность отказов элементов конструкции рамы;

n_g, n_q — количество панелей g -го типа и элементов конструкции рамы q -го типа соответственно;

s, k — количество типов панелей и элементов конструкции рамы.

Среднее время восстановления рамы

$$T_{\mu i} = \left(1/p \sum_{g=1}^p t_{\mu g} + 1/k \sum_{q=1}^k t_{\mu q} \right) / N_{\mu i}$$

Где $t_{\mu g}, t_{\mu q}$ — среднее время восстановления панели g -го типа и элемента конструкции рамы q -го типа;

p, k — количество типов панелей и элементов конструкции рамы;

$N_{\mu i}$ — количество частей оборудования рамы, учитываемых при расчете $T_{\mu i}$. Значения $N_{\mu i}$ соответствуют числу Σ в числителе.

Стойка — закрытая конструкция, служащая для размещения и механического крепления рам к панелями и некоторого числа дополнительных устройств. Интенсивность отказов стойки

$$\lambda_c = \sum_{e=1}^u K_{6e} \lambda_{Ce} n_e + \sum_{g=1}^V K_{7g} \lambda_{Cg} n_g + \sum_{v=1}^k \lambda_v n_v \quad (6.13)$$

где λ_{Ce} , λ_{Cg} , λ_v — интенсивность отказов рамы e -го типа, дополнительного устройства g -го типа и элемента конструкции v -го типа;

K_{6e} — коэффициент, учитывающий временную загрузку работой рамы e -го типа в составе модели в случае, если на раме расположено оборудование целого устройства;

K_{7g} — коэффициент, учитывающий временную загрузку работой дополнительного устройства g -го типа;

n_e , n_g , n_v — количество рам e -го типа, дополнительных устройств g -го типа и элементов конструкции стойки v -го типа соответственно;

u , V , k — количество рам, дополнительных устройств и элементов конструкции стойки.

Среднее время восстановления стойки

$$T_{\mu C} = \left(1/u \sum_{e=1}^u t_{Ce} + 1/V \sum_{g=1}^V t_{Cg} + 1/k \sum_{q=1}^k t_{Cq} \right) / N_{\mu C},$$

где t_{Ce} , t_{Cg} — среднее время восстановления рам e -го типа и дополнительных устройств g -го типа;

t_{Cq} — время восстановления элементов q -го типа конструкции стойки;

k — количество типов элементов конструкции стойки;

u , V — количество рам и дополнительных устройств в стойке;

$N_{\mu C}$ — количество частей оборудования рамы, учитываемых при расчете $T_{\mu C}$ (значения $N_{\mu C}$ соответствуют числу Σ в числителе).

Расчет надежности тумбы и пульта производится методом и в последовательности, аналогичными расчету надежности стойки.

Расчет надежности периферийного оборудования. К периферийному оборудованию относят устройства ввода-вывода, внешние запоминающие устройства и т. п. Нарботку на отказ устройств периферийного оборудования определяют по формуле

$$T_{ПО} = 1/(\lambda_{эл} + K_8 \lambda_{np} + K_9 \lambda_{uc}),$$

где $\lambda_{эл}$ — интенсивность отказов электронной части устройства, определяемая (6.9);

λ_{np} , λ_{uc} — интенсивности отказов электропривода устройства и электромеханической исполнительной части устройства соответственно, определяемые либо по статистическим данным, либо расчетным путем по (6.9), (6.10);

K_8 , K_9 — коэффициенты, учитывающие загрузку электропривода устройства или электромеханической части устройства по отношению к электронной части устройства.

Среднее время восстановления устройства

$$T_{\mu y} = \left(1/z \sum_{i=1}^z t_{yi} + 1/f \sum_{j=1}^f t_{yj} + 1/h \sum_{q=1}^h t_{yq} \right) / N_{\mu y},$$

где t_{yi} , t_{yj} , t_{yq} — среднее время восстановления элементов i -го типа электронной части устройства, j -го типа электропривода и q -го типа электромеханической исполнительской части устройства;

z , f , h — количество типов элементов электронной части устройства, электропривода устройства и электромеханической исполнительской части устройства;

$N_{\mu y}$ — количество частей оборудования устройств, учитываемых при расчете $T_{\mu y}$. Значение $N_{\mu y}$ соответствует числу Σ в числителе.

Наработку устройства на отказ в единицах обработанной информации определяют по формуле $H_y = V_i T_{\lambda y}$ где V_i — техническая скорость устройства (например, количество строк в час для печатающего устройства). Коэффициент готовности

$$K_{Гy} = 1 / [1 + (T_{\mu y} / T_{\lambda y})].$$

Учет условий эксплуатации. В зависимости от назначения и объекта установки на ЭВМ могут воздействовать внешние факторы, снижающие уровень надежности, достигнутый на этапе ее производства или имеющийся при эксплуатации в нормальных условиях. Чтобы учесть снижение уровня надежности, при расчетах по выражениям (6.8) — (6.13) в них вводят дополнительный безразмерный коэффициент K_{λ} , числовое значение которого зависит от вида объекта, где будет эксплуатироваться данная ЭВМ. Если принять K_{λ} для лабораторных и благоустроенных помещений равным 1, то для стационарных наземных устройств $K_{\lambda} = 5$ —10, для отсеков кораблей $K_{\lambda} = 15$ —20, для автоприцепов $K_{\lambda} = 25$, для железнодорожных платформ $K_{\lambda} = 25$ —30, для высокогорных условий $K_{\lambda} = 80$; для самолетов $K_{\lambda} = 120$ —150, для управляемых снарядов $K_{\lambda} = 300$ —350, для ракет $K_{\lambda} = 900$ —1000.

Пример. ЭВМ, предназначенная для установки в самолет, состоит из $N = 200$ микросхем. Интенсивность отказов микросхем составляет $\lambda = 10^{-6}$ 1/ч. Найти T_{cp} и $P(t)$ при $t = 20$ ч. Для самолета $K_{\lambda} = 150$. С учетом условий эксплуатации $\lambda_{\Sigma} = NK_{\lambda}\lambda = 0,031$ /ч.

Тогда

$$T_{cp} = 1 / \lambda_{\Sigma} = 33,3 \text{ ч}; P(t) = \exp(-NK_{\lambda}\lambda t) = \exp(-0,6) = 0,553.$$

Полученные в примере показатели надежности $T_{cp} = 33,3$ ч и $P(20) = 0,553$ во многих случаях не могут удовлетворить разработчиков, поэтому для повышения надежности ЭВМ при сохранении ее общих технических характеристик применяют различные методы, которые разделены на две группы: структурные и информационные.

6.3. СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭВМ

Значительного повышения надежности ЭВМ достигают созданием новых элементов. Так, применение интегральных схем (ИС) для построения основных

узлов ЭВМ (регистров, сумматоров и др.) привело к значительному повышению надежности машин третьего и четвертого поколений. Однако повышение надежности элементов ЭВМ методами, рассмотренными выше, не удается в настоящее время полностью решить эту проблему, что вызвано значительным опережением роста сложности вновь разрабатываемой вычислительной техники, большими затратами при получении элементов высокой надежности, а также существованием элементов, надежность которых довольно низка и трудно поддается повышению (устройства ввода и вывода информации и др.). Поэтому один из путей повышения надежности ЭВМ — *введение схемной избыточности*.

Разработка методов синтеза ЭВМ, обладающих заданной надежностью, сводится к нахождению оптимальной избыточности. При этом, основное — согласование метода повышения достоверности с наиболее вероятными ошибками, появляющимися в различных устройствах ЭВМ. Полные и достоверные сведения об ошибках могут быть получены при эксплуатации машин, но проведение подобных испытаний связано с большими затратами времени и не всегда возможно при эксплуатации. Кроме того, такие сведения зависят от конкретного конструктивного выполнения ЭВМ и конкретных условий ее эксплуатации, в связи с этим они частично теряют свою ценность при проектировании новых вычислительных устройств. Поэтому на практике сведения об ошибках получают приближенно по результатам специальных статистических испытаний, проводимых на установках, которые содержат испытуемое устройство (контрольное устройство работает так же, как и испытуемое, однако в нем приняты специальные меры по повышению надежности) и устройство автоматической обработки результатов.

При обработке статистических данных определяют вероятностные характеристики ошибок как функции времени работы устройств. К этим характеристикам относят вид распределения, среднее время между отказами или сбоями, кратность ошибок, наличие пачек и др. Эти характеристики являются исходными данными для выбора метода введения избыточности и расчета надежности проектируемой ЭВМ. Так как увеличение надежности отдельных элементов есть предел, обуславливающий современный уровень развития технологии их изготовления, а сложность устройств стремительно возрастает, то введение схемной избыточности имеет все большее значение при построении надежных ЭВМ.

Один из видов схемной *избыточности* — *структурное резервирование*, предполагающее включение в схему устройства дополнительных элементов, которые позволяют скомпенсировать отказы отдельных частей устройств и обеспечить его надежную работу. Но резервирование эффективно только в том случае, когда неисправности являются статистически независимыми.

В ЭВМ ввод структурной избыточности производят по следующей схеме: входные сигналы поступают на n логических схем, причем $n > k$ где k — число логических схем в нерезервированной схеме. Выходные сигналы всех n логических схем далее подают на решающий элемент, который согласно функции решения по этим сигналам определяет значения выходных сигналов всей схемы.

Функция решения — правило отображения входных состояний решающего элемента на множество его выходных состояний. Простейший и наиболее распространенный вид функции решения — «закон большинства», или мажоритарный закон. В таком случае решающий элемент обычно называют *мажоритарным элементом*. Работа мажоритарного элемента состоит в следующем: на входы элемента поступают двоичные сигналы от нечетного количества идентичных элементов; выходной сигнал элемента принимает значение, равное значению, которое принимает большинство входных сигналов. Наиболее широко используют мажоритарные элементы, работающие по закону «2 из 3». В этих элементах значение выходного сигнала равно значению двух одинаковых входных сигналов. Кроме того, известны мажоритарные элементы, работающие по закону «3 из 5», «4 из 7» и т. д. Схема мажоритарного элемента, работающего по закону «2 из 3» и построенного из логических элементов И и ИЛИ, основана на выражении $z = x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3$ и имеет вид, изображенный на рис. 6.4.

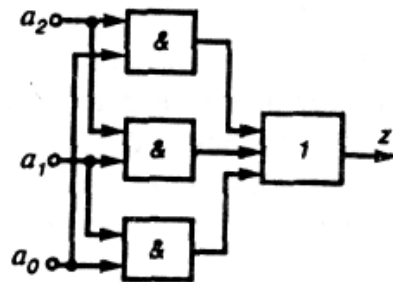


Рисунок 6.4 – Схема мажоритарного элемента «2 из 3»

Вероятность безотказной работы мажоритарной схемы «2 из 3» можно рассчитать по формуле $P(t) = [P_{II}(t)]^2 [3 - 2P_{II}(t)]$, где $P_{II}(t)$ — вероятность безотказной работы схемы И. Вероятность безотказной работы мажоритарной схемы при $k = (n-1)/2$ определяется соотношением

$$P = P_M \sum_{i=0}^{(n-1)/2} (i^n) p^{n-1} q^i,$$

где n — число входов мажоритарного элемента;

p — вероятность безотказной работы одного элемента схемы;

P_M — вероятность безотказной работы мажоритарного элемента.

Для повышения надежности схемы могут быть введены избыточные мажоритарные элементы. В этом случае при выходе одного или нескольких мажоритарных элементов из строя схема продолжает работать безотказно за счет большинства исправно работающих мажоритарных элементов. Вероятность безотказной работы такой схемы определяется

$$P = \sum_{i=0}^{(n-1)/2} (i^n) p^{n-1} q^i \sum_{j=0}^{(n-1)/2} (j^n) P_M^{n-1} (1 - P_M)^j.$$

Однако, если логические схемы не идентичны, «закон большинства» неприменим. В таких случаях используют взвешенные входы решающего элемента. Работу такого решающего элемента описывают пороговой функцией. Функцию алгебры логики $F(x_1, \dots, x_n)$ называют *пороговой*, если существует ряд

таких действительных чисел $c_1, c_2, \dots, c_n$ и T_{cp} для которых выполняется условие

$$F(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^n x_i c_i \geq T; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n x_i c_i < T. \end{cases}$$

где x_i — независимые переменные, принимающие значения 0 или 1;

c_i — вес (положительный или отрицательный), соответствующий x_i ;

T — порог функции. Наиболее часто в ЭВМ используют пороговые функции, у которых $c_1 = c_2 = \dots = c_n = c > 0$ и $T \geq 0$. Следовательно,

$$F(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^n x_i \geq T; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n x_i < T. \end{cases}$$

Если $(k - 1) < (T/c) \leq k$, то

$$F(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} 1, & \text{если } k \text{ или большее число переменных равно } 1; \\ 0, & \text{если } (k - 1) \text{ или меньшее переменных равно } 1. \end{cases}$$

Решающий элемент, работающий согласно этим выражениям, называют *пороговым элементом*. Схема порогового элемента показана на рис. 6.5. Веса входов порогового элемента выбирают в зависимости от вероятности ошибок в соответствующей логической схеме. Логической схеме с большей вероятностью ошибки соответствует меньший вес, а более надежной схеме — больший вес.

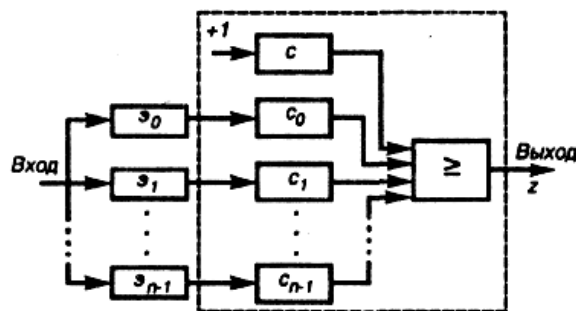


Рисунок 6.5 — Схема порогового элемента

Схемы, преобразующие z избыточных входных сигналов, часть из которых может быть ошибочными, в z безошибочных сигналов, называют *восстанавливающими устройствами*. Простейший вид восстанавливающего устройства представлен на рис. 6.6. В таких схемах в качестве решающего элемента используют мажоритарный элемент, пороговый элемент и др. Кроме того, имеются устройства, в которых соединение входов выполнено случайным образом. Такие восстанавливающие устройства называют однослойными.

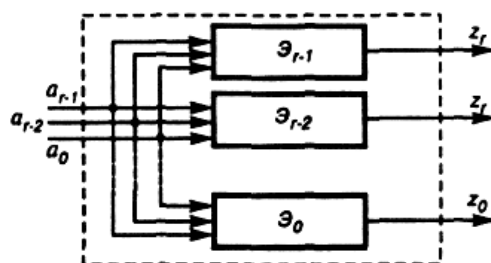


Рис. 6.6. Схема восстанавливающего устройства со строго определенными соединениями

Восстанавливающие устройства могут быть построены также из двух слоев логических элементов с использованием двухвходовых элементов И—НЕ и случайных соединений входов. Схема такого устройства представлена на рис. 6.7. Здесь одиночная ошибка на входе вида $0 \rightarrow 1$ исправляется первым слоем.

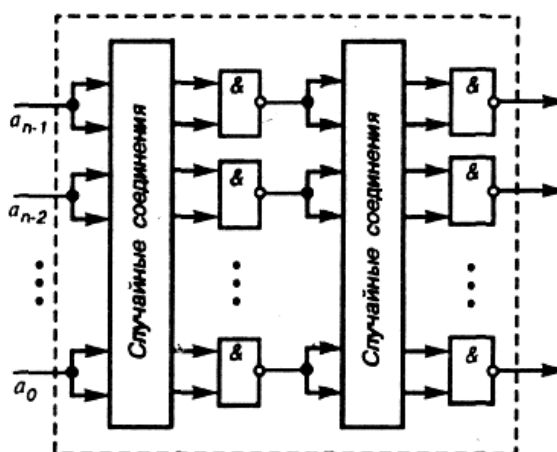


Рис. 6.7. Схема многослойного восстанавливающего устройства

Одиночная ошибка вида $1 \rightarrow 0$ вызывает двойную ошибку на выходе первого слоя, которая исправляется вторым слоем. Двойная ошибка на выходе первого слоя будет исправлена всегда, когда на каждую пару входов И—НЕ второго слоя поступит хотя бы один безошибочный сигнал. Если на оба входа некоторого элемента И—НЕ поступят ошибочные сигналы, то на выходе восстанавливающего устройства соответствующий сигнал будет ошибочным. При большом n , когда в основном применяют случайные соединения входов, вероятность такого совпадения очень мала. При небольшом n эта вероятность увеличивается и поэтому вместо случайных соединений применяют соединения, соответствующие определенному закону. Законы, определяющие порядок соединения входов, исследуют избыточной логикой с переплетением. *Резервирование без восстановления.* По способу включения резервных элементов функциональных устройств различают три вида резервирования: постоянное, замещением и скользящее.

При *постоянном резервировании* предполагают, что любой отказавший элемент или узел не влияет на выходные сигналы и поэтому его прямого обнаружения не производится. Постоянное резервирование наиболее распространено в невосстанавливаемых устройствах. Кроме того, оно является единственно возможным в устройствах, где недопустим даже кратковременный

перерыв в работе. Постоянное резервирование вводится или с помощью решающего блока, или в виде однотипных элементов или блоков, включенных последовательно, параллельно или, например, согласно законам k -краткой логики. В качестве решающего блока можно использовать мажоритарные элементы с постоянными или переменными весами, кодирующие — декодирующие устройства и схемы из логических элементов И, ИЛИ, НЕ.

При *резервировании замещением* предполагается обнаружение отказавшего элемента или узла и подключения исправного. Замещение может происходить либо автоматически, либо вручную. Резервирование замещением имеет следующие достоинства: для многих схем при включении резервного оборудования не требуется дополнительно регулировать выходные параметры, вследствие того, что электрические режимы в схеме не меняются, резервная аппаратура до момента включения в работу обычно обесточена. Это повышает общую надежность системы за счет сохранения ресурса электронных устройств, кроме того, экономится энергия источников питания, имеется возможность использования одного резервного элемента на несколько рабочих. Из-за сложности аппаратуры для автоматического включения резерва резервирование замещением целесообразно применять к крупным блокам и отдельным функциональным частям ЭВМ.

При *скользящем резервировании* любой резервный элемент может замещать любой основной элемент. Для осуществления этого резервирования необходимо иметь устройство, которое автоматически находит неисправный элемент и подключает вместо него резервный. Достоинство такого резервирования в том, что при идеальном автоматическом устройстве будет наибольший выигрыш в надежности по сравнению с другими методами резервирования. Однако осуществление скользящего резервирования возможно лишь при однотипности элементов.

Определим основные характеристики надежности ЭВМ при различных видах резервирования. Так как эффективность постоянного резервирования равна эффективности резервирования замещением в нагруженном режиме при идеальных переключателях, полученных характеристик надежности целесообразно провести для резервирования замещением.

Различают резервирование замещением: *нагруженное* — резервные элементы находятся в таком же рабочем режиме, как и основные элементы; *облегченное* — резервные элементы находятся в неполном рабочем режиме, *непогруженные* — резервные элементы находятся в нерабочем состоянии.

Так как время безотказной работы каждой ИС распределено по экспоненциальному закону, а поток отказов простейший, то основа для расчета надежности при различных видах резервирования — вероятность безотказной работы i -го элемента $p_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, где λ_i — интенсивность отказа i -го элемента. В случае нагруженного резерва элемент находится в одном и том же режиме и до, и после включения в работу. Поэтому надежность каждого элемента не зависит от моментов отказа других элементов. Можно считать, что время, в течение которого отказавший элемент заменяется резервным, равно нулю.

Рассмотрим систему из одного основного и $m-1$ резервных элементов. Введем обозначения: $p_1(t), p_2(t), \dots, p_m(t)$ — вероятности безотказной работы

соответствующих элементов в течение времени t ; $q_1(t), q_2(t), \dots, q_m(t)$ — вероятности отказа; $P_m(t)$ — вероятность безотказной работы всей системы из m элементов; $Q_m(t)$ — вероятность отказа всей системы из m элементов. Так как все отказы независимы, то, по теореме умножения вероятностей,

$$Q_m(t) = q_1(t)q_2(t)\dots q_m(t).$$

Выражение для надежности имеет следующий вид:

$$P_m(t) = 1 - [1 - p_1(t)][1 - p_2(t)] \dots [1 - p_m(t)]. \quad (6.14)$$

Если все элементы имеют одинаковую надежность $p_1(t) = p_2(t) = \dots = p_m(t) = p(t)$; $q(t) = 1 - p(t)$, то

$$Q_m(t) = q^m(t); \quad P_m(t) = 1 - [1 - p(t)]^m. \quad (6.15)$$

Эти формулы позволяют найти число резервных элементов, при котором $Q_m(t)$ не будет превосходить заданной величины Q : $q^m \leq Q$. Отсюда $m \geq [\ln(1/Q)/\ln(1/q)]$. Среднее время наработки на отказ системы

$$T_m = \int_0^{\infty} P_m(t) dt$$

или

$$\begin{aligned} T_m = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{k=1}^m [1 - \exp(-\lambda_k t)] \right\} dt &= \int_0^{\infty} \left\{ \sum_{k=1}^m \exp(-\lambda_k t) - \sum_{k < s}^m \exp[-(\lambda_k + \lambda_s)t] + \right. \\ &+ \sum_{k < s < l}^m \exp[-(\lambda_k + \lambda_s + \lambda_l)t] - \dots \left. \right\} dt = \sum_{k=1}^m 1/\lambda_k - \sum_{k < s}^m 1/(\lambda_k + \lambda_s) + \\ &+ \sum_{k < s < l}^m 1/(\lambda_k + \lambda_s + \lambda_l) - \dots + (-1)^m 1/(\lambda_k + \lambda_s + \dots + \lambda_m). \end{aligned} \quad (6.16)$$

Для случая равных надежностей, $p(t) = \exp(-\lambda t)$ среднее время наработки на отказ системы

$$\begin{aligned} T_m &= \int_0^{\infty} \{1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^m\} dt = 1/\lambda \int_0^1 (1 - z^m)/(1 - z) dz = \\ &= 1/\lambda \int_0^1 (1 + z + z^2 + \dots + z^{m-1}) dz = 1/\lambda (1 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/m), \end{aligned} \quad (6.17)$$

где $z = 1 - \exp(-\lambda t)$. Так как среднее время работы одного элемента равно $1/\lambda$, то $T_m = 1/\lambda (1 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/m)$.

Выражения (6.14) — (6.17) действительны для общего резервирования, когда резервируются блоки, отдельные устройства или целиком ЭВМ. В этом случае под λ_i и $P_i(t)$ принимается соответственно интенсивность отказов и вероятность безотказной работы i -го резервированного блока (устройства, ЭВМ). Для случая нагруженного резерва с поэлементным резервированием (рис. 6.8), когда в основном устройстве (блоке, ЭВМ) имеется n элементов, каждый из которых резервируется $m - 1$ аналогичными элементами, вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле

$$P_{\text{рез}}(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - \exp(-\lambda_i t)]^m\}. \quad (6.18)$$

При равнонадежных элементах

$$P_{\text{рез}} = \{1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^m\}^n$$

и

$$T_{\text{ср}}(t) = (1)/\lambda_m \sum_{i=0}^{m-1} 1/[v_i(v_i - 1) \dots (v_i + n + 1)],$$

где $\nu_i = (i + 1)/m$. С точки зрения повышения надежности более эффективно поэлементное резервирование. Параметр m называют кратностью резервирования. Если речь идет, например, о четырехкратном резервировании, то это означает, что в системе имеется один основной элемент и три резервных. При $m = 2$ наблюдается случай дублирования, а при $m = 3$ будет тройное резервирование системы.

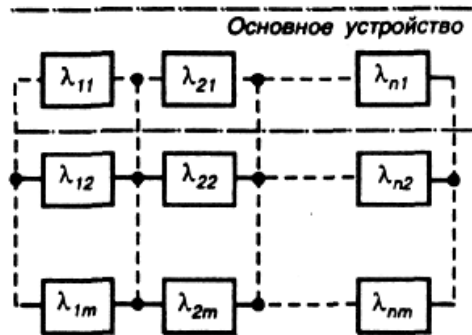


Рис. 6.8. Напряженный резерв с поэлементным резервированием

Пример. Пусть ЭВМ состоит из пяти устройств, отказ любого из которых приводит к отказу всей ЭВМ. Известно, что в данный момент времени $P_1 = 0,7$; $P_2 = P_3 = 0,9$; $P_4 = 0,8$; $P_5 = 0,6$. Определить вероятность безотказной работы ЭВМ для случаев: без резерва, с общим резервированием, с отдельным резервированием. Кратность резервирования $m = 3$.

Для случая *без резерва*

$$P = \prod_{i=1}^5 P_i \approx 0,3.$$

Для случая *общего резервирования* из (6.15) получим

$$P_{\text{общ}} = 1 - (1 - P)^m = 1 - (1 - P)^3 \approx 0,66.$$

(вероятность времени безотказной работы основного и резервного времени в системе с облегченным резервом).

Для случая *отдельного резервирования* из (6.18) получим

$$P_{\text{отд}} = [1 - (1 - P_1)^3] \cdot [1 - (1 - P_{2,3})^3] \cdot [1 - (1 - P_4)^3] \cdot [1 - (1 - P_5)^3] \approx 0,9.$$

Таким образом, отдельное резервирование в данном примере привело к увеличению параметра надежности почти в три раза, в то время как общее резервирование при тех же аппаратных затратах увеличило параметр надежности только в два раза.

Рассмотрим случай, когда резервные элементы находятся в неполном рабочем режиме. Пусть система состоит из двух параллельных элементов. Резервный элемент до момента отказа основного элемента находится в облегченных условиях. Плотность распределения времени безотказной работы основного и резервного элементов показана на рис. 6.9.

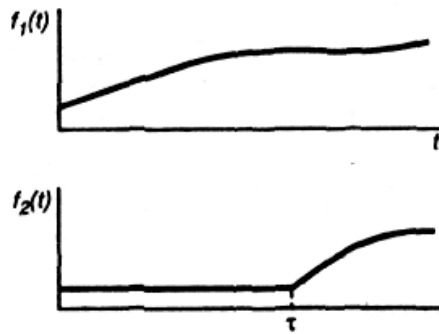


Рис. 6.9. Графическое представление плотности распределения:
 τ — момент включения резервного элемента взамен отказавшего

Предполагается, что переключающее устройство действует безотказно. Найдем вероятность безотказной работы системы за время t . Обозначим: P_1 — вероятность безотказной работы основного элемента; k_1 — интенсивность отказа основного элемента; P_2 — вероятность безотказной работы резервного элемента в рабочем режиме; λ_2 — интенсивность отказа резервного элемента в рабочем режиме; P_2^0 — вероятность безотказной работы резервного элемента в облегченном режиме; λ_1^0 — интенсивность отказа резервного элемента в облегченном режиме.

Очевидно, что основной элемент имеет два состояния, а резервный — четыре, т. е. общее число всевозможных состояний системы равно восьми. Из этих состояний наиболее благоприятными являются следующие:

- а) оба элемента работают безотказно;
- б) первый элемент работает безотказно, а второй отказал в интервале времени от 0 до τ ;
- в) первый элемент отказал в интервале времени от 0 до τ , а второй работает безотказно в интервале времени от 0 до τ (в облегченном режиме) и в интервале времени от τ до t (в рабочем режиме). Вероятность безотказной работы резервированной системы:

$$P = P(1) + P(2) + P(3);$$

$$P(1) = P_1 P_2^0; \quad P(2) = P_1 (1 - P_1^0).$$

Предположим, что отказ основного элемента в случае (е) произошел на участке от τ до $\tau + d\tau$. Тогда на участке $d\tau$ вероятность отказа основного элемента будет $f_1(\tau) d\tau$, где $f_1(\tau) = \lambda_1 P_1(\tau)$ — плотность распределения наработки до отказа основного элемента.

Вероятность $P(3)$ находят так:

$$P_{\tau+d\tau} = \lambda_1 P_1(\tau) d\tau P_2[(t-\tau)/\tau],$$

где $P_2[(t-\tau)/\tau] = P_2^0(t-\tau)$ — условная вероятность того, что резервный элемент безотказно проработает время $t-\tau$ при условии, что за время τ он не отказал. Отказ основного элемента может произойти на любом участке времени τ от 0 до t , поэтому

$$P_3 = \int_0^t \lambda_1 P_1(\tau) P_2^0(\tau) P_2(t-\tau) d\tau.$$

Окончательно

$$P(3) = [\lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2^0 - \lambda_2)] (P_2 - P_1 P_2^0).$$

Следовательно, вероятность безотказной работы резервированной системы, состоящей из двух элементов, при условии, что резервный элемент работает в облегченном режиме, равна

$$P = P_1 + [\lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2^0 - \lambda_2)] (P_2 - P_1 P_2^0).$$

Если один элемент основной, а $(m-1)$ -е элементы резервные, то вероятность безотказной работы системы, резервированной по способу замещения, равна

$$P = \left[\prod_{j=0}^{m-1} (1 + V_j) \right] / \left[V^{m-1} (m-1)! \sum_{i=1}^{m-1} \{ (-1)^i C_{m-1}^i / (1 + V_i') \exp[-(1 + V_i') \lambda_i t] \} \right].$$

Когда основных элементов k и элементов резервных $m-1$, то вероятность безотказной работы системы

$$P = \prod_{l=0}^k \left\{ \left[\prod_{j=1}^{m-1} (1 + V_j) \right] / \left[V_l^{m-1} (m-1)! \right] \sum_{i=1}^{m-1} \{ (-1)^i C_{m-1}^i / (1 + V_i') \exp[-(1 + V_i') \lambda_i t] \} \right\}.$$

При нагруженном режиме плотности распределения времени безотказной работы основного и резервного элементов принимают одинаковыми. В этом случае $P^0 = P$; $\lambda^0 = \lambda$; $\lambda^0 / \lambda = 1$. Здесь, если один элемент основной, а $(m-1)$ -е элементы — резервные, то вероятность безотказной работы системы

$$P = m \sum_{i=1}^{m-1} \{ (-1)^i C_{m-1}^i / (1 + i) \exp[-(1 + i) \lambda t] \}.$$

Для k основных элементов и $m-1$ элементов резервных

$$P = \prod_{l=1}^k m_l \sum_{i=0}^{m-1} \{ (-1)^i C_{m-1}^i / (1 + i) \exp[-(1 + i) \lambda t] \}.$$

При ненагруженном режиме $\lambda^0 = 0$, $P^0 = 1$, $V = 0$. Тогда вероятности безотказной работы систем с резервированием соответственно для случая одного и k основных элементов и $m-1$ элементов резервных имеют вид

$$P = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{m-1} (\lambda t)^i / i!; \quad P(k) = \prod_{l=1}^k \exp(-\lambda_l t) \sum_{i=0}^{m-1} (\lambda_l t)^i / i!.$$

Из трех рассмотренных способов резервирования наибольший выигрыш в надежности получают в ненагруженном режиме. Сравнительный анализ существующих методов и способов резервирования позволяет выбрать лучшие из них. Однако при этом увеличиваются масса, габаритные размеры и стоимость аппаратуры. Поэтому на практике возникает задача резервирования системы, чтобы ее вес, габаритные размеры и стоимость были не выше допустимых значений, а надежность — максимальной или чтобы вероятность безотказной работы была не ниже требуемой, а масса, габаритные размеры и стоимость системы были минимальными. Аналитическое решение этой задачи практически можно получить только для случая поэлементного постоянного резервирования при одном ограничении (при нескольких ограничениях может быть построен алгоритм решения задачи на ЭВМ).

Рассмотрим оптимальное резервирование при ограничении массу аппаратуры (или какой-нибудь одной величины). Пусть имеется нерезервированная система из n последовательных элементов, причем q_i — вероятность отказа i -го элемента, а W_i — масса i -го элемента. Требуется произвести поэлементное резервирование этой системы так, чтобы ее масса не превышала заданной, а надежность была максимальной. Масса нерезервированной системы и вероятность ее безотказной работы соответственно

$$W_0 = \sum_{i=0}^n W_i; \quad P = \prod_{i=1}^n (1-q). \quad (6.19)$$

Если каждый элемент резервировать $m - 1$ раз, то масса резервированной системы

$$W_p = \sum_{i=1}^k m_i W_i,$$

а вероятность исправной работы

$$P_p = \prod_{i=1}^n (1-q_i^m).$$

Задача сводится к нахождению таких целых чисел $m > 1$, при которых $P_{p\max}$ и масса системы не превышает допустимого значения:

$$\sum_{i=1}^n m_i W_i \leq W_{\text{доп}}. \quad (6.20)$$

Решая поставленную задачу, первоначально принимаем, что $m_i > 0$ — любые числа, удовлетворяющие выражению (6.19). Пусть $m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0$ — набор чисел, удовлетворяющих (6.20) и дающих P_p в (6.20) максимальное значение. Так как P_p увеличивается с ростом каждого m_i , то m_i^0 должны удовлетворять уравнению

$$\sum_{i=1}^n m_i^0 W_i = W_{\text{доп}}. \quad (6.21)$$

Точка $\{m_i^0\}$ является точкой условного экстремума функции (6.19) при условии (6.21). На основании теории условного экстремума можно утверждать, что в точке экстремума справедливо следующее равенство:

$$\partial(P_p - \lambda W_p) / \partial m_i = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Подставив в это уравнение значение W_p и P_p , преобразовав его после логарифмирования, определяем

$$m_i^0 = \ln[(y + a_i)/a_i] / \ln(1/q_i),$$

где $a_i = \omega_i / \ln(1/q_i)$; $y = P_p / \lambda$. Подставим m_i^0 в (6.21) и будем считать, что единственным корнем уравнения является y_0 . Тогда получим

$$m_i^0 = \ln[(y_0 + a_i)/a_i] / \ln(1/q_i) \quad \text{или} \quad P_p = y_0^n \prod_{i=1}^n (y_0 + a_i).$$

Таким образом, зная вероятность отказа элементов q_i , составляющих систему, и их массу W , можно произвести поэлементное резервирование так, что масса резервированной системы не будет превышать допустимого, а вероятность безотказной работы будет максимальной. Аналогично решается и обратная задача.

Резервирование с восстановлением. Значительный эффект повышения надежности ЭВМ путем резервирования достигается в системах с восстановлением. Основные задачи, рассматриваемые при расчете надежности восстанавливаемых ЭВМ, возникают при следующей ситуации. Исправная ЭВМ начинает эксплуатироваться в момент времени $t = 0$ и, проработав случайное время x_i , выходит из строя. На ремонт требуется случайное время y_i .

Этот процесс продолжается в течение всего срока службы ЭВМ, причем величины x_i и y_i ($i = 1, 2, \dots$) независимы. В случайные или заранее установленные моменты времени t_i ($i = 1, 2, \dots$) могут проводиться профилактические работы случайной или постоянной длительности z_i . Процесс усложняется в основном по следующим причинам:

От системы разностных уравнений можно перейти к дифференциальным уравнениям, если члены $P_0(t)$, $P_k(t)$ и $P_{r+1}(t)$ перенести в левую часть, правые и левые части разделить на Δt , тогда при $\Delta t \rightarrow 0$ получим

$$\left. \begin{aligned} dP_0(t)/dt &= -P_0(t)\lambda + P_1(t)\mu, \\ dP_k(t)/dt &= -P_k(t)(l-k+1)\lambda + P_k(t)[(l-k)\lambda + k\mu] + \\ &+ P_{k+1}(t)(k+1)\mu, \quad k = 1, \dots, r; \\ \dots\dots\dots \\ dP_r(t)/dt &= P_r(t)(l-r)\lambda + P_{r+1}(t)(r+1)\mu. \end{aligned} \right\} \quad (6.25)$$

Определим P_{r+1} — вероятность отказа избыточной структуры за время t и среднее время безотказной работы резервной группы T_{r+1} . Для решения системы (6.25) относительно $P_{r+1}(t)$ применим преобразование Лапласа:

$$f(z) = \int_0^{\infty} \exp(-zt) P(t) dt. \quad (6.26)$$

В результате получим систему уравнений относительно функции $f_k(z)$:

$$\left. \begin{aligned} f_0(z)(l\lambda + z) - \mu f_1(z) &= 0, \\ -(l-k+1)\lambda f_{k-1}(z) - [(l-k)\lambda + k\mu + z]f_k(z) - \\ - (k-l)\mu f_{k+1}(z) &= 0, \quad k = 1, \dots, r; \\ \dots\dots\dots \\ -(l-r)\lambda f_r(z) + (r+1)(\mu + z)f_{r+1}(z) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.27)$$

Функцию $f_{r+1}(z)$ найдем по правилу Крамера: где $f_{r+1}(z) = D_{r+1}(z)/D$, — $D(z)$ определитель системы (6.27); $D_{r+1}(z)$ — определитель, полученный исключением столбца коэффициентов при неизвестной $f_{r+1}(z)$ в матрице определителя $D(z)$. Искомая вероятность безотказной работы определится $P_{r+1}(t)$ по формуле обращения интегрированием по контуру:

$$P_{r+1}(t) = 1/(2\pi i) \int_0^{\infty} \exp(zt) D_{r+1}(z)/D(z) dz. \quad (6.28)$$

Определение вероятности P_{r+1} по (6.28) в общем случае связано с громоздкими вычислениями. На практике же представляет интерес случай, когда отказы избыточной структуры являются редкими событиями, т. е. выполняется условие $l\lambda \ll \mu$. Если отношение λ/μ стремится к нулю, то предел отношений определителей $D_{r+1}(z)/D(z)$ системы (6.27) равен

$$\lim_{\lambda/\mu \rightarrow 0} D_{r+1}(z)/D(z) = 1/z(1+z). \quad (6.29)$$

Подставляя (6.29) в (6.28), получим асимптотическое распределение вероятности безотказной работы избыточной структуры:

$$P_{r+1}(t) \approx \exp(-lT_{cp}), \quad (6.30)$$

где T_{cp} — постоянная величина, имеющая смысл среднего времени безотказной работы избыточной структуры. Формула (6.30) является очень важной в теории избыточных систем с восстановлением, так как все расчеты при экспоненциальном законе надежности значительно упрощаются. При этом среднее время безотказной работы избыточной структуры T_{cp} может быть определено как среднее время перехода процесса (6.24) из нулевого состояния в $(r+1)$ -е состояние по следующей формуле:

$$T_{cp} = \sum_{k=0}^r \left\{ \sum_{i=0}^k P_i / (\lambda_k P_k) \right\}. \quad (6.31)$$

где $P_k = \lim_{l \rightarrow \infty} P_k(l)$ — вероятности, получаемые решением (6.25) путем предельного перехода при $l \rightarrow \infty$. Вероятности P_k , в свою очередь, равны

$$P_k = (\lambda_1 \dots \lambda_{k-1}) / (\mu_1 \dots \mu_k) P_0 = a_k P_0, \quad (6.32)$$

где $\lambda_i = \lambda(l-i)$; P_0 — вероятность того, что все устройства резервной структуры исправны, т. е. $\mu_i = i\mu$. Подставляя (6.31) в (6.32), получим

$$T_{cp} = \sum_{k=0}^r \left\{ \left(P_0 + \sum_{i=1}^k a_i P_0 \right) / (\lambda_k a_k P_0) \right\} = \sum_{k=0}^r \left\{ \left(1 + \sum_{i=1}^k a_i \right) / (\lambda_k a_k) \right\} =$$

$$= \sum_{k=0}^r \left\{ 1 + \sum_{i=1}^k [l(l+1) \dots (l-i+1) / (\lambda/\mu)^i / i!] / [l(l-1) \dots (l-k) / k! \lambda (\lambda/\mu)^k] \right\}. \quad (6.33)$$

Формула (6.33) определяет точное значение среднего времени безотказной работы избыточной структуры. Ее можно значительно упростить, если воспользоваться допущением, которое было принято при выводе (6.30) для вероятности безотказной работы. В этом случае сумма в числителе выражения (6.33) много меньше единицы и ею можно пренебречь, а общая сумма определяется только слагаемым с малым знаменателем, т. е. при $k=r$

$$T_{cp} \approx 1 / [l(l-1) \dots (l-r) / r! \lambda (\lambda/\mu)^r] = \mu^r / [(l-r) / r! \lambda^{r+1}]. \quad (6.34)$$

Обозначив в соответствии с (6.22) и (6.33) через $T = 1/k$ среднее время безотказной работы и через $\tau = 1/\mu$ среднее время восстановления одного устройства, получим приближенную формулу для определения среднего времени безотказной работы избыточной структуры с восстановлением:

$$T_{cp} = \tau / [(l-r) / r!] (T/\tau)^{r+1}. \quad (6.35)$$

В частном случае для систем, когда $r=1$, получаем $T_{cp} = T^2 / [l(l-1)\tau]$, т. е. квадратичную зависимость времени T_{cp} от времени T .

Приведем для сравнения среднее время безотказной работы той же избыточной структуры в невосстанавливаемом режиме, когда отказы не устраняются, а накапливаются и при отказе $r+1$ наступает отказ избыточной структуры:

$$T_{cp} = 1/r \sum_{k=0}^r 1/(l-r+k) = T \sum_{k=0}^r 1/(l-k), \quad (6.36)$$

где T — среднее время безотказной работы одного канала. Из (6.36) видно, что для систем без восстановления среднее время безотказной работы с введением избыточности растет очень медленно. Если сравнить формулу (6.35), определяющую среднее время безотказной работы избыточной структуры с восстановлением, с формулой (6.36) для структуры без восстановления, то значительный выигрыш очевиден.

Пример. Пусть имеется дублированная система. Требуется определить величину T системы с восстановлением и без восстановления работоспособности при $l=2$, $\tau=1$, $T=2000$, $\tau=r$. При вычислениях будем пользоваться приближенными формулами.

Для случая резервирования без восстановления из уравнения (6.36) получим $T_{б.юст} = 3000$ ч. При резервировании с восстановлением $T_{б.вост} = T^2 / [l(l-1)\tau] = 2\,000\,000$ ч. Таким образом, эффективность вводимой избыточности при наличии восстановления значительно повышается. И наоборот, избыточность без восстановления для систем длительного пользования малоэффективна и практически очень часто неоправдана.

Профилактика ЭВМ. Профилактика также принадлежит к способам, позволяющим повысить надежность ЭВМ. Но в отличие от способа, описанного выше, здесь коррекция закона надежности $P(t/\tau)$ производится не в случайное время, связанное с возникновением отказа и со скачкообразным изменением вида функции $P(t/\tau)$, а в заранее запланированные моменты времени. Рассмотрим случай, когда профилактика осуществляется через равные интервалы времени τ_0 , причем время, затрачиваемое на профилактику, мало по сравнению с временем τ_0 . Будем считать также, что во время профилактики происходит полное восстановление свойств надежности ЭВМ. Обозначим вероятность безотказной работы системы в исходном состоянии через $P(t)$, т. е. $P(t/0) = P(t)$.

Полное восстановление свойств надежности во времени профилактики означает, что для такой системы выполняется равенство

$$P(t/n\tau_0) = P(t - n\tau_0), \quad t > n\tau_0, \quad (6.37)$$

где $n = 1, 2, \dots$ — число профилактик до момента времени t . Условие (6.37) показывает влияние профилактики с полным восстановлением на надежность системы.

Определим надежность систем с профилактикой. Найдем функцию надежности системы $P^*(t)$ как вероятность того, что система не откажет на интервале времени $(0, t)$, если за это время будет проведено (t/τ_0) профилактик. Обозначим через A_k событие, состоящее в том, что система исправно проработает на интервале времени $[(k-1)\tau_0, k\tau_0]$. Событие A есть произведение событий A_k , когда система не откажет на интервале времени $(0, t)$ и она не откажет ни на одном из интервалов $[(k-1)\tau_0, k\tau_0]$, $k = 1, \dots, [t/\tau_0]$:

$$A = A_0 \prod_{i=1}^{t/\tau_0} A_i, \quad (6.38)$$

где A_0 — событие, состоящее в том, что система не откажет на интервале времени $[(t/\tau_0)\tau_0, t]$. Для вероятности $P^*(t)$ в общем случае

$$P^*(t) = P(A) = P\left(A_0 \prod_{i=1}^{t/\tau_0} A_i\right).$$

Вероятность произведения событий

$$P\left(A_0 \prod_{i=1}^{t/\tau_0} A_i\right) = P(A_1)P(A_2/A_1) \dots P\left(A_{t/\tau_0}/\prod_{i=1}^{t/\tau_0-1} A_i\right)P\left(A_0/\prod_{i=1}^{t/\tau_0} A_i\right),$$

где согласно условию вероятность

$$P(A_1) = P(\tau_0).$$

Условные вероятности

$$P\left(A_k/\prod_{i=1}^{k-1} A_i\right)$$

могут быть определены как

$$P\left(A_k/\prod_{i=1}^{k-1} A_i\right) = P(k\tau_0/(k-1)\tau_0) \quad (6.39)$$

и на основе (6.37) равны

$$P(k\tau_0/(k-1)\tau_0) = P(k\tau_0 - (k-1)\tau_0) = P(\tau_0). \quad (6.40)$$

С учетом (6.41) и (6.42) выражение (6.39) определится как

$$P^*(t) = \{P(\tau_0)\}^{t/\tau_0} P(t - \tau_0^{t/\tau_0}). \quad (6.41)$$

Выражение (6.41) представляет собой искомый закон надежности системы с профилактикой. Через вероятность $P^*(t)$ могут быть определены все остальные характеристики системы. Среднее время безотказной работы системы с профилактикой может быть найдено, как

$$T^* = \int_0^{\infty} P^*(t) dt. \quad (6.42)$$

Подставляя значение вероятности $P^*(t)$ из (6.41) в (6.42), получим

$$T^* = \int_0^{\infty} \{P(\tau_0)\}^{t/\tau_0} P(t - \tau_0^{t/\tau_0}) dt.$$

Разобьем интервал интегрирования $(0, \infty)$ функции на $P^*(t)$ участки $(0, \tau_0), (\tau_0, 2\tau_0), \dots, (k\tau_0, (k+1)\tau_0)$. Тогда

$$\begin{aligned} T^* &= \int_0^{\tau_0} P(t) dt + \int_{\tau_0}^{2\tau_0} P(\tau_0) P(t - \tau_0) dt + \int_{2\tau_0}^{3\tau_0} P(\tau_0) P(t - 2\tau_0) dt + \dots \\ &\dots + \int_{k\tau_0}^{(k+1)\tau_0} \{P(\tau_0)\}^k P(t - k\tau_0) dt + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{k\tau_0}^{(k+1)\tau_0} \{P(\tau_0)\}^k P(t - k\tau_0) dt = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \{P(\tau_0)\}^k \int_{k\tau_0}^{(k+1)\tau_0} P(t - k\tau_0) dt. \end{aligned} \quad (6.43)$$

В (6.43) применим подстановку вида $t - k\tau_0 = u$. Тогда

$$T^* = \sum_{k=0}^{\infty} \{P(\tau_0)\}^k \int_0^{\tau_0} P(u) du = \int_0^{\tau_0} P(u) du \sum_{k=0}^{\infty} \{P(\tau_0)\}^k. \quad (6.44)$$

Сумма в (6.44) представляет собой геометрическую прогрессию с первым членом, равным единице, и знаменателем $P(\tau_0)$. Свертывая сумму, получим

$$T^* = \left\{ \int_0^{\tau_0} P(t) dt / \{1 - P(\tau_0)\} \right\}. \quad (6.45)$$

Выражение (6.45) представляет собой среднее время безотказной работы системы с профилактикой, определяемое через исходный закон надежности $P(t)$. Нахождение точного времени по (6.45) предполагает вычисление определенного интеграла. Можно получить практически более удобную формулу, если принять, что вероятность безотказной работы системы за время профилактики $P(\tau_0)$ близка к единице. Так как на интервале профилактики вероятность безотказной работы удовлетворяет соотношению $1 \geq P(t) \geq P(\tau_0)$, то получим неравенство

$$\tau_0 \geq \int_0^{\tau_0} P(t) dt \geq \tau_0 P(\tau_0).$$

Если вероятность $P(\tau_0)$ близка к единице, то значение интеграла $\int_0^{\tau_0} P(t) dt$ практически равно интервалу времени профилактики $P(\tau_0)$ и тогда для среднего времени безотказной работы системы с профилактикой

$$T^* \approx \tau_0 / \{1 - P(\tau_0)\}. \quad (6.46)$$

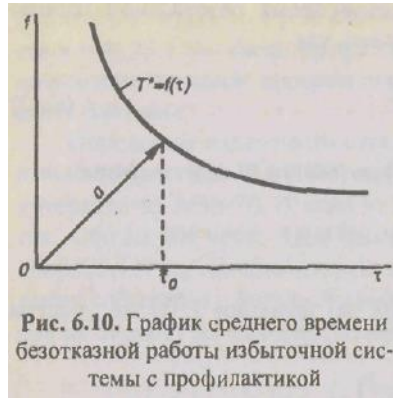


Рис. 6.10. График среднего времени безотказной работы избыточной системы с профилактикой

При этом относительная ошибка не превосходит значения вероятности отказа системы за время τ_0 . Среднее время безотказной работы T^* избыточной системы с профилактикой существенно зависит от интервала τ_0 времени профилактики. Выражение (6.46) относительно аргумента представляет собой уравнение равнобочной гиперболы, график которой показан на рис. 6.10. Из рисунка видно, что эффективность профилактики различна на различных участках интервала τ_0 . Так, при $\tau_0 > \tau_0$ влияние профилактики на надежность системы слабое, а при $\tau_0 \leq \tau_0$ — очень сильное. Следовательно, $\tau_0 \leq \tau_0$ интервал времени профилактики следует выбирать из соотношения

Восстановление во время профилактики упрощает эксплуатацию избыточных систем, так как сразу после возникновения корректируемого отказа требуются сложные и громоздкие системы аппаратного контроля и специальные конструкции систем, позволяющие без нарушения функционирования выводить в ремонт отказавшее оборудование. В связи с этим восстановление в момент возникновения отказа возможно лишь при высоких уровнях введения избыточности.

6.4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭВМ

Один из наиболее удобных и гибких методов повышения надежности ЭВМ — применение корректирующих кодов. В некоторых условиях, например при кратковременных сеансах работы, когда ресурсы надежности почти не расходуются, коррекция сбоев, вызванных различного рода помехами, имеет решающее значение для обеспечения нормального функционирования систем. Достоинства корректирующих кодов следующие:

- а) исправление ошибок без перерывов в работе;
- б) способ кодирования и применяемый код выбирают в зависимости от алгоритма функционирования данного цифрового устройства, что дает возможность согласования корректирующей способности кода со статическими характеристиками потока ошибок устройства и уменьшения избыточности, требуемой для коррекции ошибок;
- в) использование корректирующих кодов позволяет учесть необходимость устранения влияния ошибок в устройстве, последовательно на всех этапах проектирования, начиная с алгоритма функционирования.

Избыточность может быть либо временной, либо пространственной. *Временная избыточность* связана с увеличением времени решения задачи (в

частном случае задача может быть решена, например, дважды) и вводится программным путем, являясь основой программного способа обнаружения и исправления ошибок. *Пространственная избыточность* заключается в удлинении кодов чисел, в которые вводят дополнительные (контрольные) разряды.

Идея обнаружения и исправления ошибок с использованием избыточности состоит в следующем. Все множество N_y выходных слов устройства разбивают на подмножество N_{y0} разрешенных кодовых слов, т. е. таких слов, которые могут появиться в результате правильного выполнения логических и арифметических операций, и подмножество $(N_y - N_{y0})$ запрещенных кодовых слов, т. е. таких слов, которые могут появиться только в результате ошибки. Появившееся на выходе устройства слово y_i подвергают анализу: если слово y_i относится к подмножеству разрешенных слов, то оно считается правильным результатом и декодирующее устройство переводит его в соответствующее выходное слово y_{0i} ; если же слово y_i оказывается элементом подмножества запрещенных слов, то это свидетельствует о наличии ошибки. Для исправления обнаруженных ошибок запрещенные кодовые слова разбиваются на группы: каждому разрешенному кодовому слову соответствует одна такая группа.

При декодировании обнаруженное на выходе устройства запрещенное кодовое слово заменяется разрешенным словом, в группу которого оно входит. Тем самым ошибка исправляется. При этом работа декодирующего устройства усложняется. Процесс построения корректирующего кода состоит из следующих этапов:

Этап 1 — выявление наиболее вероятных ошибок для заданного способа функционирования устройства или наиболее опасных в условиях его использования.

Этап 2 — формирование избыточного множества выходных слов, разделение этого множества на подмножества разрешенных и запрещенных кодовых слов и образование декодировочных групп.

Этап 3 — разработка рационального способа декодирования выходных слов, позволяющего реализовать относительно несложными техническими средствами обнаружение и исправление обусловленных ошибок.

Этап 4 — организация множества входных слов так, чтобы заданное преобразование, выполненное над любым словом этого множества, дало на выходе автомата слово, принадлежащее к подмножеству разрешенных кодовых слов.

При построении ЭВМ, предназначенной для решения определенного класса задач, важным вопросом является рациональный выбор уровня, на котором следует применять корректирующий код. Вычислительная машина состоит из отдельных устройств: запоминающего, арифметического, внешнего и т. п. В каждом устройстве информация претерпевает определенные изменения. Эти устройства состоят из отдельных блоков — сумматоров, регистров и т. п., которые набраны из простейших логических элементов (триггеров, схем И, ИЛИ, НЕ и т. п.). Корректирующие коды применяют на любом из этих уровней структуры машины. Однако результаты при этом

получают различные. Может оказаться, например, что корректировать ошибки в работе отдельных логических схем значительно труднее, чем в работе сумматора в целом. Далее, если контроль правильности и исправления ошибок в работе отдельных блоков и устройств машины осуществить сложно, то в некоторых случаях прохождение всей задачи легко контролируется применением простейших принципов, например путем повторного счета.

Коды с повторениями. Среди корректирующих кодов особое место занимают коды с повторениями. Использование этих кодов дает возможность обнаруживать и исправлять ошибки. Их можно применять во всех без исключения случаях. При этом алгоритм функционирования устройства может быть задан любым способом и используется для реализации произвольного преобразования информации. Применяя код с повторениями необходимая избыточность создается многократным повторением одного и того же слова на входе. При правильной работе устройства слово Y_0 на его выходе представляет собой k -кратное повторение слова Y_0 , являющегося результатом правильного преобразования слова X_{0i} . При отсутствии ошибок любая из k частей слова Y_i может быть взята в качестве результата. Задача декодирующего устройства в этом случае сводится к выведению одной части слова u .

При наличии случайных ошибок некоторые из k частных результатов, входящих в слово Y_0 отличаются от слова Y_0 . Сравнивая между собой k частей слова u , можно выявить ошибки, если число одинаковых ошибок меньше k . Сравнение k частных результатов и выработку сигнала ошибки (при несовпадении их) выполняет декодирующее устройство. Если вероятность ошибки в одном частном преобразовании невелика и есть основания предполагать, что большая часть из k частных результатов верна, то ошибки могут быть исправлены. Для этого достаточно принять в качестве правильного результата то частное решение, которое встречается в словах Y_0 большее количество раз. Если определить полезный эффект от применения кода с повторениями при получении r неверных частных результатов в слове Y_0 при котором ошибка обнаруживается или исправляется, то можно убедиться в справедливости следующих соотношений:

для обнаружения всех ошибок кратности $r_{\text{общ}}$ необходимо, чтобы повторений было $k = r_{\text{общ}} + 1$;

для исправления всех ошибок кратности $r_{\text{испр}}$ необходимо число повторений $k = 2r_{\text{испр}} + 1$.

Зададимся вопросом. Какой выигрыш в надежности дает применение кодов с повторениями? Общего ответа на этот вопрос дать нельзя. Лишь для одного частного случая вероятностных свойств автомата можно сделать заключение об эффективности применения кодов с повторениями. Пусть вероятностные свойства автомата описываются таким образом:

вероятность получения правильного результата равна P независимо от конкретного значения входного слова X_{0i} ;

при подаче на вход автомата входного слова X_{0i} на его выходе с равной вероятностью q может быть получено любое ошибочное выходное слово, соответственно $q = (1 - P)/(N_{y0} - 1)$

Применим A -кратное (A - нечетное) повторение слов X_{0i} на входе

устройства. Декодирование слов y_{0n} получаемых на выходе, будем выполнять по принципу большинства, полагая правильным тот частный результат y_{0i} который в слове y_i появился большее число раз. Количество правильных частных результатов в k повторениях обозначим S . При декодировании по большинству правильный результат преобразования на выходе схемы (т. е. после декодирующего устройства) получается, если:

1) $S \geq (k+1)/2$ (при этом любой неверный частный результат может появиться не более $k - (k+1)/2$ раз, так что при декодировании не может быть выдан ложный результат);

2) $S < (k+1)/2$ (при этом ни один из возможных неверных результатов в остальных $k - S$ повторениях не появился $S - 1$ раз).

Вероятность появления правильного частного результата точно S раз в k повторениях будет

$$k! / [(k-S)! S!] P^S (1-P)^{k-S}.$$

Вероятность появления правильного частного результата не менее $(k+1)/2$ раз равна

$$\sum_{S=(k+1)/2}^k k! / [(k-S)! S!] P^S (1-P)^{k-S}.$$

Вероятность появления в оставшихся $k - S$ повторениях какого-либо одного вероятного частного результата точно t раз равна

$$(k-S)! / [(k-S-t)! t!] q^t (1-P-q)^{k-S-t}.$$

Вероятность появления в оставшихся $k - S$ повторениях какого-либо одного неверного частного результата не более $S - 1$ раз будет

$$\sum_{t=0}^{S-1} (k-S)! / [(k-S-t)! t!] q^t (1-P-q)^{k-S-t}.$$

Вероятность того, что ни один из $(N_{y0} - 1)$ возможных неверных решений не появится в $k - S$ повторениях более $S - 1$ раз, равна

$$(N_{y0} - 1) \sum_{t=0}^{S-1} (k-S)! / [(k-S-t)! t!] q^t (1-P-q)^{k-S-t}.$$

Таким образом, для вероятности P_{Σ} получения правильного результата после декодирования можно записать:

$$P_{\Sigma} = \sum_{S=(k+1)/2}^k k! / [(k-S)! S!] P^S (1-P)^{k-S} \sum_{S=S_{\min}+1}^{(k-1)/2} k! / [(k-S)! S!] P^S (1-P)^{k-S} \times \\ \times (N_{y0} - 1) \sum_{t=0}^{S-1} (k-S)! / [(k-S-t)! t!] q^t (1-P-q)^{k-S-t}.$$

Анализ этого выражения показывает, что при $P > q$ вероятность P_{Σ} монотонно возрастает с ростом числа повторений k и при $k \rightarrow \infty P \rightarrow 1$. Это

означает, что, выбирая достаточно большое значение k , можно получить сколь угодно высокую надежность преобразования информации. Кроме положительных свойств коды с повторениями имеют два существенных недостатка:

1) повышение надежности достигается введением относительно очень большой информационной избыточности;

2) коды с повторениями корректируют только случайные ошибки (сбои) в работе устройства.

Если устройство дает систематическую ошибку (отказ) при преобразовании входного слова x_{0n} , то никаким количеством повторений эта ошибка не может быть обнаружена или тем более исправлена. Во многих случаях можно построить корректирующие коды, обеспечивающие тот же эффект коррекции при значительно меньшей избыточности, чем коды с повторениями. Это относится к классу преобразований, но в этих случаях выигрыш в избыточности получается очень существенным.

Коды Хэмминга. Более просто выполняются процессы кодирования и декодирования в кодах Хэмминга. Они характеризуются следующими основными чертами: все кодовые слова имеют равную длину; все символы кодового слова четко разделяются на *информационные* (переносящие информацию и совпадающие с символами не избыточного слова) и *проверочные* (предназначенные для целей контроля и исправления); те и другие символы занимают вполне определенные фиксированные позиции кодовых слов. Выбор проверочных символов (процесс кодирования), а также обнаружение и исправление ошибок (процесс декодирования) осуществляются с помощью проверок на четность, т. е. подсчетом по модулю 2.

В ЭВМ параллельного действия более вероятны одиночные ошибки, обнаружение и исправление которых обычно осуществляют с помощью кодов Хэмминга. Код с обнаружением однократной ошибки можно получить, прибавив к неизбыточному кодовому слову один проверочный разряд. Символ (0 или 1) в этом разряде выбирают из условия четности числа единиц в полном (избыточном) кодовом слове. Это означает, что сумма всех символов кодового слова по модулю 2 должна быть равна нулю. Если позиции кодового слова пронумеровать по порядку справа налево, а символы, стоящие в этих позициях, обозначить $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}$, то сформулированное выше условие можно записать так:

$$\left. \begin{aligned} x_{n+1} &= x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n; \\ E &= x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n \oplus x_{n+1} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.47)$$

В этом случае подмножества разрешенных и запрещенных кодовых слов делят полное множество $N = 2^{n+1}$ слов на две равные части. Переход между ними осуществляют изменением значения одного символа. Поэтому эти множества можно поменять местами, т. е. формировать разрешенные кодовые слова по принципу нечетности количества единиц в слове.

Если в процессе преобразования информации возникает любая однократная ошибка (в информационных или проверочных символах), то условие (6.47) нарушается и ошибка обнаруживается при проверке. Обнаруживаются ошибки и более высокой кратности, если кратность эта нечетна. Размещение проверочного символа в кодовом слове роли не играет. Обычно его ставят в конце слова после всех информационных символов. Для построения кода, исправляющего одиночные ошибки, необходимо организовать проверки на четность так, чтобы непосредственно получить число, указывающее номер позиции искаженного символа. Достигается это тем, что контрольные суммы E по модулю 2, получаемые в результате проверок ("являющиеся двоичными символами), записывают одну за другой: $E_8 \dots E_3 E_2 E_1$ и

рассматривают как δ -разрядное двоичное число, обозначающее номер искаженной позиции. Это число называют *контрольным*.

Пусть не избыточное кодовое слово состоит из n_0 (информационных) символов. Для построения кода с коррекцией к ним добавляют k проверочных символов, тогда кодовое слово в корректирующем коде имеет $n = n_0 + k$ позиций. Разрядность δ контрольного числа, указывающего номер позиции искаженного символа, должна быть достаточной, чтобы отобразить число, равное n . Поэтому необходимое количество проверок δ определяется неравенством $(2\delta - 1) \geq (n_0 + k)$.

Число проверок δ на четность не может быть больше числа проверочных символов k , поскольку в противном случае эти проверки не будут независимыми; следовательно, $\delta = k$. Итак, количество необходимых добавочных символов кодового слова k и одновременно количество необходимых проверок $2^k \geq (n_0 + k)$. δ на четность можно найти из неравенства $(2^k - 1) \geq (n_0 + k)$ или

Определим позиции кодового слова, символы которых должны принимать участие в каждой из k проверок. Если кодовое слово не содержит ошибок, то контрольное двоичное число должно изображать нуль. Если в младшем разряде контрольного числа стоит единица, то это означает ошибку в одной из тех позиций слов, номера которых в двоичной системе счисления имеют единицу в младшем разряде. А это все нечетные номера. Следовательно, первая проверка должна охватывать все символы, стоящие на нечетных позициях:

$$E = x_1 \oplus x_3 \oplus x_5 \oplus x_7 \oplus \dots \quad (6.48)$$

Единица во втором разряде контрольного числа означает ошибку в одной из тех позиций, двоичные номера которых (2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15 и т. д.) имеют единицу во втором разряде. Рассуждая подобным образом, можно записать для второй, третьей, четвертой и k -й проверок, начинающихся с символа, стоящего в $M = 2^{k-1}$ позиции,

(6.49) (6.50) (6.51)

$$\begin{aligned} E &= x_2 \oplus x_3 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_{10} \oplus x_{11} \oplus \dots; \\ E_3 &= x_4 \oplus x_5 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_{12} \oplus x_{13} \oplus x_{14} \oplus x_{15} \oplus x_{20} \oplus \dots; \\ E_1 &= x_8 \oplus x_9 \oplus x_{10} \oplus x_{11} \oplus x_{12} \oplus x_{13} \oplus x_{14} \oplus x_{15} \oplus x_{24} \oplus \dots; \\ E &= x_\mu \oplus x_{\mu+1} \oplus \dots \oplus x_{2\mu-1} \oplus x_{3\mu} \oplus x_{3\mu+1} \oplus x_{4\mu-1} \oplus x_{5\mu} \oplus \dots; \end{aligned} \quad (6.52)$$

Далее остается выбрать в кодовом слове длиной $n = n_0 + k$ символов позиции, отводимые для информационных и проверочных символов. Для проверочных символов позиции следует выбирать так, чтобы кодирование выполнялось, возможно, более просто. Выделим в формулах (6.48)—(6.52) позиции, встречающиеся только в одной проверке: 1, 2, 4, 6, 8, 16, ..., т. е. позиции с номерами, являющимися целыми степенями двойки. Если разместить проверочные символы в этих позициях, то, приняв выражения (6.48)—(6.52) равными нулю, получим соотношения, реализуемые в процессе кодирования:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_3 \oplus x_5 \oplus x_7 \oplus \dots, \\ x_2 &= x_3 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_{10} \oplus x_{11} \oplus \dots, \\ x_4 &= x_5 \oplus x_6 \oplus x_7 \oplus x_{12} \oplus x_{13} \oplus x_{14} \oplus x_{15} \oplus x_{20} \oplus \dots, \\ x_8 &= x_9 \oplus x_{10} \oplus x_{11} \oplus x_{12} \oplus x_{13} \oplus x_{14} \oplus x_{15} \oplus x_{24} \oplus \dots, \\ x_\mu &= x_{\mu+1} \oplus \dots \oplus x_{2\mu-1} \oplus x_{3\mu} \oplus \dots \oplus x_{4\mu-1} \oplus x_{5\mu} \oplus \dots \oplus x_{6\mu-1} \oplus x_{7\mu} \oplus \dots \end{aligned}$$

Для практической реализации кодов Хэмминга необходимо разработать

кодирующее устройство, определяющее значения проверочных символов и размещающее их в соответствующих позициях кодового слова, и декодирующее устройство, подсчитывающее контрольные суммы, выявляющее наличие ошибки, определяющее номер позиции искаженного символа, автоматически исправляющее ошибку и выделяющее информационные символы кодового слова. Построение кодирующего и декодирующего устройств существенно облегчается тем, что суммирование ведется по модулю 2, номер позиции искаженного символа получается непосредственно в двоичном коде и исправление ошибки в этой позиции сводится к замене символа на обратный. Рассмотренные выше коды целесообразно применять в логических устройствах и устройствах управления.

Арифметические коды. Для коррекции ошибок в устройствах, выполняющих математические операции вычитания, сложения и умножения, наиболее эффективными являются арифметические коды, которые можно подразделить на коды:

- а) обнаруживающие ошибки;
- б) исправляющие ошибки.

Идея построения арифметических кодов состоит в том, что в их контрольных разрядах записывают остаток от деления исходного кодируемого числа на некоторое заранее заданное целое число A . При этом все машинные числа можно условно рассматривать как целые. Эти коды обнаружат все ошибки, за исключением тех, которые кратны выбранному модулю. Арифметичность кодов основана на том, что остаток от деления на A суммы (произведения) должен быть равен сумме (произведению) остатков от деления на A исходных чисел, т. е. в этом случае есть прямая связь между контрольными разрядами операндов и результатом операции. Существует три способа кодирования чисел в арифметических кодах.

Первый способ заключается в нахождении остатка $R(N)$ от деления заданного числа N на выбранный модуль A . Например, $N = 1010$, $A = 3$, $R(N) = 01$, код 101001. Этот способ кодирования используют, когда контрольные и информационные разряды обрабатываются отдельно. Второй способ состоит в выполнении следующих последовательных операций:

здать число контрольных разрядов C ;

умножить заданное число N на 2^C ;

вычислить $(2^C N) \bmod A$;

сложить $2^C N$ с числом $A(2^C N) \bmod A$ (в полученном результате C младших разрядов являются контрольными). Например, $N = 1010$, $A = 3$, $C = 01$, код 101010. Этот способ применяют, когда сами числа должны обладать свойствами самоконтролируемости.

Максимальное значение N для кодов, полученных первым и вторым способами, определяется формулой $N = 2^{n-C} - 1$, где n — число разрядов в кодовом слове, включая контрольные.

Третий способ заключается в умножении заданного числа N на модуль A . Это более эффективный способ кодирования слов, в нем

$$(2^n - 1 - A)/A < N < (2^n - 1)/A.$$

В отличие от способов 1 и 2 кодирования способ 3 не имеет отдельно

расположенных информационных и контрольных разрядов. При этом способе кодирования получение информационных разрядов возможно лишь после деления кодового слова на модуль A . Необходимо отметить, что при построении арифметических устройств, использующих способ 3 кодирования, избегают постоянного умножения и деления чисел на модуль A по мере прохождения их через сумматор. Только при выводе данных из арифметических устройств производят деление результатов на модуль A для получения информационных символов. Для организации контроля арифметических операций (сложения или умножения) в машинах помимо обычного арифметического устройства для операндов необходимо иметь дополнительное оборудование:

- а) сумматоры (умножители) для остатков операндов;
- б) схему быстрого определения остатка от деления суммы (произведения) на модуль A ,
- в) схему сравнения суммы (произведения) остатков операндов с остатком их суммы (произведения).

Для характеристики ошибок, возникающих в арифметических операциях, удобно ввести понятие числового значения ошибки e_a равного числу, на которое изменяется правильный результат при возникновении данной ошибки. Параметр e_a может быть положительным и отрицательным и зависит от вектора ошибки e , который использовался для описания ошибок при передаче или логических преобразованиях информации.

Выбор параметра A в соответствии с числовым значением тех ошибок, которые должны быть обнаружены, определяется выражением $e_a \bmod A \neq 0$ (6.53) для всех e_{ai} из перечня обнаруживаемых ошибок.

Выражению (6.53) могут соответствовать несколько значений параметра A . Поэтому на практике целесообразно выбрать наименьший из них. Определение минимального значения параметра A обычно достигается простым перебором всех целых чисел. Наибольшее практическое значение имеет обнаружение однократных ошибок, не связанное с введением большой избыточности. Экономичность преобразователя с обнаружением однократных ошибок тем выше, чем больше разрядность участвующих в операции двоичных чисел. Анализ (6.53) показывает, что при обнаружении всех однократных ошибок в арифметических операциях сложения, вычитания и умножения оптимальное значение параметра A равно трем, т. е. достаточно двух проверочных двоичных символов независимо от разрядности участвующих в операции чисел.

Коды Брауна. При реализации способа обнаружения однократных ошибок большие трудности возникают при создании устройств, определяющих остатки по модулю 3: деление двоичных чисел на 3 приводит к существенному недостатку — правильность выполнения операций сложения, вычитания или умножения контролируется с помощью значительно более сложной операции деления. Устранить этот недостаток можно использованием кодов Брауна, с помощью которых обосновывается легко реализуемый аппаратно способ определения остатков от деления чисел, представленных в двоичной системе счисления, на 3.

Идея кодов Брауна основана на положении, что остаток от деления на 3 целого числа μ , представленного в двоичной системе счисления кодовым словом d , равен разности числа единиц в нечетных позициях числа x , и числа единиц в четных позициях:

$$\mu \bmod 3 = (v_{\text{нечет}} - v_{\text{чет}}) \bmod 3,$$

где $v_{\text{нечет}}$ — вес кодового слова, составленного из нечетных символов x ; $v_{\text{чет}}$ — вес кодового слова, образованного четными символами.

Схема контроля по модулю 3 для 4-разрядного кодового слова приведена на рис. 6.11.

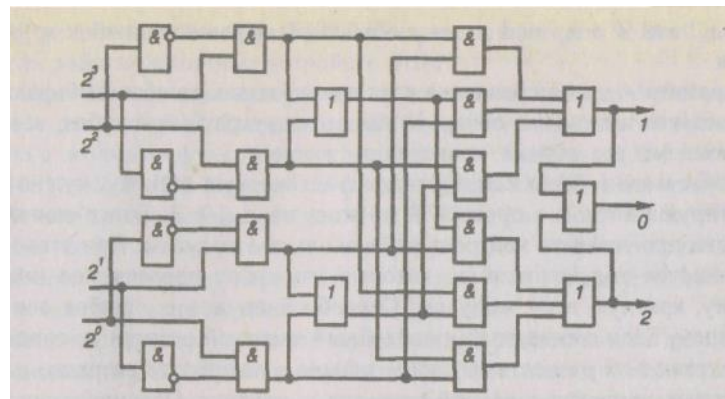


Рис. 6.11. Схема контроля по mod (3) для 4-разрядного кодового слова

Определить значения $A_{\min}$ при обнаружении двойных ошибок можно следующим образом:

n_0	2	4	10	16	20	32	40
K	3	4	5	6	6	7	7
$A_{\min}$	5	11	23	37	47	67	83

При выборе значения модуля A необходимо также учитывать стоимость схем контроля; увеличение длины чисел; увеличение времени, необходимого для выполнения арифметических операций. Если при выполнении арифметических операций произошла ошибка, то для ее исправления необходимо выполнение двух условий:

- 1) $e_{ai} \bmod A \neq 0$ для всех e_{ai} из перечня ошибок, подлежащих исправлению;
- 2) $e_{ai} \bmod A \neq e_{aj} \bmod A$ для любой пары неравных ошибок из общего перечня.

Параметр A для исправления всех однократных ошибок выбирают точно так же, как и в случае обнаружения всех двукратных ошибок, в частности приемлемы все данные, приведенные выше.

Чтобы можно было исправить арифметическую ошибку, нужно иметь корректирующий код с проверкой по модулю $d_{\min} > 3$. Этого можно достичь, если производить контроль по нескольким модулям. При этом не обнаруживаются только ошибки, которые изменяют проверяемое число на величину, кратную всем модулям. Способ обнаружения ошибок состоит в следующем. Если ожидаемый и найденный сверткой остатки не совпадают, то определяют их разность со своим знаком и находят те разряды, искажение которых приводит к данной разности в остатках. Обычно таких разрядов по одному модулю получают несколько. Затем такую же процедуру производят и с остатками по второму модулю. Далее все «подозрительные» разряды анализируют. Если найдут разряд, «подозрительный» по первому и второму модулю, то, очевидно,

он и является ошибочным. Исправление производят сложением по модулю 2 содержимого ошибочного разряда с единицей.

Равновесные коды. При передаче данных внутри устройств ЭВМ, а также по каналам связи, в которых наблюдаются асимметричные ошибки, большое распространение получили равновесные коды (при асимметричных ошибках имеют место только переходы $0 \rightarrow 1$ либо $1 \rightarrow 0$). В равновесном

коде используют слова, имеющие некоторое фиксированное число единиц m в n -разрядном слове, поэтому они обнаруживают асимметричные ошибки любой кратности. Существует большое количество равновесных кодов m из n , в которых общее число разрешенных кодовых слов N определяется как $N = n!/[m!(n - m!)]$. Наибольшее распространение получили равновесные

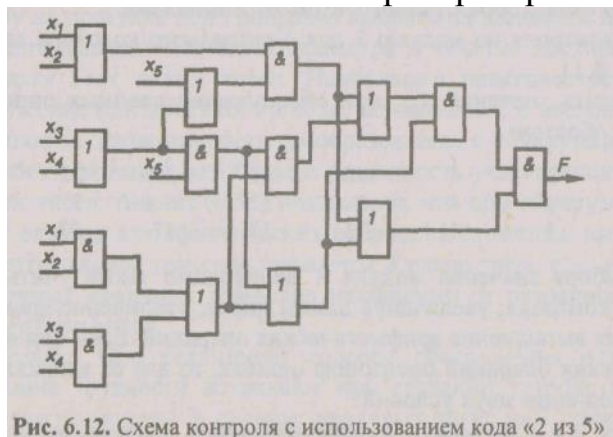


Рис. 6.12. Схема контроля с использованием кода «2 из 5»

коды «2 из 5», «4 из 8», «2 из 7». Рассмотрим применение кода «2 из 5» для контроля работы различных устройств ЭВМ:

Анализ данных показывает, что все двоичные слова равновесного кода содержат две 1 и три 0. Следовательно, работа схемы контроля может быть описана с помощью функций алгебры логики: $F(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = V(3, 5, 6, 9, 10, 12, 17, 18, 20, 24)$. На рис. 6.12 показана схема контроля для кода «2 из 5», построенная с использованием схем И и ИЛИ на два входа. Недостаток равновесных кодов в том, что они не обнаруживают ошибки, приводящие к одинаковому количеству переходов $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$. Но на практике вероятность появления таких ошибок чрезвычайно мала.

Введение структурной и информационной избыточности для повышения надежности ЭВМ будет иметь низкую эффективность, если при проектировании вычислительных машин нерационально решены вопросы конструирования различных узлов. Так, при резервировании ограничения в габаритных размерах и весе могут привести к схемам (или другим функциональным устройствам), в которых используются малогабаритные, менее надежные элементы, размещаемые в располагаемом объеме. При этих условиях надежность резервированной системы может оказаться меньше, чем надежность нерезервированной системы. Кроме того, вибрация или изменения температуры могут вызвать отказ резервированных систем. При этих условиях необходимо направить усилия конструктора на защиту от перегрева, ослабление вибраций и ударов или на другую защиту схемы или системы от воздействия окружающих условий.

Конструктор, стремящийся обеспечить высокую надежность ЭВМ, должен помнить, что чем проще конструкция, тем выше надежность; стан-

дартизация элементов также повышает надежность ЭВМ, поскольку стандартные элементы и схемы обычно проходят тщательную приработку и вероятность появления каких-либо неприятных неожиданностей при их использовании очень мала. Конструктор должен также проявлять интерес к факторам инженерной психологии. Следует заботиться о том, чтобы неправильная сборка или неправильное использование созданной конструкции были практически невозможны. Длина кабелей должна выбираться такой, чтобы можно было соединить соответствующим разъемом необходимый кабель; разъемы должны отличаться по размерам, чтобы подходил разъем только соответствующего кабеля. Если поставлено условие замены функционального узла, то проблемы, связанные с удалением и заменой его малоквалифицированным персоналом в эксплуатационных условиях, должны быть решены оптимальным образом.

Важное значение для повышения надежности ЭВМ имеют обеспечиваемые конструкцией возможности проведения профилактики и контроля. Разработчик функциональной схемы по возможности должен так выбирать принцип действия и схему устройства и его узлов, чтобы они могли быть подвергнуты полной неразрушающей функциональной проверке.

Один из методов повышения надежности ЭВМ — это создание облегченных условий эксплуатации. Этого можно добиться путём обеспечения термостатирования или температурного контроля, ослабления ударных нагрузок с помощью амортизации, уменьшения влажности при транспортировке, хранении и эксплуатации, применения в замкнутом объеме влагопоглотителей и т. п. Несмотря на то, что изменение окружающих условий (обычно путем применения специальных контейнеров, в которых поддерживаются требуемые условия) обходится очень дорого и связано с дополнительными трудностями, тем не менее оно представляет собой выход из положения в тех случаях, когда невозможно найти приемлемое конструктивное решение для обеспечения надежности при работе во всем диапазоне предельных условий.

Другой метод конструирования, направленный на повышение надежности, заключается в преднамеренном решении конструктора не рассчитывать конструкцию на самые худшие рабочие условия. Приняв такое решение, конструктор имеет возможность использовать менее сложную конструкцию, обладающую более высокой надежностью при всех, кроме наихудших сочетаний, условиях. Вероятность столкнуться с худшими сочетаниями окружающих условий при этом статистически весьма мала.

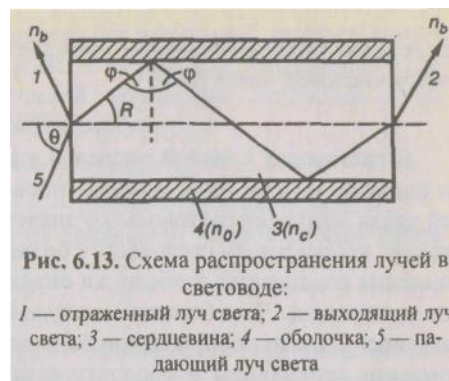
Эффективный метод повышения надежности — проявление внимания ко всем случаям отказов и неувязкам в конструкции, сведения о которых поступают из отчетов о разработке, конструктивного анализа, формальных программ испытаний, отчетов о неисправностях и отказах при эксплуатации и материалов исследований причин отказов. Оперативные корректировочные меры могут в значительной степени повысить надежность.

6.5. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ЭВМ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) находят все более широкое применение в телевидении, системах связи, устройствах передачи изображений и других системах, но и для обмена информацией между различными устройствами ЭВМ, между отдельными машинами в многомашинных комплексах, вычислительных сетях, иерархических системах обработки информации. ВОЛС займут доминирующее положение в перечисленных системах и устройствах. Это связано с малым поперечным сечением и малой массой волокон, большой широкополосностью, невосприимчивостью к внешним электромагнитным помехам, отсутствием внешних излучений, отсутствием коротких замыканий, более широким температурным диапазоном работы и т. д.

Основу ВОЛС составляет световод или оптическое волокно. Схему прохождения сигнала и структуру световода поясняет рис. 6.13. Луч света, падающий под углом θ на торец световода, проходит в его сердцевину и отражается под углом R от оболочки. Отражение происходит вследствие разности коэффициентов отражений оболочки n_0 и сердцевины n_c . После многократного отражения луч света выходит из противоположного конца световода практически неизменным.

В световоде выделяют два типа лучей: меридиональные, проходящие через ось световода (этот тип лучей показан на рис. 6.13), и косые, не пересекающие ось. С помощью простой геометрии можно получить длину пути меридионального луча $P(R) = L \sec(R)$, где L — длина световода. Длина пути и время прохождения луча по световоду — функция угла падения луча. Разница между длинами пути и временем прохождения для различных составляющих луча (мод) приводит к сокращению информационной емкости световода.



Для косоугольного луча, падающего на торец световода под углом, определяемым единичным вектором

$$S_0 = L_0 i + M_0 j + N_0 k,$$

где L_0 , M_0 и N_0 — направляющие косинусы луча, в точке $g_0 = x_0 i + y_0 j$ имеются соотношения:

$$(S_m - S_{m+1})g_m = 0; \quad (S_m + S_{m+1}) = 0.$$

Первое соотношение — условие компланарности падающего и отраженного лучей, а второе — условие равенства углов падения и отражения. При этом S_m и g_m описывают луч, предшествующий /и-отражению на границе

сердцевина — оболочка. Условием полного внутреннего отражения является соотношение

$$S_m g_m / |g_m| \leq (n_c^2 - n_0^2) / n_c^2.$$

В случае рассмотрения луча в плоскости, $x-z (y_0 = 0)$ данное выражение в точке $x_0 = a$ не зависит от M . Это означает, что луч может входить под углом 90° к оси y и все еще быть направляемым с минимальной скоростью. Косые лучи в действительности могут существовать в световоде, отражаясь под очень большими углами. Для световода характерны следующие параметры. Числовая апертура, определяемая соотношением

$$NA = (n_c^2 - n_0^2)^{1/2},$$

устанавливает степень эффективности при использовании излучения источника света и особенности применения световода. Угол, $\Theta_{кр}$, при котором происходит полное отражение луча света от торца световода, также определяется числовой апертурой:

$$\Theta_{кр} = \arcsin(NA).$$

В световодах с малой числовой апертурой малая дисперсия импульса, но большие потери из-за микроизгибов. Для использования в линиях дальней связи подходят световоды со значением $NA = 0,2$. В коротких ВОЛС следует использовать световоды с большим значением NA . Показатели преломления сердцевины и оболочки определяют эффективность ввода излучения в световод. Чем больше между ними разница, тем более эффективен световод. Однако неоправданно большая разница между показателями преломления сердцевины и оболочки ведет к увеличению дисперсии (уширению импульса).

Затухание света в световоде обусловлено поглощением и рассеянием в материале сердцевины и потерями на излучение. Степень поглощения света материалом световода определяется его примесями, каждый вид которой обладает определенной полосой поглощения. Так, в волоконных световодах на основе кварцевого стекла основной примесью являются ионы OH^- , имеющие максимальные потери на длине волны 950 нм и слабые полосы поглощения на длинах волн 725, 825 и 875 нм. При концентрации ионов OH^- , равной 10^{-6} , потери на длинах волн вблизи 950 нм составляют примерно 1 дБ/км.

Уширение импульса в световодах происходит из-за наличия в них межмодовой дисперсии и дисперсии материала. Межмодовая дисперсия — следствие того, что свет, введенный в световод под углом к оси, проходит более длинный путь по сравнению со светом, распространяющимся вдоль оси. Эта разница длин пути приводит к расплыванию выходного импульса. В многомодовых световодах из кварцевого стекла с полимерной оболочкой уширение импульса может быть равно 20 нс/км. Дисперсия материала обусловлена нелинейной зависимостью показателя преломления материала от длины волны света. Уширение импульса за счет дисперсии материала определяется выражением:

$$\Delta_{мат} = \lambda (\Delta\lambda) / c (\partial^2 n_c / \partial \lambda^2) L,$$

где λ — средняя длина волны передаваемого света; $\Delta\lambda$ — ширина спектра источника света; L — длина световода; c — скорость света.

Для световодов типичное значение уширения импульса из-за дисперсии материала при использовании света с длиной волны 820 нм составляет 3—3,5

нс/км ($\Delta\lambda = 380 \text{ Å}^0$). Если принять критической длиной световода его длину, где уширение импульса равно длительности исходного импульса (при определенной скорости передачи информации), то при скорости 10 Мбит/с критическая длина световода равна 25 км при использовании в качестве источника света светоизлучающего диода (СИД) и 50 км при использовании лазерных источников света.

Изгибы световода приводят к потерям на излучение, которое сильно возрастают с уменьшением радиуса изгиба. Наименьший допустимый радиус кривизны изгиба ограничен фактической прочностью световодов. Относительная деформация определяется выражением

$$\sigma_s = [(R + 2r)/(R + r) - 1] \cdot 100\%,$$

где r — радиус оболочки световода, м; R — радиус изгиба световода, м.

Прочность световода определяется локальным максимальным напряжением

$$\sigma_{\max} = 2\sigma(C_{\text{деф}}/r_{\text{деф}})^{1/2},$$

где σ — приложенное напряжение; $C_{\text{деф}}$ — эффективная глубина дефектов;

$r_{\text{деф}}$ — эффективный радиус дефекта. Когда локальное напряжение, определяемое в самом слабом месте на длине световода, достигает критического значения, происходит разрушение.

Конструктивно световод состоит из сердцевины, покрытой несколькими слоями защитных материалов. Первичное покрытие составляет тонкая (5—10 мкм) лаковая пленка из ацетата целлюлозы, эпоксидной смолы, силикона, уретана или других аналогичных материалов, защищающих материал сердцевины от воздействия атмосферы и увеличивающих его механическую прочность. Назначение последующих слоев — устранение воздействий на световод поперечных сил и увеличение прочности на разрыв.

В целях устранения влияния усадки покрытий на материал сердцевины изготавливают трубчатый световод, располагаемый внутри, например, полипропиленовой трубки. Группа световодов объединяется конструктивно в оптический кабель, в конструкцию которого кроме световодов включают силовые элементы, демпфирующие слои и специальные наружные покрытия. На рис. 6.14 представлены несколько примеров сечений оптических кабелей. Оптический кабель (рис. 6.14, а) имеет 10 световодов 1 располагающихся на цилиндрическом упрочняющем элементе 2, защищенном покрытием 3. Поверх световодов размещена полимерная демпфирующая прокладка 4, которая помещается в полимерную оболочку 5. Общий диаметр кабеля 7 мм.

В оптическом кабеле (рис. 6.14, б) четыре световода 1 совместно с упрочняющим стальным стержнем образуют субкабель 2. Восемь таких субкабелей с четырьмя коаксиальными фидерами 8 для электропитания, окруженные демпфирующим материалом, размещаются на упрочняющих элементах 4 и 7, защищенных полимерным покрытием 3. Поверх конструкции нанесены демпфирующий материал 5 и защитный материал 6. В оптическом кабеле (рис. 6.14, в) световоды 1 уложены в канавки фигурного пластмассового профиля 2, изготовленного методом экструзии. Канавки следуют по винтовой линии в цилиндрических координатах $\varphi = 2\pi z/H$, где H — шаг скрутки. Они заполняются гелием или очень мягким материалом. Сердцевину кабеля

образует упрочняющий элемент 3. В оптическом кабеле (рис. 6.14, г) трубчатые световоды 1 размещаются на защищенном изоляционным материалом упрочняющем элементе 2. Снаружи кабель защищен демпфирующим слоем 3 и защитным материалом 4.



Рис. 6.14. Сечение оптических кабелей

В табл. 6.1 приведены характеристики некоторых выпускаемых зарубежными фирмами оптических кабелей. Отечественной промышленностью выпускается большая номенклатура оптических кабелей, характеризующихся широким спектром параметров: наружный диаметр 4—8 мм, прочность на разрыв 50—250 Н, коэффициент затухания 5—50 дБ/км, погонная масса 10—50 кг/км, температура эксплуатации от -40 до +70 °С.

Оптический кабель с источником и приемником излучения образуют волоконно-оптическую линию связи (рис. 6.15). В качестве источника излучения используются обычно светодиоды или лазерные диоды с параметрами, приведенными в табл. 6.2. Световоды характеризуются линейной зависимостью выходной оптической мощности от тока подкачки.

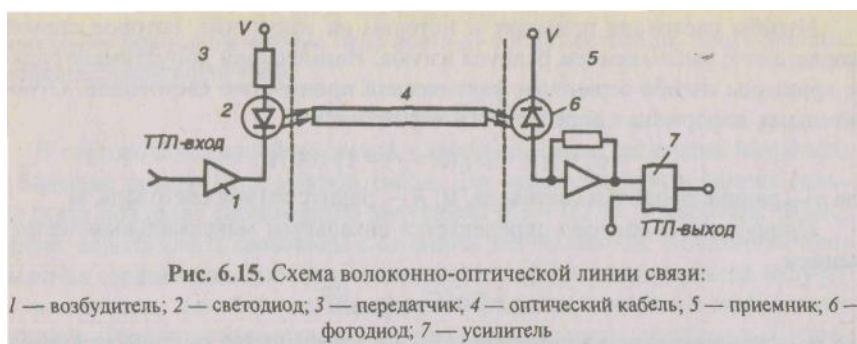


Рис. 6.15. Схема волоконно-оптической линии связи:

1 — возбудитель; 2 — светодиод; 3 — передатчик; 4 — оптический кабель; 5 — приемник; 6 — фотодиод; 7 — усилитель

У лазерных диодов ярко выраженная пороговая зависимость: после превышения порогового значения (примерно 200 мА) световая мощность быстро растет. Практически для модуляции достаточно примерно 20 мА переменной составляющей. Светодиоды требуют высоких модулирующих токов. Потери световой энергии при вводе в световод зависят от числовой апертуры последнего и для светодиода равны 14—18 дБ, для лазерного диода — 3—8 дБ.

6.1. Характеристики оптических кабелей

Тип оптического кабеля	Световод		Кабель					
	Материал	Диаметр, мкм	Наружный диаметр, мм	Число световодов, шт	Затухание, Дб/км	Прочность на разрыв, Н	Радиус изгиба, см	NA
1156-7 (Corning)	Кварцевое стекло	125	5,0	7	6	100	2,5	0,16
#122 (Furukawa Elect)	То же	125	8,0	6	6	300	15,0	0,25
2000 (Galileo)	Galite	70	4,2	210	400	260	2,0	0,66
5000 (Galileo)	>>	125	4,2	19	20	260	2,0	0,20
LD (ITT)	Стекло	500	2,5	19	10	1000	2,5	0,28
STL-K4-15-10K (Silektor)	Кварцевое стекло	125	6,5	4	10	500	5,0	0,20
ET1017 (Thomson Brandt)	Пластик	85	9,4	19	100	550	15,0	—
GP10-SA10 (Times Fiber)	Стекло	125	8,5	10	10	550	10,0	0,3
LH-PC05-07	Кварцевое стекло	200	3,2	7	40	100	1,0	—

6.2. Характеристики источников излучения

Источник излучения	Параметры			Диаграмма направленности	Срок службы, ч
	Световая мощность, МВт	Ширина излучаемого спектра, Гц	Модулирующий ток, мА		
Светодиод	5—20	$4 \cdot 10^{12}$	100	Симметричная	10^5
Лазерный диод	10—40	$2 \cdot 10^2$	200	Несимметричная (типа всера $5^\circ \times 30^\circ$; по уровню 30 дБ)	10^4

Для уменьшения этих потерь следует использовать источники излучения с малой площадкой излучения, малым телесным углом излучения и большим сроком службы (табл. 6.2). В ВОЛС со скоростью передачи информации ниже 50 Мбит/с следует использовать светодиоды, для более высоких скоростей передачи информации — лазерные диоды.

В качестве приемников излучения (преобразователей света в электрические сигналы) используют два типа фотодиодов: с внутренним лавинным усилением — лавинный фотодиод (ЛФД) — и без него. Первый обладает большей чувствительностью и более высоким уровнем выходного сигнала по сравнению со вторым. Однако его характеристика имеет длинный спад, приводящий к межсимвольным искажениям, и для его работы требуется высоковольтный источник от 100 до 500 В (второй недостаток не является существенным ввиду незначительного потребления тока). Лавинный фотодиод совместно с малощумящим усилителем, преобразователем постоянного тока, цепью температурной компенсации и другими элементами образуют *модуль приемника излучения*.

При передаче информации на большое расстояние во избежание потерь в ВОЛС включают регенерирующие устройства, обеспечивающие промежуточное усиление ослабленных сигналов и передачу усиленных сигналов в последующий участок ВОЛС. Одной из проблем применения ВОЛС является обеспечение надежных разъемных соединений. Радиальные смещения, зазоры и перекосы в разъемных соединениях световодов, а также в стыках световода с источником и приемником излучения приводят к существенным потерям сигналов. Так, при вводе излучения в световод удаление торца от поверхности светодиода на 50 мкм приводит к потерям $\Pi = 4$ дБ, в то время как радиальное смещение на 50 мкм может привести к потерям $\Pi > 8$ дБ. На рис. 6.16 приведены зависимости потерь в стыке двух световодов для радиального и осевого смещения (рис. 6.16, а) и перекоса (рис. 6.16, б).

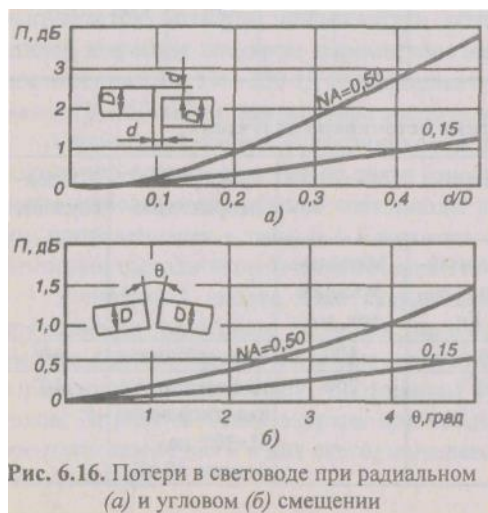


Рис. 6.16. Потери в световоде при радиальном (а) и угловом (б) смещении

Потери из-за осевого и радиального смещения или перекоса уменьшаются применением иммерсионных жидкостей (клея) между торцами световодов, которые удерживаются как можно ближе друг к другу. Потери из-за рассогласования торцов световодов уменьшают использованием световодов большого диаметра, а также применением прецизионных котиловочных и соединительных устройств.

При проектировании ВОЛС основными исходными данными являются: необходимая скорость передачи информации, отношение сигнал/шум (или вероятность ошибки при передаче информации), расстояние между приемником и передатчиком информации и вид информации (цифровой или аналоговый). Кроме того, необходимо учитывать также физический и химический состав окружающей среды, стоимость, надежность, возможность модернизации, размеры, массу; учет совокупности всех перечисленных факторов делает процедуру расчета ВОЛС довольно сложной.

На начальном этапе проектирования определяется ширина пропускания оптического кабеля в совокупности с источником сигнала, обеспечивающая требуемую скорость передачи информации при известном расстоянии между конечными устройствами. Так как ширина полосы сигнала зависит от типа кабеля и источника сигнала, а также от расстояния, то не всегда доступные для применения кабели и лазеры могут обеспечить требуемую скорость передачи информации без использования большого числа ретрансляторов, повышающих

стоимость всей системы. Оптимизация в этом случае может быть проведена за счет уменьшения расстояния или снижением требований по скорости передачи информации.

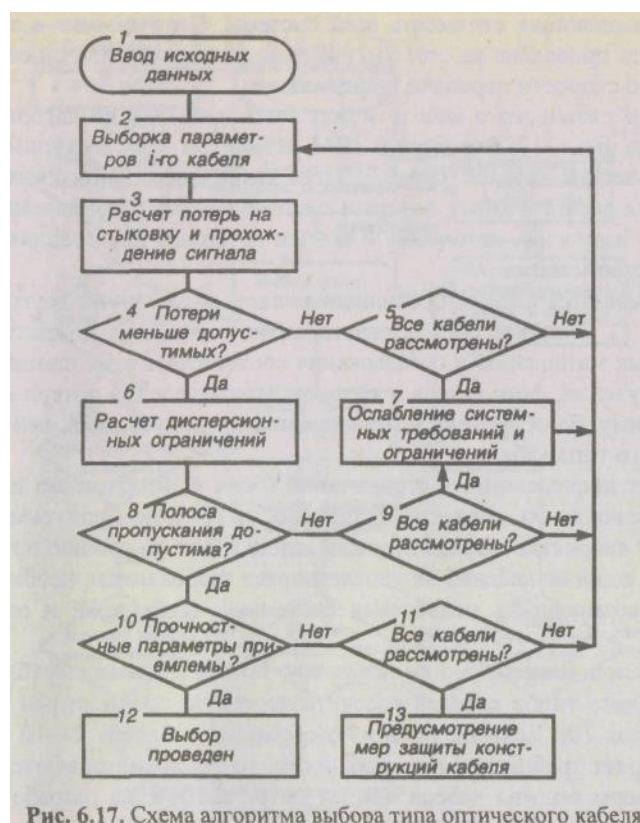


Рис. 6.17. Схема алгоритма выбора типа оптического кабеля

Выбор оптического кабеля может быть проведен по алгоритму, показанному на рис. 6.17. Вводятся в ЭВМ параметры всех доступных потребителю оптических кабелей (блок 7). Затем выбирается один из них (блок 2) и проводится расчет полных потерь в системе (блоки 3, 4), начиная с потерь при вводе излучения источника и кончая потерями при соединении с конечным устройством.

Учитываются потери в соединениях световодов друг с другом, в разъемах (блок 5). В случае использования антиотражающих покрытий или иммерсионных материалов и согласования соответствующих площадей источников излучения, фотодиодов и волоконных световодов потери можно свести к минимуму. Если уровень потерь превышает допустимый, ведется расчет следующего типа кабеля.

Расчет дисперсионных ограничений (блок 6) необходимо проводить с целью установления совместимости полосы, которую пропускает кабель с требуемой скоростью передачи информации. Если по уровню потерь и дисперсии ни один из кабелей не удовлетворяет требованиям, необходимо рассмотреть возможность ослабления системных требований и ограничений (блок 7).

Отвечающие требованиям по уровню потерь и дисперсии (блок 8) один или несколько типов кабелей рассчитываются по прочностным характеристикам (блок 10). Если ни один из отобранных в блоках 2—10 кабелей не удовлетворяет требованиям по прочности, то предусматриваются дополнительные меры защиты кабеля или выдается задание на разработку нового

кабеля. Итогом выбора является тип кабеля с характеристиками, удовлетворяющими требованиям (блок 12).

Расчет приемника ВОЛС проводится после установления общих системных требований и ограничений по алгоритму (рис. 6.18). Блоком 2 решается вопрос об использовании аналоговой или цифровой модуляции источника излучения. При использовании цифровой модуляции решается вопрос, использовать ли импульсно-кодовый или фазоимпульсный способ кодирования (блок 3). На следующем этапе (блок 4) проводят расчет шума приемника в полосе частот сигнала, который определяется требуемой шириной полосы информационных сигналов, шумом всех компонентов приемника и возможным применением фильтров для подавления шумов за пределами полосы передаваемых сигналов. После этого оценивается отношение сигнал/шум на входе системы.

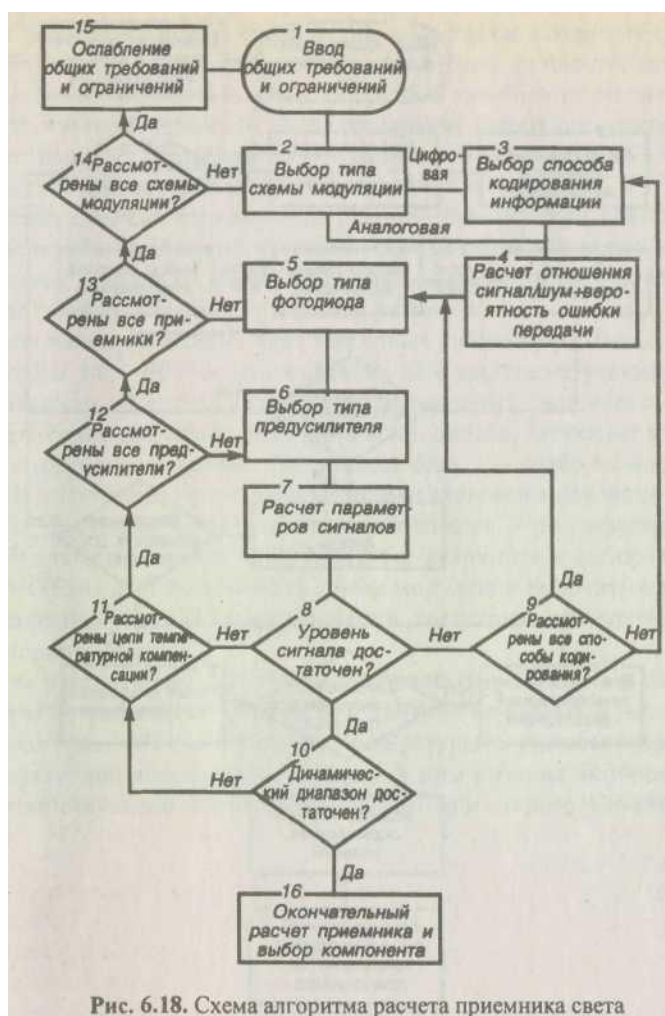


Рис. 6.18. Схема алгоритма расчета приемника света

Далее проводится выбор конкретного типа фотодиода из имеющихся в наличии (блок 5). При этом подразумевается, что длина волны источника соответствует чувствительности фотодиода. После выбора фотодиода определяется тип предусилителя (блок 6): резистивный, с нагрузкой, интегрирующий или с изменяющейся обратной связью. При малых скоростях передачи сигналов чаще используются интегрирующие усилители на полевых транзисторах. При высоких скоростях передачи (< 100 Мбит/с) наиболее часто используют интегрирующие предусилители на биполярных транзисторах.

После выбора типа предусилителя рассчитывают минимальный уровень

детектируемого сигнала, который определяется минимальной величиной принимаемой приемником мощности оптического сигнала, генерирующей ток, равный шумовому току в полосе частот сигнала (блок 7). Затем определяют мощность сигнала, необходимой для достижения заданной величины отношения сигнал/шум.

Блоком 10 рассматривается динамический диапазон приемника с учетом изменения температуры окружающей среды и изменения параметров линии во времени. Если ожидаемые изменения температуры оказывают слишком сильное влияние на приемник, то следует использовать схему температурной компенсации (блок 11).

При расчете источника сигнала, проводимом по алгоритму (рис. 6.19), следует учитывать суммарное значение оптической мощности, длину волны излучения и спектральную ширину, скорость и линейность отклика (блоки 1 и 3) и в случае необходимости — использование схемы температурной компенсации (блок 12). Величина длины волны источника (блок 2) во многом зависит от спектра затухания выбранного типа световода.

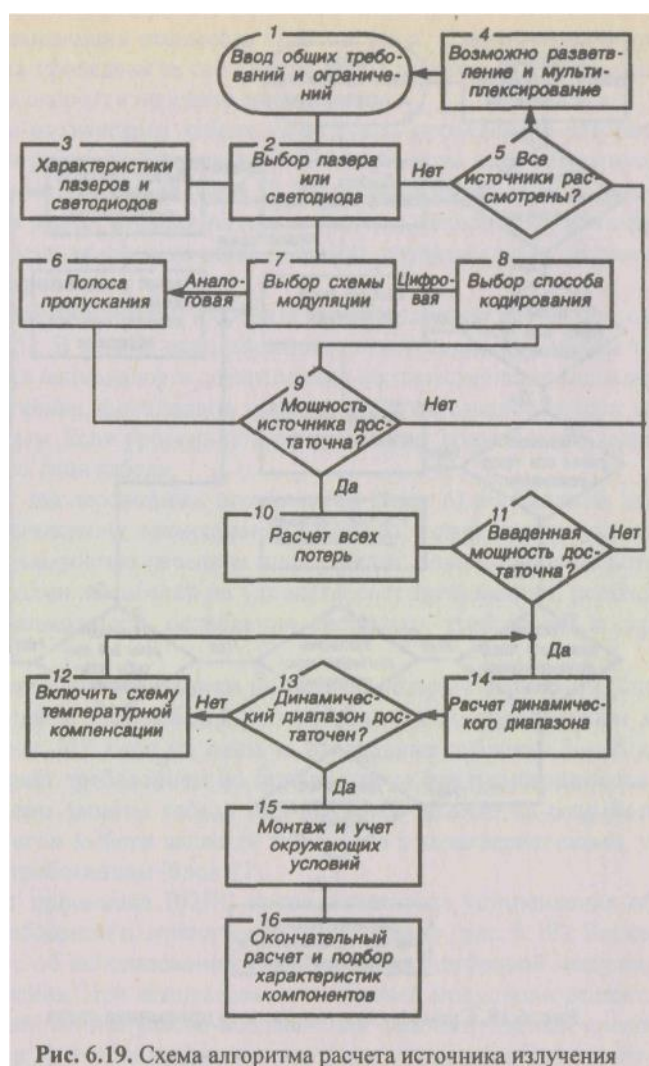


Рис. 6.19. Схема алгоритма расчета источника излучения

Ширина спектра определяется полосой пропускания световода. Требуемая величина оптической мощности определяется минимально допустимым уровнем сигнала на входе приемника после учета всех потерь на прохождение сигнала, в том числе в стыках разъемов.

Длина волны источника для стеклянных световодов обычно выбирается в

пределах 840—900 нм или в области 1060 нм, где затухание в световодах минимально. В случае применения полимерных световодов можно использовать более широкий набор длин волн, однако, затухание в таких световодах сравнительно велико. Следующий блок 7 — выбор аналоговой или цифровой модуляции. При использовании аналоговой модуляции мощность источника зависит от уровня искажения сигналов. При цифровой модуляции необходимо учитывать быстродействие источника и выбор способа кодирования (блок 8). После выбора схемы модуляции подсчитываются потери в соединении (блок 10) и определяется, достаточна ли величина оптической мощности (блок 11).

Затем рассчитывают величину передаваемого отношения сигнал/шум, требуемую потребляемую мощность и влияние температуры на передаваемый сигнал (блок 12). Если влияние температуры значительно, вводят меры по температурной компенсации изменений тока питания источника с помощью соответствующей схемы обратной связи или точного регулятора тока.

ЧАСТЬ 5 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

В пятой части рассмотрены основные элементы автоматизированного производства, гибкие технологические системы изготовления и сборки ЭВМ. Дан анализ локальных вычислительных сетей для развивающихся систем. Определены показатели работы развивающихся роботизированных систем. Современные методы адаптивного управления робото-техническими комплексами изложены для условий гибкого автоматизированного производства. Описаны особенности структурного построения и взаимодействия основных функциональных составляющих производства: промышленного робота, гибкого производственного модуля, системы управления, транспортно-складского оборудования.

На основе структуры промышленного робота выполнено моделирование исполнительного механизма, систем очувствления и управления. Для гибких автоматизированных производств представлена структура вычислительных систем. Анализируется функционально-целевая структура автоматизированного участка, составляется производственно-технологический граф. Определяются технико-экономические показатели производственного участка и оценивается незавершенность производства. Многофункциональная система моделирования развивающегося производства разработана с учетом методологии построения имитационной модели. Учтены статистические аспекты имитационного моделирования и модификации подходов.

Надежность технологического оборудования исследуется при аналитико-имитационном моделировании. Представлены показатели надежности оборудования и выполнена формализация технологического процесса развивающегося автоматизированного производства.

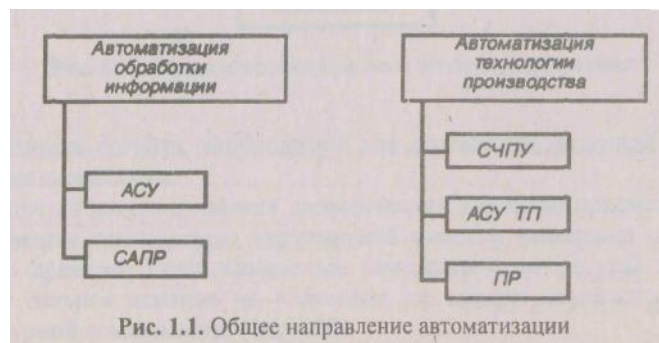
Приведены нетрадиционные алгоритмы численного решения задач моделирования и методы многоуровневой адаптивной системы управления автоматизированных предприятий. Рассмотрены примеры практической реализации.

1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1. СИСТЕМНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ, ОБЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ

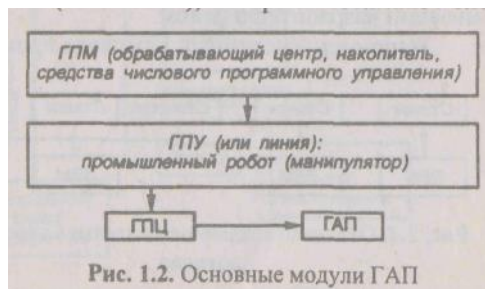
Причина возникновения гибких автоматизированных производств (ГАП). С уменьшением назначенного цикла изделий, в результате быстрого научно-технического прогресса и с увеличением номенклатурного состава изготавливаемой продукции, возникла необходимость в создании таких производств, которые обеспечивают изготовление деталей небольшими партиями при сохранении производительности, качества и себестоимости, присущих крупносерийному производству. С этой целью автоматизированы вспомогательные операции, обеспечено автоматическое функционирование оборудования в вечерние и ночные смены, резко сокращено время переналадок, переоснащения, смены инструмента, автоматизировано управление

материальными и информационными потоками (рис. 1.1).



Основные модули ГАП — это гибкий производственный модуль (ГПМ), участок (ГПУ), цех (ГПЦ) (рис. 1.2). Области эффективного применения разных видов автоматизации производства показаны на номограмме (рис. 1.3). В ГАПе большое значение имеют новые архитектуры ВС и распределенно-сетевые методы обработки информации. Основные этапы развития ГАП состоят в следующем: создание комплекса САПР и АСУ, затем ЧПУ и ПР, далее САПР и АСУ ТП (CAD/CAM), которые составляют элементы ГАПа; в технологии — СЧПУ, ПР, СЧПУ от ЭВМ, транспортные робокары и склады-автоматы со штабелерами от ЭВМ, объединение в целостные функционирующие системы разрозненное и отдельно созданное автоматическое оборудование:

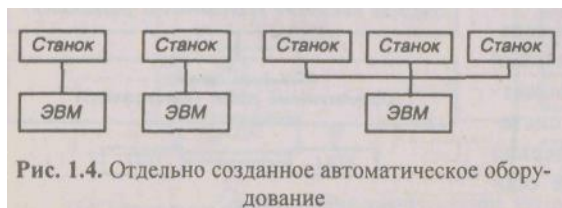
- интеграция станка и ЭВМ (рис. 1.4);
- интеграция САПР и АСУ ТП (CAD/CAM).



Традиционно пошаговый путь развития ГАП — постепенное наращивание функции автоматизации производства при разработке элементной технологии, которая включает:

- технологическое оборудование с ЧПУ;
- обеспечение инструментом и системой загрузки-разгрузки;

- контроль и диагностику технологических процессов обработки;
- складирование и транспортировку заготовок и готовых изделий;
- оперативную разработку расписания работы оборудования.



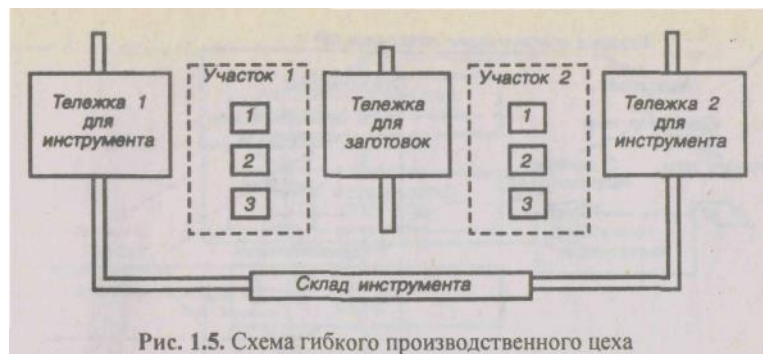
При расширении системы путем объединения ее с другими элементными технологиями ГАП возникает трудность стыковки средств обработки материальных потоков и отсутствия унификации интерфейсов для аппаратуры и потоков информации. Системное создание ГАП основывается на параллельно-интерактивном пути развития:

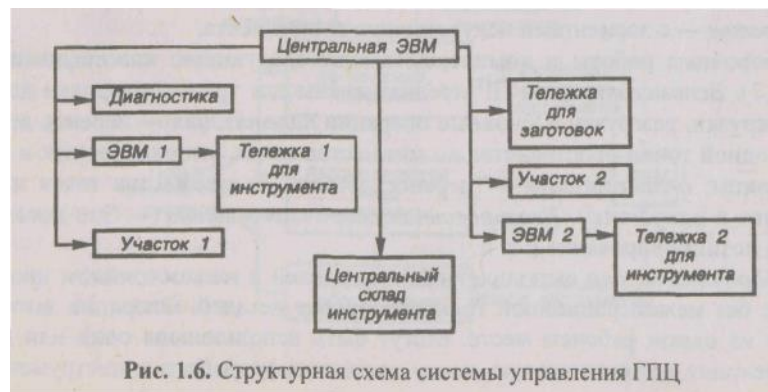
- общесистемные исследования и разработки;
- исследования и разработки элементных гибких технологий.

Оба направления корректируются в интерактивном режиме для оптимизации разработки в целом.

Например, системный комплекс производств ЦУКУБА (Япония) — нацелен на выпуск продукции малыми партиями станков, полиграфических машин, строительных машин и т. д. (стоимость 35 миллионов долларов) — за 7 лет лет срока окупаемости (4 года общесистемные исследования и исследования элементных технологий, строительство 2 года). В проекте комплексно решена задача создания фрагмента сквозного цикла «планирование-управление материальными потоками — механическая обработка».

Цель ГАП перекрыть широкий диапазон производственных возможностей — от опытного производства индивидуальных изделий для мелкосерийного и серийного производства. Эта цель требует взаимосвязанного рассмотрения не только процессов проектирования, конструирования, технологической подготовки и изготовления, но и процессов долгосрочного планирования производства, развития НИР и ОКР, управления хозяйственной деятельностью и инженерно-технической подготовкой (инженеринг). Схема гибкого производственного цеха (рис. 1.5) включает в себя склад инструмента, ГПЦ (рис. 1.6) и различные тележки.





Каждый участок имеет свою транспортную систему снабжения инструментом, управляемую ЭВМ1 и ЭВМ2. Центральная ЭВМ управляет общей системой транспортировки заготовок, а также работой участков, системами диагностики, координирует работу подсистем. Центральная ЭВМ осуществляет проверку заказ-нарядов, контроль заготовок, регистрирует эксплуатационные данные. В системе предусмотрен свободный выбор очередности заказов оператором, задаваемый с мест измерения. В гибких производственных модулях (ГПМ) предусмотрены устройства управления отдельными агрегатами (координатно-цифровое оборудование, автоматическая смена обрабатываемой детали, автоматическая смена инструмента, контроль степени износа и поломок инструмента, диагностика), а также периферийное оборудование для обмена данными. На следующем, более высоком уровне, центральная ЭВМ осуществляет управление и координацию всех функций ГПМ и диалог с оператором. Различают следующие поколения роботов:

первое — автоматическое управление по жесткой программе, с собственной памятью;

второе — с сенсорными датчиками (телекамера, тактильные датчики и т. п.);

третье — с элементами искусственного интеллекта.

Сборочные роботы и комплексы имеют следующую классификацию (рис. 1.7). *Вспомогательные* ПР предназначены для транспортировки деталей, погрузки, разгрузки. Основные операции *палетизация* — перенос деталей из одной точки пространства во множество точек, упорядоченных в виде матрицы; *депалетизация* — перенос деталей из множества точек пространства в одну точку. *Изолированная сборочная машина* — Это посадка детали, позиционирование и т. п.

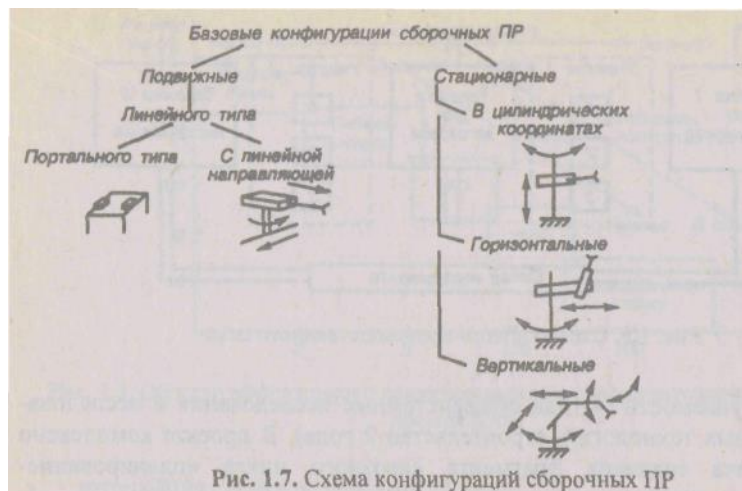


Рис. 1.7. Схема конфигураций сборочных ПР

Сборочный центр выполняет сборку деталей в мелкосерийном производстве без межоперационной транспортировки деталей. Операции выполняются на одном рабочем месте. Могут быть использованы один или два ПР, имеющих автоматическую смену захватных устройств и инструмента.

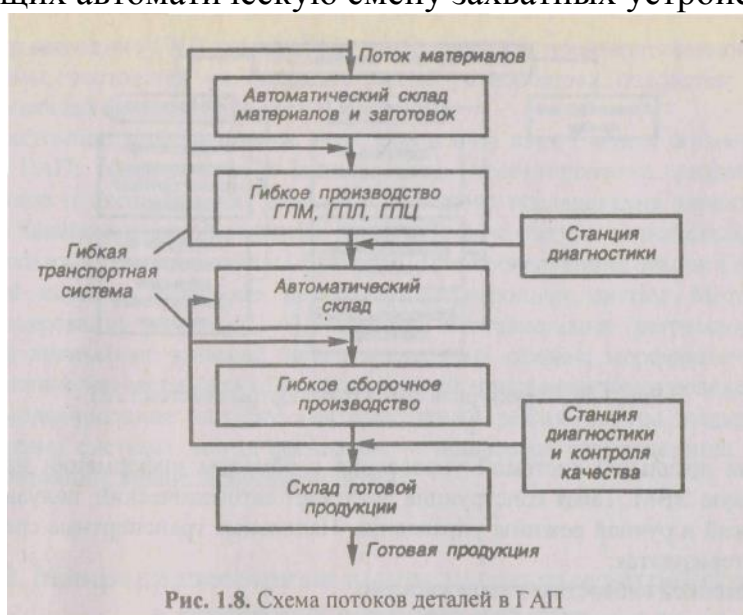
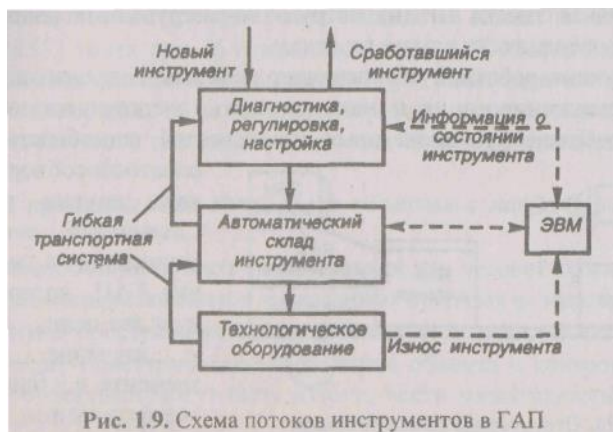
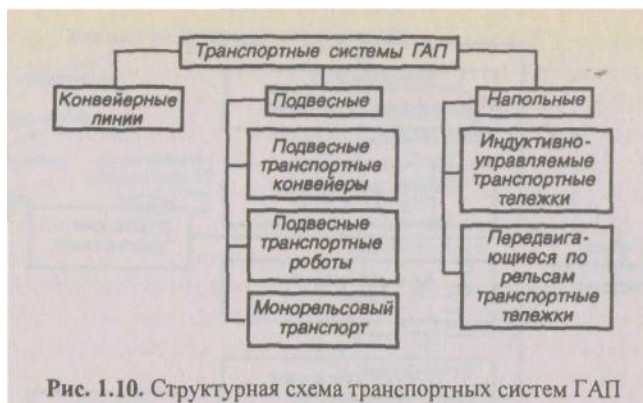


Рис. 1.8. Схема потоков деталей в ГАП

Гибкие сборочные линии с ПР автоматизируют сборку в среднесерийном производстве со значительным числом модификации изделий (для сборки печатных плат, сервомоторов, вентиляторов, печатающих устройств).

Автоматизация транспортных операций представляет собой автоматизацию потоков деталей (рис. 1.8) и автоматизацию потоков инструментов (рис. 1.9). Транспортные системы ГАП (рис. 1.10) включают в себя конвейерные линии, подвесной и напольный транспорт. Напольные, транспортные системы ГАП (рис. 1.11) — это самодвижущаяся тележка (робокар), снаб-





женная локальной системой управления с обменом информации на центральную ЭВМ. Такая конструкция допускает автоматический, полуавтоматический и ручной режимы управления. Напольные транспортные средства характеризуются:

- высокой гибкостью и надежностью;
- большой грузоподъемностью;
- высокой точностью позиционирования;
- развитостью и вариантностью траекторий движения.

Для безаварийной работы в тележках предусмотрены локационные и индукционные датчики, предупреждающие случайные наезды или столкновения. Функции робокара:

- перемещение деталей и инструмента;
- обслуживание технологического оборудования по установке и снятию деталей и инструмента (тогда как применение отдельно ПР совместно с ЧПУ неэкономично);
- оперативная замена ПР (на погрузочно-разгрузочных работах и сборочных операциях) в случае их отказа.

Конструкция робокара обеспечивает гибкость и производительность, точность позиционирования и маневренность, энергетическую независимость, разнообразие функциональных возможностей, способность сохранять

работоспособность при отказе других робокаров. Системный анализ ГАП начинается с моделирования ГАП, которое преследует две цели: • изучение



ГАП как элемента в общей системе хозяйствования;

- исследование ГАП как сложной технической и производственной системы, состоящей из большого числа разнородных подсистем и не имеющей формального описания.

Системное моделирование ГАП ведется на всех стадиях жизненного цикла ГАП: предпроектные исследования, проектирование, разработка, внедрение и эксплуатация. Для предпроектного исследования характерны задачи закономерностей развития производства с учетом социальных, экономических и технологических факторов. Для последующих этапов ГАП — задачей является системная интеграция разнородных систем. Методами прогнозирования развития ГАП являются экстраполяция (регрессионный анализ, логические кривые), метод экспертных оценок, морфологическое расчленение на части (каждой составляющей присваивается определенный вес), моделирование на ЭВМ (интерактивный режим работы экспертов), экспертные системы, метод сценариев — пошаговое развертывание будущих состояний, анализ «деревьев» целей.

1.2. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА В СЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ РОБОТОВ

Задачи видеоанализа в робототехнике разделяются на двумерные (плоские) и трехмерные (объемные), одно- и многопредметные, статические и динамические. При многопредметной задаче в отличие от однопредметной в поле зрения видеосенсора одновременно находится несколько объектов. Цель видеоанализа состоит в получении сжатого описания изображения. Это касается геометрических и качественных характеристик, взаимного расположения объектов. С точки зрения теории информации результатом видеоанализа является резкое сокращение объема данных. Например, изображение размерностью 256x256 точек занимает 8 Кбайт памяти, а размерностью 512x512 точек при 16 градациях — уже 128 Кбайт. Если на входе системы видеоанализа объем информации характеризуется величинами рассматриваемого порядка, то на выходе, например, при распознавании объекта, присутствует всего несколько чисел или слов, указывающих на распознанный тип.

Анализ произвольного единичного объекта в кадре. Целью анализа является:

- распознавание типа объекта независимо от его угловой ориентации, пространственного расположения и в заданных пределах от масштабирования;

- определение пространственных и угловых координат объекта;

- определение геометрических параметров объекта и контроль качества.

Таковыми объектами могут быть детали, части манипулятора интегральные схемы (ИС) и т. д.

Анализ нескольких объектов, находящихся в кадре одновременно.

Цели анализа в данной группе задач те же, что и в предыдущей. Вместе с тем дополнительно требуется установить место расположения каждого отдельного объекта и определить взаимосвязь изображенных объектов. Пусть требуется взять с подающего устройства или со склада строго определенную деталь. В поле зрения видеосенсора находятся также части подающего устройства и другого производственного оборудования, которое необходимо отличать от требуемой детали. К этой группе задач относится разбор бункера и распознавание печатных текстов. Обширную подгруппу задач составляют *задачи контроля*. К ним относится визуальный контроль изделия, состоящего из нескольких компонент. Когда устанавливается положение одних компонент изделия по отношению к другим, тогда выполняется визуальное определение качества печатных плат и интегральных микросхем. Электрическое тестирование не позволяет локализовать большое число дефектов, поэтому его дополняет визуальный контроль. При производстве ИС визуальный контроль используется как в процессе нанесения проводников, так и перед окончательной заделкой кристалла в корпус. При этом требуется отличать металлизированные точки от фоновых, выделять из целостного изображения схемы контактные площадки, определять их координаты, степень отклонения формы от заданной и т. д. Кристалл исследуется на загрязнение, трещины, относительно большие области металлизации, дефекты формы в целом и отдельных контактных площадок, а также на значительное отклонение цветовых уровней.

Анализ схематических изображений. Робото-технические системы, системы автоматизированного проектирования являются компонентами ГАП, поэтому требуется также анализ изображений при вводе чертежей, схем, выполненных от руки, типографским способом или световым пером на дисплее. В этой группе задач распознавание прямых и искривленных линий, условных обозначений электрических элементов и т. д. является необходимым этапом. При вводе чертежей, выполненных типографским способом, механическое пересняtie изображений в память без распознавания предъявляет чрезмерные требования к объему памяти ЭВМ. Чертежи вводятся для последующего анализа, т. е. для проверки правильности схемы в соответствии с заданным эталоном, что требует логического кодирования схемы.

Трехмерное зрение. Это обычно информация относительно дальности. Она необходима по следующим причинам: печатные платы и ИС имеют важные вертикальные компоненты; манипулирование в рабочем пространстве в основном трехмерно (разбор бункера, где требуется определить его глубину); возникает необходимость идентификации одних и тех же предметов в различных ракурсах, чтобы выделить отдельные предметы в рабочем пространстве и восстановить пространственную форму объектов, соотнесения координатной системы видеодатчика с координатной системой робота.

Для повышения точности манипуляторов требуется увеличение их механической сложности, что связано с увеличением массы и габаритов. Более легкие и дешевые ПР при достижении заданной точности позиционирования можно получить с помощью обратной видеосвязи. Такая видеосвязь позволяет корректировать движение захватного устройства по траектории, оперативно вырабатывая команды коррекции, что обеспечивает необходимую точность без использования различных механизмов (прецизионных).

1.2.1. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВИДЕОАНАЛИЗА

Алгоритмы видеоанализа с точки зрения *организации вычислительных процессов* подразделяют на локальные и нелокальные арифметико-логические преобразования, с точки зрения *функциональных этапов* — на обучение и распознавание.

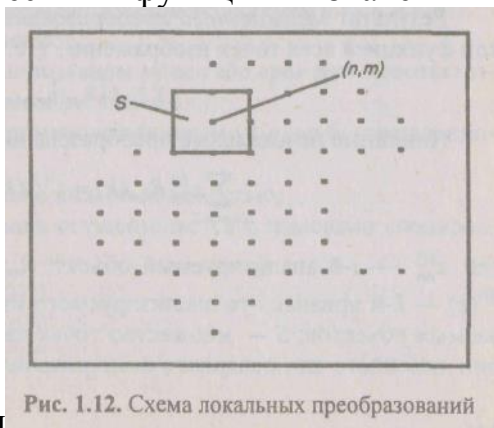
С точки зрения *соотношения между объемами входной и выходной информации* арифметико-логические преобразования подразделяют на функции предварительной обработки изображений и построения описаний. При предварительной обработке объем выходной информации равен объему входной (матрица изображения преобразуется в выходную матрицу). Задачами предварительной обработки являются: подавление помех, сглаживание, оконтуривание, разделение слипшихся объектов, выделение срединных линий объектов.

При построении описаний объем выходной информации значительно меньше объема информации на входе. Основные задачи при построении описаний — выделение интегральных признаков (статических, спектральных и др.) и структурно-синтаксических образов (топологических, грамматических).

Рассмотрим локальные и нелокальные преобразования, так как они определяют аппаратную и программную реализацию вычислительных устройств, осуществляющих сенсорные функции.

При *локальных преобразованиях* (рис. 1.12) вычисляемые параметры, т. е. новое значение точки $\bar{x}_{nm}$ в преобразуемой

входной матрице изображения и размерность изображения $[x_{nm}]$; $n, m = \overline{1, N}$ ($N \times N$ — размерность изображения), являются арифметико-логическими функциями значений точек в некоторой локальной окрестности S



ТОЧКИ

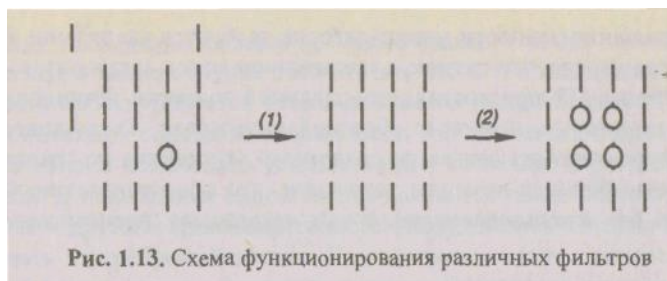


Рис. 1.13. Схема функционирования различных фильтров

с координатами (и, /и): $\bar{x}_{nm} = f[x_{ij}]_{i,j \in S}$.

В качестве примеров локальных арифметико-логических операций приведем соотношения, определяющие: сглаживающий фильтр:

$$\bar{x}_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{при } \sum_{i,j \in R} x_{n+i, m+j} \geq 2; \\ 0 & \end{cases}$$

и оконтуривающий

$$\bar{x}_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{при } \sum_{i,j \in R} x_{n+i, m+j} < 4; \\ 0, & \end{cases}$$

$$R = \begin{pmatrix} & (-1, 0) & \\ (0, -1) & (0, 0) & (0, 1) \\ & (1, 0) & \end{pmatrix}.$$

Их работа иллюстрируется рис. 1.13.

Результат *нелокального преобразования* является арифметико-логической функцией всех точек изображения, т. е.:

$$y = f[x_{nm}]_{(n,m) \in N \times N}.$$

Линейные нелокальные преобразования описываются выражением

$$\sum_{(n,m) \in S} x_{nm}^{(i)} R_{nm}(k) = f^{(i)}(k), \quad i = \overline{1, I},$$

где $x_{nm}^{(i)}$ — i -й анализируемый объект; $R_{nm}(k)$ — распознающий оператор; $f^{(i)}(k)$ — k -й признак i -го анализируемого изображения; I — число распознаваемых объектов; S — множество точек изображения, входящих в траектории линейного или полярного сканирования; k — номер признака.

Если множество 5 образовано траекториями линейного сканирования, то в общем случае признаки $f^{(1)}$ не инвариантны к сдвигам, вращению и масштабированию. Один из способов получения инвариантного описания состоит в организации полярного сканирования (см. рис. 1.14).

Рассмотрим пример возможного подхода к построе-



нию инвариантного описания, состоящего из двух операций: вычисление центра тяжести (ЦТ) объекта Q в кадре и выполнение одномерных преобразований Фурье по семейству concentric окружностей с началом координат в центре тяжести,

$$A_{k,p} = \left| \sum_{\varphi=0}^{N-1} X \cdot n(\rho, \varphi), m(\rho, \varphi) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} k\varphi\right) \right|.$$

Обоснованность такого подхода определяется тем, что амплитудная характеристика преобразования Фурье не зависит от угловой ориентации и пространственного положения объекта, а также в определенной степени и от масштабирования. Используемое число concentric окружностей зависит от сложности внутренней структуры объекта, числа распознаваемых объектов и требуемой помехозащищенности. Информация, содержащаяся в фазовой характеристике преобразования, определяет угловую ориентацию. Координаты центра тяжести характеризуют положение объекта на плоскости.

Общие требования, предъявляемые к сенсорным системам в РТК и ГАП:
построение на модульной основе;

распознавание должно быть в реальном масштабе времени в соответствии с производственным ритмом (не более 1 с);

распознавание должно быть помехоустойчивым (т. е. не более заданного процента искажений);

надежность должна сочетаться с низкой стоимостью;

реализация динамических задач осуществляется с помощью специальных аппаратных средств.

1.2.2. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА БАЗЕ МИКРОЭВМ

Выбор вычислительного устройства зависит от многих факторов, из которых отметим следующие. Тип архитектуры определяется быстродействием, гибкостью и экономичностью машинного времени. ЭВМ, работающая с видеoinформацией, должна обладать большой памятью и высокоскоростным механизмом пересылки видеоданных. Для увеличения быстродействия полезно выделить класс типовых, наиболее часто используемых алгоритмов, которые целесообразно реализовать аппаратно. При этом гибкость достигается за счет возможности комбинирования выделенного набора основных алгоритмов. Последовательность функционирования этих алгоритмов должна определяться аппаратным способом.

По реализации видеосенсорных задач в наибольшей степени отвечают специализированные вычислительные системы (СВС) или возможно использование универсальных ЭВМ.

Использование универсальных ЭВМ предполагает наличие некоторого дополнительного аппаратного обеспечения, которое включает, как правило, платы визуализации (видеоввод и видеовывод), платы аппаратурной реализации некоторых основных функций по обработке изображений,

Рассмотрим в качестве примера одну из основных вычислительных операций, выполняемых при предварительной обработке изображений. Эта операция является некоторой локальной арифметической функцией, в результате которой выходное изображение имеет вид:

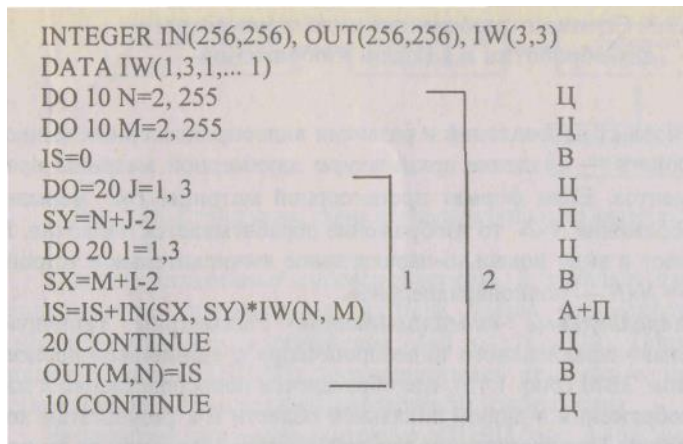
$$\bar{J}(n, m) = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W \omega_{ij} J\left(n+i-\frac{W+1}{2}, m+j-\frac{W+1}{2}\right), \\ n, m = \overline{1, N} \quad (W \text{ — нечетно}),$$

где $J(n, m)$ — входное изображение; $\omega_{ij}; i, j = \overline{1, W}$ — весовое окно.

В процессе линейного сканирования окно ω_{ij} размерностью $W \times W$ построчно пробегает все изображение размерностью $N \times N$. В каждой точке изображения (i, m) вычисляется сумма произведений значений (яркости) точек изображения на весовые коэффициенты заданной матрицы окна.

Рассматриваемая локальная арифметическая фильтрация (локальная свертка) в зависимости от выбора окна реализует те или иные функции предварительной обработки (сглаживание, оконтуривание и т. д.). Локальный фильтр рассматриваемого типа при программировании на универсальной ЭВМ содержит три различные управляющие операции: управление циклами (Ц), пересылка данных (П), арифметические вычисления (В).

Приведем программную реализацию локальных операций:



При управлении циклами осуществляется контроль за линейным сканированием окна по всему изображению и по площади окна при его фиксированном положении. Управление рассматриваемыми циклами сканирования целесообразно реализовать аппаратно. Пересылка данных включает в себя обращение к введенному аппаратно в память изображению, весовой матрице и запись данных в область памяти, где расположено обработанное изображение.

Аппаратные модули ввода-вывода видеоинформации. Известны способы построения устройств ввода-вывода:

- предварительная буферизация;
- прямой доступ в память;
- использование двухпортовой памяти.

При *предварительной буферизации* изображение вводится в автономную память, которая соединяется с вычислительным устройством через стандартный интерфейс. Это позволяет снабжать видеовводом ЭВМ, не располагающую системной шиной. Однако такой способ снижает скорость видеоввода и приводит к дублированию аппаратуры.

При *прямом доступе в память* осуществляется захват внутренней шины и реализуется высокоскоростной обмен данными с памятью ЭВМ, минуя центральный процессор. Способ прямого доступа в память позволяет реализовать эффективные и простые контроллеры ввода-вывода изображений в реальном масштабе времени. Однако при этом способе во время ввода изображения производительность процессора снижается.

При *использовании двухпортовой памяти* производительность процессора не снижается, кроме того, обеспечивается требуемая пропускная способность памяти при изменении формата обращения.

1.2.3. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВИДЕОПРОЦЕССОРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ -

Одно из основных направлений в развитии видеопроцессорных вычислительных устройств — создание архитектуры двухмерной матрицы процессорных элементов. Если формат процессорной матрицы $P \times P$ меньше чем формат изображения $N \times N$, то изображение обрабатывается поблочно. В этом случае имеют в виду локально-параллельное вычислительное устройство, а при $P \times P = N \times N$ — полнопараллельное.

Локально-параллельные видеопроцессоры. Рассмотрим типичную структуру локально-параллельного видеопроцессора с единичным процессорным элементом ЭВМ (рис. 1.15), где обращаются непосредственно к набору данных изображений в любой локальной области и к результатам локальных вычислений. При вычислении каждой основной функции со скоростью 1 мкс на точку время обработки изображений 512×512 составляет 1,1 с. Это вычислительное устройство имеет: двухкадровую память изображения ($N \times N$ — размерность изображения), допускающую различные режимы обращения; память, содержащую два локальных окна ($W \times W$ — размерность окна).

Например, $N = 128$, $W = 5$. Последняя память используется в качестве высокоскоростной буферной памяти между памятью изображения и арифметико-логическим устройством. Память локальных окон допускает различные режимы адресации: линейное и полярное сканирование по заданной траектории. При наличии динамически перестраиваемой системы микропрограммирования, позволяющей комбинировать основные операции, возможно выполнение широкого круга задач по предварительной обработке изображений, таких, как вычисление поля градиентов, фильтрация, сжатие, оконтуривание, выделение топологически признаков и т. д.

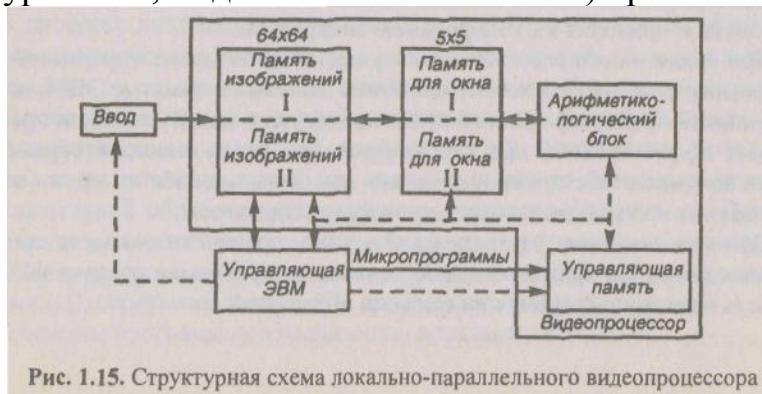


Рис. 1.15. Структурная схема локально-параллельного видеопроцессора



Рис. 1.16. Структурная схема полнопараллельного видеопроцессора

Полнопараллельные видеопроцессоры. В локально-параллельном видеопроцессоре процессорная матрица имела размерность значительно меньше размерности изображения (4×4 « 512×512). Полнопараллельные видеопроцессоры (ППВП) характеризуются тем, что в них размерность процессорной матрицы равна размерности изображения.

Рассмотрим типовую архитектуру ППВП (рис. 1.16), имеющую процессорную матрицу, содержащую 128×128 процессорных элементов. Последовательный контроллер — это быстродействующая последовательная ЭВМ, выполняющая арифметические и логические функции. Основная задача этой ЭВМ — хранение и чередование программ. Последовательный контроллер связан с процессорной матрицей через набор регистров обмена, которые предназначены для пересылки команд, параметров и констант в процессорную матрицу и возвращения их в последовательный контроллер. Последовательный контроллер обеспечивает связь с периферией и другими внешними ЭВМ. Процессорная матрица содержит 16384 микропроцессора, реализованных на основе технологии БИС и образующих решетку размерностью 128×128 . Последовательный контроллер передает команду к процессорной матрице, которая выполняется одновременно всеми микропроцессорами. Каждый микропроцессор работает с данными, содержащимися в собственной области памяти.

Процессорная матрица и буферная память соединяются высокоскоростной шиной ввода-вывода. Буферная память выполняет функции буфера данных между процессорной матрицей и внешней средой. Она получает данные от обычной и специализированной периферии. Снабжение буферной памяти внутренним контроллером для изменения формата данных позволяет процессорной матрице обрабатывать данные более эффективно. Буферная память получает по заданному адресу набор из 16384 элементов данных и передает его в процессорную матрицу. При этом память каждого микропроцессора получает только один элемент.

Конфигурация набора данных, получаемых процессорной матрицей, определяется программно. Например, если K является адресом набора, то данные поступают из следующих ячеек буферной памяти:

$k,$	$k+n,$	$k+2n,$	$\dots,$	$k+127n$
$k+m$	$k+n+m,$	$k+2n+m,$	$\dots,$	$k+127n+m$
$\dots,$	$\dots,$	$\dots,$	$\dots,$	$\dots,$
$k+127m,$	$k+n+127m,$	$k+2n+127m,$	$\dots,$	$k+127n+127m$

Параметры (i , m) и k задаются программно. Обращение к набору данных буферной памяти, содержащему 128×128 элементов с началом в точке (x, y) изображения размерностью 512×512 , иллюстрируется рис. 1.17. Системы команд ППВП делят на три группы: последовательные, параллельные и команды обмена.

Последовательные команды аналогичны командам любой последовательной ЭВМ — это команды загрузки, хранения, арифметических действий, логических операций, прерываний и т. д. Они выполняются только по последовательным контроллером и используются для управления ходом программы и вычисления отдельных параметров и констант, которые передаются процессорной матрице.

Параллельные команды также состоят из команд загрузки, хранения, арифметических и логических операций, т. е. аналогичны последовательным командам, за исключением команды прерывания. Параллельные команды, как и последовательные, хранятся в памяти последовательного контроллера, который, находя в процессе выполнения программы параллельную команду, передает ее через регистр обмена в процессорную матрицу, где эта команда реализуется одновременно всеми процессорами.

Таким образом, параллельная операция ППВП функционально эквивалентна последовательной операции, выполняемой 16384 раза в последовательном аппаратном контуре. Но так как в ППВП параллельная операция выполняется за один временной такт, то процессорная матрица обрабатывает данные в 16384 раза быстрее, чем последовательная ЭВМ с тем же временным циклом. Эта фундаментальная форма параллелизма обеспечивает огромную вычислительную мощность ЭВМ этого типа «одна команда — много данных» при решении специализированных задач. Такие ЭВМ не

могут обладать параллельным прерыванием. Это обусловлено тем, что каждый процессор в процессорной матрице работает с собственным набором данных, а поэтому каждый процессор снабжается собственным регистром состояний и либо выполняет, либо игнорирует полученную команду в зависимости от состояния его собственного условного кода. Рассматриваемое свой-

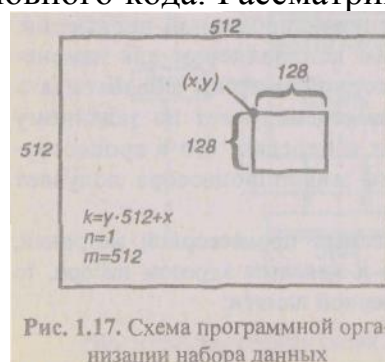
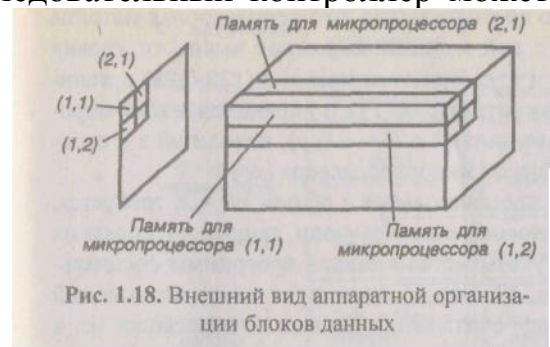


Рис. 1.17. Схема программной организации набора данных

ство «непрерываемое™» существенно упрощает программирование.

упрощает

3. *Набор команд обмена*, которые управляют движением данных между параллельными и последовательными частями, имеют набор большинство ЭВМ типа «одна команда — много данных», последовательный контроллер может



передавать константы и параметры каждому процессору в процессорной матрице с помощью специальных версий параллельных команд. Обратная пересылка осуществляется различными способами. Один из них состоит в том, что каждый процессор получает собственный идентификационный номер. Специальная команда выбирает для работы процессор с наименьшим идентификационным номером, позволяя ему сообщаться с последовательным контроллером. Эту команду объединяют с логическими операциями.

В результате обслуживаются только процессоры, удовлетворяющие заданным логическим условиям. Так как подмножество процессоров задается набором команд, то выбранные процессоры образуют произвольную последовательность несмежных элементов.

Рассмотрим два примера реализации алгоритмов обработки и анализа изображений с помощью полнопараллельных видеопроцессоров.

Пример нелокального преобразования. При выполнении нелокальных преобразований

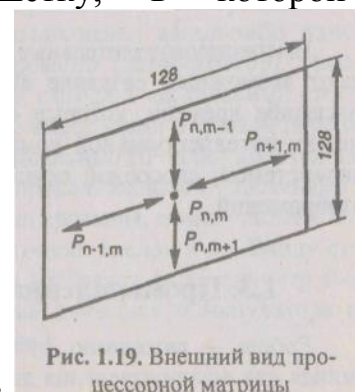
$$Y_{k,l} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N A_{n,m,k,l} x_{n,m}$$

данные вводятся в процессорную матрицу таким образом, что все расчеты преобразования, связанные с одной точкой (k, l) ,

т. е. $\{A_{n,m,k,l}\}; n, m = \overline{1, N}$ поступают в память соответствующего процессора (рис. 1.18).

При такой организации за один цикл из 16384 умножений-сложений вычисляется все линейное преобразование, т. е. 16384 отсчетов:

Для реализации локальных преобразований процессорные элементы в количестве 128×128 соединяются в решетку, в которой каждый



процессор $\{y_{k,l}\}; k, l = \overline{1, 128}$ взаимодействует с че-

тырмья соседними (рис. 1.19). То обстоятельство, что процессорная матрица двумерна, позволяет работать с ней в терминах языков высокого уровня таких, как PASCAL, FORTRAN и т. д. При этом массив $P(128 \times 128)$ организуется таким образом, чтобы элемент массива $P(x, y)$ хранился в микропроцессоре (x, y) . В результате отсчет, взятый в $P(x + 1, y)$, находится в микропроцессоре, расположенном справа от микропроцессора (x, y) .

Для реализации локального преобразования в общем случае требуется, чтобы все микропроцессоры одновременно получали данные от соседних процессоров. Этот параллелизм указывается в записи программы специальным символом $\#$ в виде $P(\# + n, \#)$. Это соответствует тому, что каждый микропроцессор получит команду считывания данных и пересылки их к микропроцессору, расположенному на расстоянии n шагов от него. Локальное вычисление может быть записано, например, в следующем виде:

$$A(\#, \#) = (P(\# - 1, \#) + P(\#, \#) + P(\# + 1, \#))/3.$$

Эта запись соответствует вычислению следующего математического выражения:

$$A(x, y) = 1/3 \sum_{i=x-1}^{x+1} P(i, y).$$

Пример типичной программы для вычисления локальной свертки:

```
E(#, #) = 0
FOR I = -1 TO 1 DO
  FOR J = -1 TO 1 DO
    E(#, #) = E(#, #) + W(I, J) * P(#+I, #+J)
  END
END
```

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокопроизводительные, полнопараллельные видеопроцессоры делают возможным создание визуальных систем, работающих в реальном масштабе времени, которые основаны на динамическом взаимодействии между интеллектуальной командной системой принимающей решения, и подсистемой, способной осуществлять анализ изменяющихся во времени изображений.

1.3. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Робот — автономно функционирующая машина-автомат, предназначенная для воспроизведения двигательных функций человека во время про-

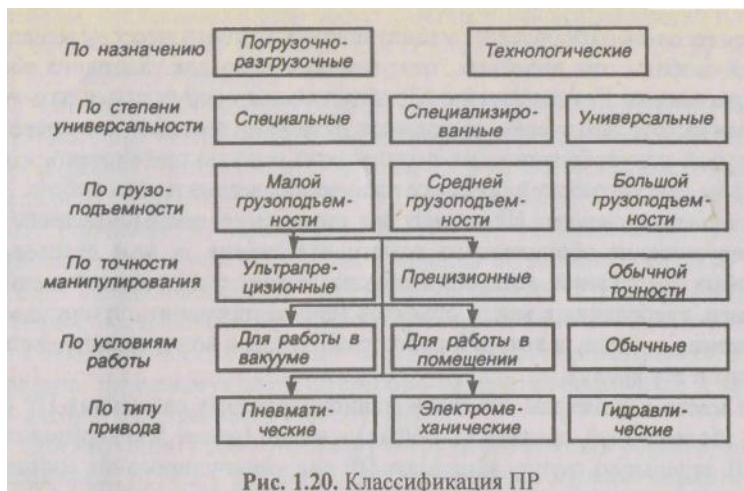


Рис. 1.20. Классификация МР

изводственных операций без его участия и наделенная для этого способностями человека (силой, памятью и т. д.), а также способностью к обучению для работы в комплексе с другим оборудованием и приспособлением к производственной среде.

Для выполнения своих функций МР имеет:

манипулятор с набором исполнительных механизмов (захват, сварочная головка, зонд и т. д.), позволяющий в автоматическом цикле выполнять требуемые функции;

систему управления, обеспечивающую выдачу команд на исполнительные механизмы манипуляторов в зависимости от положения рабочих органов и от состояния внешней среды (ориентация детали, ее размер, масса, температура и т. п.).

Классификация МР представлена на рис. 1.20. По степени универсальности МР делятся на специальные, специализированные и универсальные.

Специальные МР предназначены для выполнения какой-либо одной операции, обслуживания одного типа оборудования (автооператор). Манипулятор таких роботов прост по конструкции, обладает несколькими степенями подвижности, система управления (СУ) имеет узкий диапазон переналадок и работает по жесткой программе. Специальные МР используются для загрузки, перемещения и манипуляций полупроводниковыми пластинами в эллионных установках: установках полного легирования, ионноплазменного и плазмохимического травления, нанесения тонких пленок и др. Ввиду стабильности формы объекта манипулирования (меняется лишь диаметр пластины в пределах 60—450 мкс) и траекторий движения манипулятора не требуется корректировки системой управления.

Универсальный ПР обладает манипулятором, который имеет не менее семи степеней свободы: три линейных, три угловых и одно для удержания объекта манипулирования. Универсальные ПР обслуживают оборудование различного технологического назначения, выполняют различные операции с широкой номенклатурой полуфабрикатов, их легко можно перепрограммировать и переключить на другую работу в пределах технических возможностей робота.

Специализированные ПР служат для выполнения операций одного вида или обслуживания оборудования одного назначения. К ним предъявляют ряд особых требований, которые и обуславливают специализацию роботов (например, требования к массе объектов манипулирования, точности манипулирования, к среде, в которой робот работает, и к возмущениям, которые он вносит в эту среду).

По массе и размерам объектов манипулирования различают ПР большой — (более 60 кг), средней (5—60 кг) и малой (менее 5 кг) грузоподъемности. В отдельную группу выделяют ПР для манипулирования миниатюрными изделиями с массой менее килограмма (40%). По *требованию к точности* манипулирования различают роботы нормальной точности с погрешностью позиционирования в зависимости от грузоподъемности 0,1—5 мм, прецизионные роботы с погрешностью 5 мкм и ультрапрецизионные роботы с погрешностью до 0,03 мкм.

Роботы *нормальной точности* применяют для манипулирования транспортными или технологическими кассетами, перекладки полупроводниковых пластин из кассеты в кассету, на химических операциях. *Прецизионные роботы* манипулируют пластинами или кристаллами на операциях посадки кристалла, разводки выводов, герметизации корпусов, а также интегральными схемами на операциях контроля и разбраковки. *Ультрапрецизионные роботы* с погрешностью 0,03—1 мкм манипулируют пластинами на операции литографии.

По *требованиям к окружающей среде* различают роботы, которые могут работать в масляном и безмасляном вакууме, существенно не изменяя его параметров, *чистые роботы*, которые не ухудшают атмосферу чистых комнат соответствующих классов, и *обычные роботы*, к которым не предъявляют никаких специфических требований по герметичности, газо- и пылевыведениям.

Для работы в чистых комнатах разрабатывается поколение роботов, цель применения которых — устранить контакт человека с обрабатываемыми изделиями. Именно человек является основным источником загрязнений поверхности полупроводниковых структур. Для таких роботов необходим специальный привод с минимальным числом пар внешнего трения, минимальным выделением продуктов износа, паров масел, отсутствием зон, способствующих накоплению пыли, препятствующих общему ламинарному потоку воздуха в помещении. Так, робот ALPNA одет в одежду из специальной ткани, что сделало его пригодным для работы в помещениях первой категории. Робот PUMA фирмы Vnimation оснащен встроенным в руку вен-

тилятором, создающим в зоне захвата ламинарный всасывающий поток воздуха, способствующий дополнительной локальной очистке воздушной среды в зоне манипулирования.

Роботы первого поколения работают по жесткой программе. Эти роботы не способны воспринимать внешнюю информацию об ориентации детали, ее размерах, массе, усилиях зажима. Они не способны адаптироваться к изменяющейся внешней среде. Такие роботы используются на простых операциях (транспортно-перегрузочные, окраска, гальванопокрытие, сушка). Управление этими роботами осуществляется от механических или пневматических командоаппаратов, специализированных и универсальных контроллеров, построенных на микропроцессорной основе. Программирование цикла технологических операций осуществляется перенастройкой командоаппаратов, перекоммутацией штекерной панели, составлением и записью в ОЗУ алгоритма управления или обучением.

При обучении робот управляется вручную, система управления следит и запоминает порядок движений рабочих органов и таким образом формирует в ОЗУ алгоритм управления.

Роботы второго поколения (адаптивные) работают по гибкой программе, их реакция определяется не только состоянием робота, но и состоянием внешней среды, для чего они снабжены датчиками внешней информации: искусственным зрением, слухом, осязанием и другими устройствами, позволяющими выделять необходимую информацию об ориентации детали, ее размерах и других свойствах. Система управления такими роботами строится на базе микроЭВМ, для перепрограммирования в ней используются специальные диалоговые языки, близкие к естественному и не требующие от пользователя никакой подготовки по программированию. Иногда программирование осуществляется обучением. Некоторые операции при производстве интегральных схем (фотолитография, посадка кристаллов, сварка выводов) невозможно провести, если при управлении технологическими процессами не учитывать состояние внешней по отношению к оборудованию информации о параметрах полуфабрикатов и внешней среды: размерных погрешностях, температуре влажности и т. п. Управление такими операциями должно быть адаптивным и выполняться адаптивными ПР.

Роботы третьего поколения или интеллектуальные только разрабатываются и не вышли из стен лабораторий. Особенностью этих ПР является высокая приспособляемость к внешним условиям. Они могут выбирать нужные детали из навала, ориентировать их для выполнения последующих операций, оптимизировать результаты своей работы, самообучаться. Столь высокая адаптация приведет к повышенной автономности робота. При своей работе он будет требовать минимальное число команд от системы управления высшего уровня.

Система искусственного интеллекта обеспечит минимальную трудоемкость программирования робота, ему будет сообщаться лишь цель его работы, что нужно сделать и какие обеспечить параметры. А как это сделать, т. е. како-

вы должны быть последовательность и параметры каждой из операций, робот решит сам.

При этом он постоянно будет самообучаться, т. е. совершенствовать алгоритм своего управления так, чтобы активизировать результат работы. Интеллектуальные ПР — универсальны, их работа в составе ГАП (РТК) автоматически обеспечит гибкость технологических систем, так как робот сам сможет подбирать оптимальные технологические процессы. В этом роботу будет помогать централизованная система управления комплексом.

Основная тенденция развития роботостроения — стремление к универсальности, автономности и адаптации к внешней среде.

1.3.1. МАНИПУЛЯТОРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

К манипуляторам ПР, используемых в ГАП, и их захватам предъявляется ряд требований, определяемых необходимой точностью позиционирования, средой, в которой должен работать робот, и другими параметрами (температурой, давлением, траекторией и скоростями перемещения). Исходя из требований, определяется тип привода и его конструктивное исполнение. С учетом малой грузоподъемности применяют пневматический и электромеханический приводы. Пневмопривод — для манипуляторов, работающих при позиционном управлении и обрабатывающих небольшое число точек позиционирования, координаты которых определяются установленными упорами. Для позиционирования пневмопривода в нескольких точках последовательно подключают несколько пневмоцилиндров, использование двух пневмоцилиндров дает четыре точки позиционирования.

Схемы механизмов поворота рабочих органов с использованием пневмопривода приведены на рис. 1.21—1.24.

Реечный привод обеспечивает поворот на любой угол (больше чем 360°) и создает высокую плавность хода, поскольку использование двух пневмоцилиндров позволяет одному из них при повороте играть роль тормоза и выбирать зазор в зацеплении (рис. 1.21).

Кривошипный привод имеет высокую нагрузочную способность, но обеспечивает поворот на угол 120° . Он используется для поворота массивных элементов манипулятора при ограниченных углах поворота (рис. 1.22).

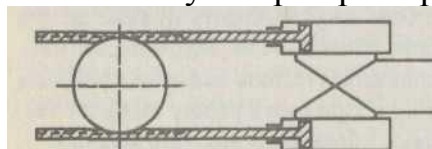


Рис. 1.21. Использование реечного пневмопривода

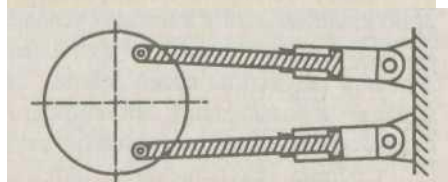


Рис. 1.22. Использование кривошипного пневмопривода



Рис. 1.23. Схема пластинчатого привода

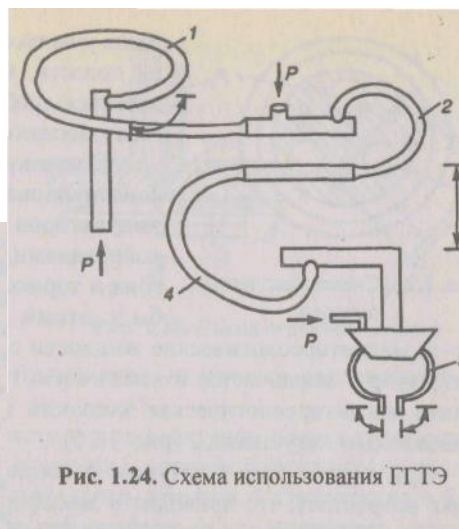


Рис. 1.24. Схема использования ГГТЭ

Пластинчатый привод компактен, но не обеспечивает достаточно больших моментов. Здесь поворот происходит за счет подачи давления в одну из полостей, образованных в цилиндрической расточке корпуса подвижной и неподвижной пластинами, уплотненными эластичными манжетами. ПР с таким приводом используется для ротации зажима (рис. 1.23).

Для работы в контролируемой среде или высоком вакууме используются манипуляторы, выполненные на основе *гибких герметичных трубчатых элементов* (ГГТЭ). Простейший ГГТЭ представляет собой трубку эллиптического сечения, согнутую в незамкнутое кольцо. При подаче давления в полость трубки она немного разгибается, при снятии давления вследствие упругости возвращается в прежнее положение. Используя набор таких од-нозвенных механизмов, можно скомпоновать манипулятор с необходимым числом степеней подвижности.

На рис. 1.24 изображен манипулятор на ГГТЭ с двумя степенями подвижности рабочего органа. При подаче давления в трубку / осуществляется поворот руки манипулятора в горизонтальной плоскости. Трубчатые элементы 2 и 4 формируют перемещение захвата 3 в вертикальной плоскости. Захват состоит из двух ГГТЭ, при подаче напора внутрь которых происходит разжим губок, сжимаются губки при снятии давления от действия сил упругости.

Для приводов сверхлегких манипуляторов, работающих в контролируемой среде, применяются эластичные звенья, деформация которых определяется подачей давления в их внутренние полости. Манипулятор такого типа содержит несколько трехкамерных участков, расположенных по длине звена. В каждом участке имеется три полости (канала). Направ несколько

таких участков и соединив необходимым образом их полости, можно, подав давления P_1 , P_2 , P_3 , добиться требуемых перемещений"* рабочего органа в достаточно широком диапазоне (рис. 1.25). Основной проблемой, возникающей при конструировании таких манипуляторов и манипуляторов на основе ГГТЭ, является борьба с колебаниями, возникающими на участках раз-



Рис. 1.25. Схема эластичных звеньев

гона и торможения рабочих органов. Для борьбы с этими колебаниями используются электро- и магнитореологические жидкости с управляемой вязкостью. Так, манипулятор / заключается в эластичную трубку 3, между стенками которой залита магнитореологическая жидкость 4, управляемая магнитным полем, создаваемым катушками 2 (рис. 1.26).

При подаче тока в катушки в конце перемещения вязкость жидкости резко возрастает, что приводит к демпфированию возникающих колебаний. В вакуумных манипуляторах также используются металлические сильфоны, герметичные волновые передачи и другие механизмы, осуществляющие передачу движения через упругодеформируемую стенку, применяются и вводы движения в вакуум.

Захватывающие приспособления, используемые в манипуляторах электронной техники, применяют для захвата пластин, кристаллов, корпусов ИС. При удержании пластин и кристаллов основным требованием является минимальное взаимодействие пластины (кристалла) и схвата. Поэтому используются вакуумные или струйные схваты.

Вакуумные схваты обеспечивают высокую жесткость удержания, но приводят к нагружению пластины атмосферным давлением и к некоторой ее деформации. Возможны повреждения поверхности со стороны зоны вакуумирования, поэтому часто недопустим зажим пластины вакуумным схватом с рабочей стороны (рис. 1.27).

Струйный схват является бесконтактным и применяется при манипулировании наиболее ответственными деталями при захвате со стороны рабочей поверхности (рис. 1.28). Канал 2, подводящий сжатый воздух, заканчива-

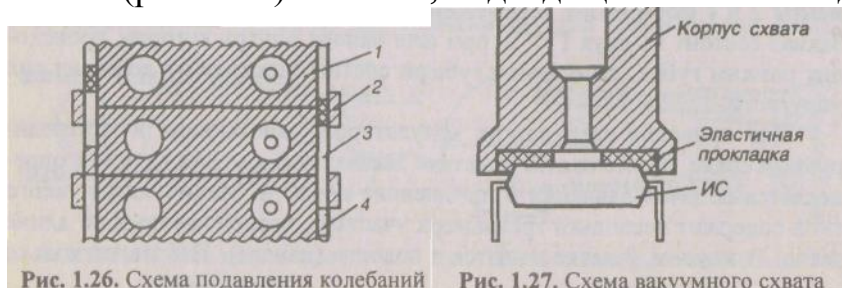
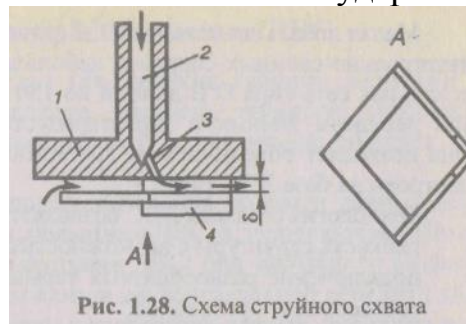


Рис. 1.26. Схема подавления колебаний

Рис. 1.27. Схема вакуумного схвата

ется наклонным соплом 5, которое формирует плоский поток в зазоре между торцом захвата / и пластиной в направлении окна, образованного двумя ограничительными стенками 4. Благодаря разряжению, возникающему в зазоре при истечении потока воздуха, пластина захватывается и удерживается на



некотором расстоянии от торца захвата, причем зазор устанавливается автоматически из условия равновесного положения изделия.

Произвольно захваченная пластина под действием потока перемещается в направлении ограничительных стенок и поворачивается так, что оказывается прижатой торцом к ограничительным стенкам 4. Ориентация и базирование детали в процессе захвата при отсутствии механического контакта повышает производительность, снижает брак от механических повреждений и позволяет отказаться от дополнительных ориентирующих устройств.

2. ЛОКАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ В ГАП

2.1. АРХИТЕКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГАП

Информационные связи в ГАП имеют древовидную структуру подобно АСНИ и АСУ ТП. Главной характерной особенностью таких систем является автоматизированное управление процессами в реальном масштабе времени, особенно на нижних уровнях управления.

Исследования показывают, что для верхних уровней ГАП с характерным объемом данных 10^6 — 10^{10} бит/с можно использовать ЛВС со скоростью 1—10 Мбит/с и длиной 1—5 км. Однако для нижних уровней ГАП характерны следующие параметры:

- большое число элементов управления, распределенных по группам;
- интенсивность обмена 10^2 — 10^3 бит/с;
- время выработки управляющего воздействия 10—1000 мс;
- размещение элементов управления групп оборудования на расстоянии 20—200 м.

Поэтому применение традиционной техники локальных сетей связи на нижних уровнях ГАП экономически не оправдано. На этих уровнях используют малые локальные сети связи типа 1^2C и D^2B фирмы «NV PHILIPS».

Малая локальная сеть типа 1^2C длиной до 10 м служит для объединения интегрально-схемных сборок в небольшие модульные микросхемы. Малая локальная сеть типа D^2B длиной до 150 м имеет более эффективный протокол передачи данных и характеризуется высокой помехоустойчивостью. Она позволяет объединить до 50 терминалов, причем каждый может быть построен на базе ЛВС типа 1^2C .

Технология создания ЛВС позволяет сформулировать требования к сети:

- гибкость структуры с возможностью наращивания;
- подключение разнообразных терминалов и соответствующие средства согласования протоколов;
- средства сопряжения с ЛВС и ИВС;
- надежность не хуже телефонной сети;
- небольшая стоимость.

Количественные значения характеристик ЛВС (скорость передач, надежность и др.) определяются областью ее применения и могут изменяться в широком диапазоне. Например, скорость передачи для диалогового поиска информации — 20 К бит/с, для передачи файлов — 10М бит/с, для взаимодействия прикладных ЭВМ в распределенной вычислительной системе — 20 М бит/с.

В настоящее время созданы ЛВС с разной топологией (шина, кольцо, дерево и др.), с разными методами доступа (передача права, случайный и др.), с разными средствами передачи (витые пары, коаксиальные кабели и др.). Большое разнообразие вариантов вызывает появление разных несовместимых ЛВС с мало отличающимися характеристиками.

В рамках Международной организации по стандартизации (ISO) ведутся работы по стандартизации ЛВС. Проекты ISO базируются на стандартах ЕС МА. Анализ первых разработанных стандартов на ЛВС позволяет выделить две базовые топологии — типы и кольца. При этом в качестве прототипов для топологии шины используется сеть ETHERNET, а для топологии кольца сеть — CAMBRIDGE RING.

ГАП создаются на базе ЛВС различных типов. Автоматизированное моделирование и проектирование ГАП, при которых требуется большой объем разноплановой информации, частые обращения к автоматизированным БД и библиотекам, требуют пересылки информации длинными пакетами. Для таких систем целесообразно применение ЛВС ETHERNET.

Автоматизированное управление и оперативное планирование крупным производством не требует пересылки информации крупными неделимыми блоками. Хотя объемы передаваемой информации велики, ее источники располагаются в ограниченном регионе. Для таких подсистем ГАП целесообразно применение сетей типа CAMBRIDGE RING.

На нижнем уровне автоматизации управление стационарными и мобильными роботами, станками с ЧПУ и другими автоматическими установками — наиболее целесообразно применение малых ЛВС.

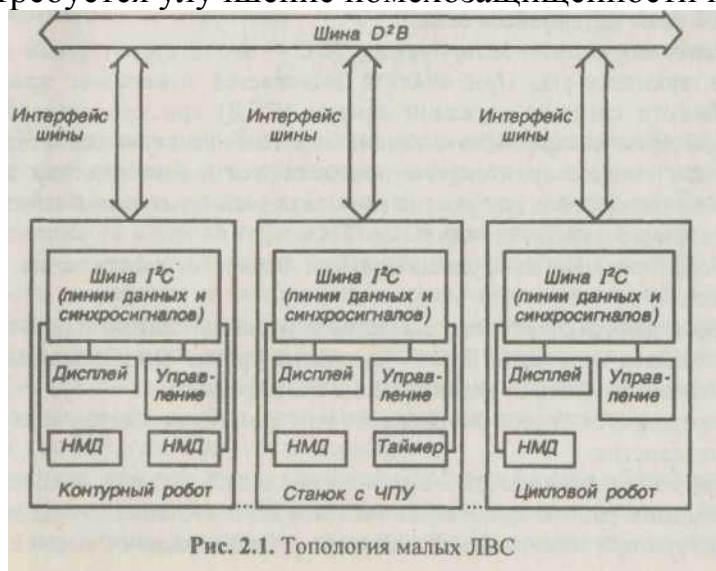
2.2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАЛЫХ ЛВС

Малые ЛВС предназначены для объединения гибкими методами и средствами компьютеров, контроллеров, дисплеев, таймеров, сенсорных устройств в малые контрольно-измерительные управляющие системы, робототехнические системы (РТС).

Для РТС разработаны шины последовательной передачи данных двух типов. Эти шины не конкурируют с большими ЛВС, а дополняют их. Шины обоих типов выполняют основные функции ЛВС: они работают с разделением времени и ресурсов, наличием канала двунаправленной передачи данных, коллективным доступом к каналу для передачи данных, наличием распределенного управления и модульной конструкции. При этом они используют возможности традиционных асинхронных каналов передачи данных, что упрощает реализацию устройств управления и способствует снижению стоимости.

Шина I^2C длиной связей до 10 м служит для объединения в небольшие модульные системы (ПЭВМ). Шина D^2V длиной связей до 150 м предусматривает более эффективный протокол и характеризуется высокой помехоустойчивостью. Она позволяет объединять 50 законченных систем, таких, как ПР, контрольно-измерительные системы. Шины I^2C и D^2V можно объединить. Топология малых ЛВС представлена на рис. 2.1.

Шина D^2V , предназначенная для соединения конструктивно законченных систем, может заменить шину I^2C как сеть одной стойки или шкафа в случае, если требуется улучшение помехозащищенности или более длинные связи.



2.3. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛВС

Эффективность ЛВС исследуется введением физически измеряемых критериев эффективности с учетом природы взаимодействия сети на различных функциональных уровнях. Особое значение имеют физическое содержание и характеристики системы передачи данных и сети.

Исследование эффективности глобальных вычислительных сетей (ГВС) опирается на концепцию теории сетей передачи данных. При этом конкретное содержание сети отходит на второй план, первенство приобретает способ оценки вклада системы передачи данных в работу сети ЭВМ.

Моделирование ГВС проводится на основе использования теории систем, теории оптимизации, теории массового обслуживания, теории графов, теории надежности, методов исследования операций. Результаты таких исследований распространяются в основном на макромоделли по сети передачи данных как сложной многометрической системы.

В ЛВС обычно проблем маршрутизации не существует. Поэтому использование концепции моделирования ГВС при моделировании ЛВС с жестким соединением абонентов приводит к неоправданным сложностям, не учитывающим конкретные технические характеристики микропроцессорной элементной базы устройств сопряжения (т. е. моделирования ЛВС проводят упрощенным методом). Упрощение достигается введением конкретного физического содержания, критерия эффективности — пропускной способности ЛВС, сужения ее структуры и построения иерархической системы моделей среды с физически измерительными характеристиками элементной базы интерфейсов сети.

Основная цель моделирования ЛВС — это ее структурный анализ и синтез архитектуры. При анализе выявляется изменение пропускной способности системы передачи данных (СПД) при использовании элементной базы интерфейсов с заданными техническими характеристиками, а при синтезе архитектуры определяются характеристики элементной базы интерфейса для достижения заданной пропускной способности как основного показателя качества ЛВС.

Моделирование на функциональном уровне осуществляется в таком порядке:

- определяются связи между элементами уровня функционального объекта;
- находятся параметры блоков алгоритма уровня функционального объекта как функции от характеристик его элементов;
- определяется способ вычисления или измерения многочисленных характеристик.

При моделировании ЛВС с топологией шины и кольца наиболее тяжелым режимом работы моноканала является использование случайных методов доступа при максимальной разгрузке — максимальное число активных

станций. Но для этих сетей проблемы создания структуры третьего уровня функционального объекта не существует, так как отсутствует маршрутизация сообщений по разветвленной сети каналов связи. Первые два уровня претерпевают изменения, связанные с совместным использованием моноканала многими станциями. *Первый уровень* остается практически без изменений, так как обеспечивает логику установления, поддержания и разъединения физического канала в случае предоставления доступа к каналу. *Второй уровень* предусматривает введение двух подуровней: один из них обеспечивает доступ к моноканалу, а другой — установление логических связей между процессами станций.

2.4. ОБЩИЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА

На эффективность работы ЛВС влияют различные факторы: метод доступа, физическая среда, число станций сети, параметры устройств сопряжения и др. Возможны различные подходы для выбора общего критерия качества ЛВС. Однако наиболее приемлемым подходом для выбора общего критерия качества является оценка влияния основных параметров сети на скорость передачи сообщений в единицу времени от одной станции к другой.

При синтезе качества значения основных параметров могут быть приняты на основании статистики и опыта проектирования, а при анализе качества — замерены.

Для моноканальных ЛВС возможно использование следующего критерия

качества:

$$Q_c = \frac{C_1 L N_0 N_a}{C_2 T_n},$$

где C_1 — стоимость разработки и стоимость эксплуатации оборудования абонентских станций для обработки информации пользователя; L — длина кабеля, соединяющего станции; N_0 — объем памяти, необходимый для размещения очереди передаваемых и принимаемых кадров информации; N_a — число активных станций, подключенных к ЛВС; C_2 — стоимость разработки и эксплуатации среды передачи данных (физическая среда, устройства сопряжения); T_n — время передачи кадров информации от станции отправителя к станции получателя с учетом упаковки блоков информации (пакетов) в кадры и обратной распаковки, работы блоков сопряжения с моноканалом, задержек, связанных с обнаружением конфликтов, и других задержек.

Очевидно, что чем лучше качество ЛВС, тем больше общий критерий качества Q_c , характеризующий аналог скорости передачи информации. Выбранные параметры, в основном, являются также комплексными сложными

функциями, зависящими от ряда аргументов. Кроме того, некоторые из них взаимозависимы. Так, параметр N_0 с одной стороны, испытывает влияние параметра T_n , так как увеличение T_n приводит к росту N_0 (число кадров, Кбайт), а с другой — увеличение N_0 возможно вследствие влияния факторов функциональной среды более высоких уровней (формирование пакетов, прикладных программ пользователя и т. д.). Однако выбранный критерий прост в определении и наиболее полно отражает изменение качества ЛВС при изменении ее основных параметров.

Основными характеристиками формализованных структур на каждом уровне функционального объекта являются временные задержки выполнения операций, влияющие на фактор T_n .

2.5. ГИБКИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭВМ

Для гибкой технологии ориентация направлена на частную и быструю переналадку оборудования для выпуска новых изделий:

при массовом и крупносерийном производстве технология, учитывая комплексный подход к автоматизации управления производством ЭВМ, также изменяется, особенно в части управления автоматическими линиями, в которых используются микропроцессорные контроллеры, что обеспечивает их связь с ЭВМ участка;

при серийном производстве — применение типовых и групповых ТП с детальной их проработкой; интегрирование операций; необязательность требований синхронности операций; выполнение большинства операций на гибких производственных модулях (ГПМ), построенных на базе высокопроизводительного оборудования с микропроцессорным управлением (МПО), роботов-загрузчиков и вспомогательного оборудования, объединенных с автоматизированным накопительным и транспортным оборудованием в гибкие автоматизированные линии (ГАЛ) или участки (ГАУ) с управлением от ЭВМ или УВК; осуществление связи между ГПМ и складом, транспортными роботами или безрельсовыми автоматически управляемыми тележками с изменяемой траекторией движения; повышение в целом гибкости ГАУ, производительности, коэффициентов загрузки оборудования и др.;

при мелкосерийном производстве — особенности в основном те же, что и при серийном, но еще больше укрупняются операции в связи со стремлением выполнить процесс на одном обрабатывающем сборочном центре. Основу ГАУ составляют сборочные (обрабатывающие) центры, а также универсальное оборудование с микропроцессорным управлением, автоматизированные транспорт и накопители с ПУ или ЧПУ, сопрягаемые с общим управлением от УВК или ЭВМ; ГАУ здесь имеют высокую гибкость, высокую производительность в условиях частой переналадки.

Для интенсификации ТП используют: объединение операций, действий (совмещение ходов — рабочих с рабочими, холостых с холостыми, рабочих с холостыми); увеличение режимов сборки; применение новых высокопроизводительных процессов, реализация которых при неавтоматизированном управлении невозможна; оптимизацию ТП.

2.5.1. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Одним из современных методов создания электрических цепей в РЭМ-1 (РЭМ-2) ЭВМ является применение печатного монтажа, реализуемого в виде многослойных печатных плат (МПП) с металлизацией сквозных отверстий.

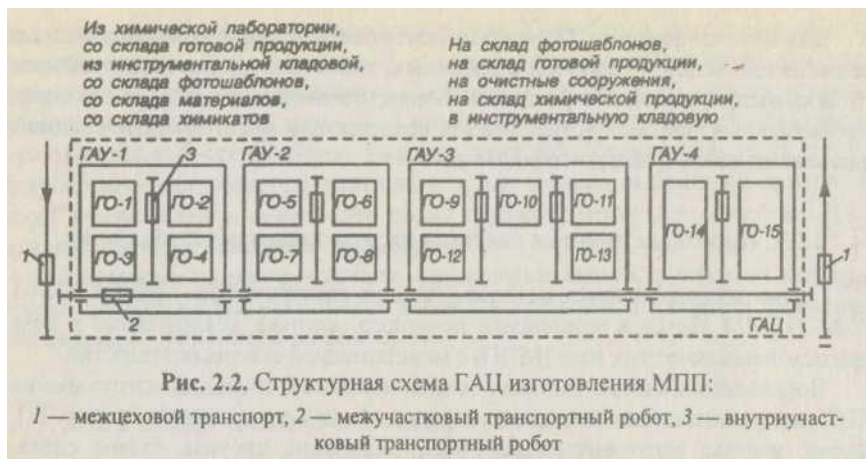
Последовательность типовых технологических операций изготовления МПП полуаддитивным методом, определяющая укрупненную схему ТП, такова: нарезка заготовок слоев МПП, получение рисунка схемы слоев, травление меди с пробельных мест, удаление маски, образование базовых отверстий, прессование слоев МПП; образование металлизированных отверстий; химическая очистка отверстий; химическая металлизация отверстий; гальваническая металлизация платы; получение рисунка схемы; гальваническая металлизация рисунка; нанесение металлорезиста на рисунок; удаление маски; травление меди с пробельных мест; оплавление металлорезиста; обработка платы по контуру; маркировка платы, нанесение защитного покрытия; окончательный контроль платы.

Указанная последовательность типовых операций группируется в основе ТП производства МПП: изготовление внутренних слоев химическим методом; прессование слоев в монолитную структуру; сверление сквозных отверстий с их последующей металлизацией; образование рисунка наружных слоев МПП.

ГАП (ГАЦ) изготовления МПП структурно состоит из четырех автоматизированных технологических участков (изготовления слоев МПП, прессования и сверления заготовок МПП, химико-гальванической обработки заготовок МПП, фрезерования и конечной обработки МПП), образующих технологическую систему (16 групп технологического оборудования со своей системой управления и контроля) и автоматизированной транспортной системы (транспортные роботы (ТРМ-100), транспортно-накопительные комплексы (ТНК), буферные накопители, рольганги).

Склады (химических реактивов, фотошаблонов, готовой продукции), заготовительный участок, инструментальная кладовая, контрольно-измерительный центр, участок подготовки химических растворов и химическая лаборатория в структуру ГАЦ не входят.

Структурная схема ГАЦ изготовления МПП приведена на рис. 2.2. В цех изготовления МПП со склада поступают фотошаблоны; со склада материалов — сухой пленочный фоторезист, заготовки стеклотекстолита и про-



кладочной кабельной бумаги, полиэтиленовая пленка; со склада химикатов — флюс, химические реактивы; с участка приготовления растворов — растворы химических реактивов; из инструментальной кладовой — фрезы, сверла, алмазные круги; со склада готовой продукции — пустая тара; из химической лаборатории — специальные химические добавки. Из цеха изготовления МПП на склад фотошаблонов перевозятся фотошаблоны; на склад готовой продукции — готовые МПП; на очистные сооружения — отработанные растворы; на склады химических предметов — пустая тара; в инструментальную кладовую — магазинад с отработанным инструментом.

Рассмотрим состав участков цеха (ГАУ) и используемое в них СТО (АСТО, ГПМ, РТК):

ГАУ-1 — *участок изготовления слоев МПП*. Он имеет четыре группы технологического оборудования (ГО-1 — ГО-4):

ГО-1 — группа подготовки поверхности и нанесения сухого пленочного фоторезиста (СПФ). Она состоит из РПС подготовки поверхности слоев МПП (транспортно-накопительный комплекс (ТНК) загрузки; АЛ химической подготовки фольгированного диэлектрика; ТНК разгрузки); РТК нанесения СПФ (ТНК загрузки, автоматическая комплексная линия нанесения СПФ, ТНК разгрузки);

ГО-2 — группа экспонирования рисунка схемы. Она состоит из РТК экспонирования (ТНК загрузки-разгрузки; автоматическая установка экспонирования; ТНК разгрузки-загрузки фотошаблонов);

ГО-3 — группа проявления, травления, снятия СПФ. Она состоит из РТК проявления и травления (ТНК загрузки, автоматическая комплексная линия травления, ТНК разгрузки); РТК снятия СПФ (ТНК загрузки; автоматическая установка снятия СПФ; ТНК разгрузки);

ГО-4 — группа электрического контроля и доработки слоев. Она состоит из ТНК загрузки, автомата накопления слоев перед прессованием, РТК электрического контроля, станда для доработки слоев.

ГАУ-2 — *участок прессования и сверления заготовок МПП*. Он имеет в своем составе четыре группы технологического оборудования (ГО-5—ГО-8):

ГО-5 — подготовки поверхности слоев МПП перед прессованием. Она состоит из РТК для подготовки поверхности слоев перед прессованием (ТНК загрузки, автоматизированная линия подготовки слоев перед прессованием, ТНК разгрузки); накопителя слоев МПП; автоматизированной зачистки и смазки пресс-форм; ТНК разгрузки;

ГО-6 — прессования слоев МПП. Она состоит из РТК прессования (ТНК загрузки, АСТО прессования, станд сборки-разборки, ТНК разгрузки);

ГО-7 и ГО-8 — группы обрезки облоя и сверления МПП. Они состоят из РТК сверления (ТНК загрузки-выгрузки; автомат обрезки облоя после прессования; многошпиндельный автомат для сверления отверстий; станд сборки-разборки спутников).

ГАУ-3 — *участок химико-гальванической обработки МПП*. Он имеет пять групп технологического оборудования (ГО-9—ГО-13):

ГО-9 — подготовки поверхности отверстий и химико-электролитической металлизации. Она состоит из РТК подготовки отверстий СТО (ТНК загрузки, автомат гидроабразивной обработки заготовок МПП; автоматизированная линия химической подготовки диэлектрика в отверстиях; автоматизированная линия гидроабразивной очистки); РТК химико-электролитической металлизации (ТНК загрузки, автоматизированная линия химической металлизации; ТНК разгрузки);

ГО-10 — получения рисунка схемы на наружных слоях заготовок МПП. Она состоит из ТНК загрузки, автоматизированной комплексной линии подготовки поверхности перед нанесением рисунка; автоматизированной установки экспонирования; станда фотошаблонов; автоматизированной комплексной линии снятия лавсановой пленки и проявления СПФ заготовки МПП; ТНК разгрузки;

ГО-11 — электролитической металлизации и травления рисунка схемы на наружных слоях. Она состоит из РТК электролитической металлизации (ТНК загрузки, автоматизированная линия электролитической металлизации, ТНК разгрузки); автоматизированной установки снятия СПФ; автоматизированной комплексной линии травления и отливки; ТНК разгрузки;

ГО-12 — нанесения защитной маски на наружных слоях заготовок МПП. Она состоит из ТНК загрузки; автоматизированной линии проявления заготовок МПП; автоматизированного станда фотошаблонов; автоматизированной установки экспонирования; автоматизированной линии нанесения защитной маски; ТНК разгрузки;

ГО-13 — обслуживания отверстий заготовок МПП. Она состоит из ТНК загрузки; автоматизированной комплексной линии лужения заготовки МПП; ТНК разгрузки.

ГАУ-4 —участок фрезерования и финишной обработки МПП. Он состоит из двух групп оборудования (ГО-14, ГО-15):

ГО-14 — фрезерования и финишной обработки (отмывки) МПП. Она состоит из РТК фрезерования (ТНК загрузки; рольганг приемо-на-копительный; стенд сборки-разборки спутников; автоматический станок фрезерования; ТНК разгрузки); печи сушильной;

ГО-15 — электроконтроля и маркировки плат. Она состоит из РТК электроконтроля (автомат финишного электрического контроля МПП; тип ТНК разгрузки-загрузки); стенда маркировки; установки ультрафиолетовой суши.

Основными режимами работы ГАЦ изготовления МПП являются «запуск», «подготовка к работе», «рабочий», «завершение» (привод в исходное состояние). Назначение режимов работы ГАЦ следующее.

«Запуск» — период времени работы служб завода, обеспечивающий последовательное включение и подачу в ГАЦ энергоресурсов (силовое напряжение, вентиляция, холодная и горячая вода, сжатый воздух), нагрев до рабочей температуры энергетически емкого оборудования (пресса горячего прессования, сушильные печи, емкости с припоём установок обслуживания) до начала работы ГАЦ.

«Подготовка к работе» — период времени работы служб ГАЦ до начала первой смены, обеспечивающей: последовательное включение АСТО и вывод его на рабочий режим; обеспечение загрузочно-разгрузочных позиций АСТО (РТК) заготовками, материалами, поддонами с помощью транспортных роботов и транспортных рабочих; корректировку рабочих растворов по результатам химического анализа; последовательную передачу УТП от СУГО на СУО соответствующих единиц АСТО (РТК) по запросам от них.

«Рабочий» — основной период времени работы ГАЦ изготовления МПП в первую и вторую смены, обеспечивающих изготовление МПП согласно сменно-суточному заданию (ССЗ).

«Завершение» — период времени работы служб ГАЦ и транспортно-накопительной системы в конце второй смены, обеспечивающий после завершения выполнения ССЗ по обработке заготовок слоев МПП, в том числе готовых МПП на АСТО (РТК), последовательное отключение оборудования и перевод его в исходное состояние с помощью транспортных рабочих, операторов; слив рабочих растворов и промывку емкостей к приему нового раствора с участка подготовки растворов.

2.5.2. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СИСТЕМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Схема технологического процесса сборки определяется конструктивно-технологическими особенностями радиоэлектронных модулей, в первую очередь составом элементной базы и конструкцией печатных плат.

Типовая схема ТП сборки применительно к типовой конструкции РЭМ (цифровой ячейки) состоит из следующих операций: установка вилок СНП-58 на печатные платы; предварительная сушка ячеек; пайка установленных элементов; отмывка остатков флюса; сушка ячеек; подготовка (распаковка из тары-спутника, формовка, лужение, установка в накопители) микросхем в корпусах 401.14, 402.16, 405.24; установка и пайка микросхем и микросборок в корпусах 401.14, 402.16, 405.24; формовка выводов микросхем малой применяемости, лужение выводов микросхем малой применяемости; установка и пайка микросхем малой применяемости; отмывка остатков флюса; сушка ячеек; контроль качества пайки и допайки некачественных соединений; контроль ячеек по электрическим параметрам; отмывка (обез-жирование) ячеек; сушка ячеек; защита мест, не подлежащих лакировке оправками и держателями; покрытие ячейки первым слоем лака; сушка первого слоя лака; покрытие ячейки вторым слоем лака; сушка второго слоя лака; снятие оправок и державок; установка планки на печатную плату; установка светодиодов на печатную плату; контроль ячеек по электрическим параметрам; упаковка ячеек.

Сборочно-монтажные работы при изготовлении РЭМ в ГАП представляют собой сложный комплекс различных по характеру процессов:

механические — формовка выводов, установка и крепление на печатных платах электрорадиоэлементов и интегральных схем;

химические — обезжирование, склеивание, отмывка от остатков флюсов после пайки;

физико-химические и физико-металлургические — лужение, пайка, сварка;

- физико-механические — обжимка, накрутка монтажных соединений.

Рассмотрим типовой вариант ГАП (ГАЦ) сборки и монтажа радиоэлектронных модулей.

Особенностью монтажа РЭМ является: обеспечение гибкости производственных систем сборки и монтажа РЭМ преимущественно вследствие программной переналадки СТО, замены СТО (программной), изменения связи между СТО и изменения технологических режимов; модульное построение ГАП на основе АСТО, ГПМ, ГАЛ; иерархичность построения системы управления ГАП; обеспечение переналаживаемости АСТО, ГПМ, ГАЛ только перепрограммированием; обеспечение максимальной предметной замкнутости производства на возможно более низком уровне иерархии ГАП — на уровне СТО; организация транспортных операций по схеме СТО (АСТО, ГПМ, ГАЛ), буферные устройства (накопители); обеспечение одновременной подачи на СТО всех элементов сборочного состава РЭМ; организация перемещения ПП, входящих в сборочный состав между АСТО, ГПМ, ГАЛ, механизированными модулями (стендами) в накопителях, отсутствие принудительного ритма в процессе производства РЭМ; организация автоматической комплектации и подготовки к сборке комплектующих элементов не

менее чем за два цикла обработки транспортной пачки на СТО; отсутствие конвейеров — как основного транспортного устройства между АСТО, ГПМ, ГАЛ, механизированными модулями (стендами); применение подвесных промышленных роботов в качестве одного из основных элементов внутрицеховой транспортной системы; наличие на СТО магазинов РЭМ в виде накопителей с целью организации межоперационного буфера; наличие между участками унифицированных буферных устройств с целью сбалансирования в отклонениях временных циклов изготовления РЭМ на различных участках.

Специальное технологическое оснащение, используемое в ГАП сборки и монтажа РЭМ, можно представить тремя группами: механизированные модули (ММ), автоматизированное специальное технологическое оборудование (АСТО), гибкие производственные модули (ГПМ).

К механизированным сборочным модулям относятся стенды подготовки ИС малой применяемости; лужения их выводов; установки, пайки и контроля качества пайки; диагностики и ремонта РЭМ; монтажа светодиодов; маркировки и окончательного контроля (стенд представителя ОТК). В состав каждого из перечисленных стендов входят рабочее место оператора, на котором размещается технологическая оснастка; видеотерминал с клавиатурой для связи АСУ участка; устройство приема накопителей (исключая стенды подготовки ИС и лужения выводов ИС малой применяемости), которое имеет датчик, сигнализирующий о возможности его обслуживания промышленным роботом. Транспортное обслуживание стендов подготовки ИС и лужения, их выводов, а также частично стенда установки и пайки ИС осуществляется с помощью тележек, на которых устанавливаются накопители для кассет с ИС в различных корпусах.

Автоматизированное специальное технологическое оборудование (АСТО), используемое в ГАП (цеха) сборки и монтажа РЭМ независимо от вида выполняемых технологических операций и степени их автоматизации, состоит из комплекта устройств для выполнения заданных технологических операций, устройства стыковки с автоматической транспортной системой, технического средства для связи с автоматизированной системой управления. АСТО, используемое в составе ГАП, может работать в автоматическом, автономном и наладочном режимах. АСТО в автоматическом режиме обеспечивает прием ПП и других комплектующих изделий от автоматизированной транспортной системы и их идентификацию; идентификацию поступивших ПП на АСТО, находящееся на входе цеха; выдачу пустых накопителей ПП и других комплектующих, а также накопителей с РЭМ в автоматизированную транспортную систему; передачу в систему управления информации о приеме накопителей; прием от системы управления управляющих технологических программ (УТП); выход на рабочие режимы, их контроль и поддержание; регенерацию используемых в АСТО рабочих растворов; передачу РЭМ, ПП и других комплектующих в рабочую зону АСТО

из накопителя и обратно в накопитель; выполнение технологических операций; подачу РЭМ из рабочей зоны в накопитель; диагностику состояния устройств СТО. В состав АСТО, используемого ГАП сборки и монтажа РЭМ входят автоматизированные установки очистки ИС и метки контрольных контактов и вилок; автоматические линии отмывки ячеек от флюса и вакуумной сушки; автомат установки планок; автоматические установки тестового контроля и влагозащиты ячеек.

Гибкие производственные модули и РТК сборки и монтажа РЭМ независимо от вида выполняемых технологических операций в общем случае состоят из АСТО, устройства стыковки с автоматической транспортной системой, технических средств связи с системой управления верхнего уровня. Основным режимом работы ГПМ является автоматический (без непосредственного участия оператора).

В автоматическом режиме ГПМ обеспечивает прием комплектующих изделий от автоматизированной транспортной системы (АТС); прием печатных плат (ПП) в накопителях от АТС; идентификацию поступающих накопителей, выдачу обработанных изделий в накопителях в АТС; диагностику состояния гибких производственных модулей; идентификацию печатных плат на АСТО, находящемся на входе в ГАП; передачу печатной платы в зону обработки из накопителя и обратно в накопитель; аварийный останов. В состав гибких производственных модулей, используемых в ГАП сборки и монтажа РЭМ, входят модули комплексной подготовки и пайки интегральных схем в корпусах типа 4.

ГАЦ сборки и монтажа РЭМ предназначен для автоматизированной сборки РЭМ на печатных платах и интегральных микросхемах с планарными выводами. В состав ГАЦ сборки и монтажа РЭМ входят шесть гибких автоматизированных участков (ГАУ) следующего назначения (рис. 2.3).

ГАУ-1 — участок подготовки микросхем. Он предназначен для рихтовки, формовки, лужения выводов микросхемы в корпусах 401.24, 402.16, 405.24 и укладки их в технологические кассеты с одновременной комплектацией по номиналам в соответствии с программой установки на ПП. На участке размещено следующее СТО: ГПМ комплексной подготовки микросхем в корпусах типа 4 (7 единиц), установка автоматической очистки микросхем, устройство автоматическое прямоточное с приводным рольгангом, унифицированное буферное устройство для накопителей микросхем (15 единиц), ПР типа М-34 (2 единицы), стенд лужения выводов микросхем, стенд подготовки микросхем.

ГАУ-2 — участок предварительной сборки ПП, предназначен для установки вилок и контрольных контактов на ПП, сушки ПП перед пайкой, пайки установочных элементов. На участке размещено СТО следующих видов: устройство автоматическое передаточное, РТК сборки ПП, автоматизированная линия вакуумной сушки цифровых ячеек, автоматизированная линия



пайки контрольных контактов и вилок, ПР типа М-34, унифицированное буферное устройство для накопителей ПП.

ГАУ-3 — участок установки и пайки микросхем на ПП, предназначен для установки и пайки ИС на ПП в корпусах типа 4. На участке имеются ППМ установки и пайки микросхем в корпусах 401.14 (11 единиц), 402.16 (7 единиц), 405.24 (2 единицы), ПР типа М-34 (4 единицы), унифицированное буферное устройство для носителей ПП (6 единиц), микросхем (4 единицы), устройство автоматическое передаточное с приводным рольгангом.

ГАУ-4 — участок контроля и ремонта РЭМ по электрическим параметрам предназначен для: установки и пайки микросхем малой применяемости, контроля качества пайки и допайки некачественных соединений, контроля ячеек по электрическим параметрам; ремонта неисправных ячеек; отмывки от остатков флюса и сушки ячеек. На участке размещено следующее СТО: стенд установки и пайки микросхем малой применяемости, ПР типа М-34, линия автоматической отмывки ячеек от флюса, автоматическая линия вакуумной сушки, унифицированное буферное устройство для накопителей ПП, стенд контроля качества пайки, рольганг приводной, автоматическая установка тестового контроля ячеек, стенд диагностики и ремонта ячеек.

ГАУ-5 — участок влагозащиты РЭМ, предназначен для нанесения на ячейки трех слоев защитного лакового покрытия. На участке размещены следующие виды СТО: автоматические линии отмывки ячеек от флюса и вакуумной сушки, установка автоматизированной влагозащиты ячеек, унифицированное буферное устройство для накопителей ПП, ПР типа М-34, рольганг приводной.

ГАУ-6 — участок досборки РЭМ, предназначен для окончательной сборки ячеек, контроля их по электрическим параметрам, маркировки и передачи ячеек службе ОТК. На участке размещены следующие виды СТО: автомат установки планок, стенд монтажа светодиодов, автомат установки тестового контроля ячеек, ПР типа М-34, стенд маркировки и окончательно-

го контроля и унифицированное буферное устройство для накопителей планок, стенд ОТК. В состав ГАЦ сборки и монтажа РЭМ входят следующие автоматизированные системы: технологическая обработка ячеек, объединенная в ГАУ, транспортная (АТС), управления (АСУ) ГАЦ. В структуре цеха сборки ячеек не предусматривается наличие складов на территории цеха. Комплектующие и ПП хранят на общезаводских складах.

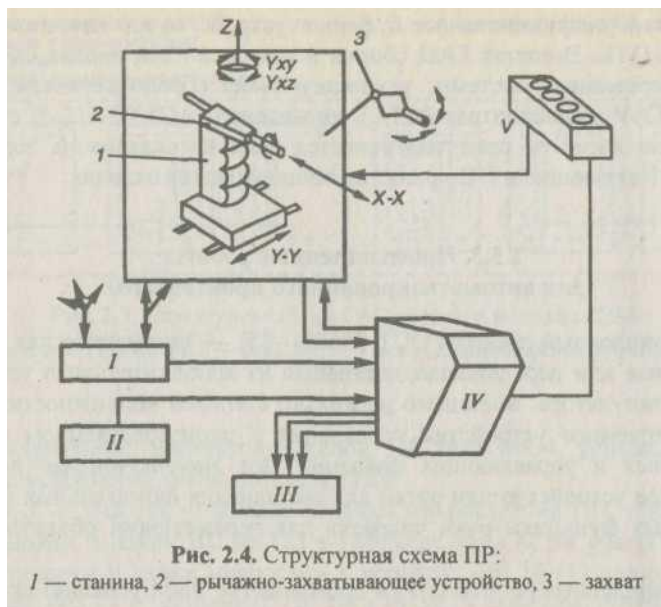
2.5.3. ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Промышленный робот (ГОСТ 25686—85) — автоматическая машина, стационарная или передвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства управления в производственном процессе двигательных и управляющих функций. Под *манипулятором* понимают управляемое устройство или орган для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека для перемещении объектов в пространстве.

Промышленные роботы (ПР) в производстве ЭВМ успешно применяют в составе автоматического оборудования, реализующего основные и вспомогательные технологические операции. В число основных операций, на которых используются ПР, входят: сборка (свинчивание, склеивание, сварка); монтаж (пайка, накрутка); защитно-декоративные (окраска, лакировка, гальванические покрытия); контроль (входной, выходной). На вспомогательных операциях ПР используют для складирования продукции, инструмента, оснастки; упаковки (укладки) изделий в тару; транспортирования заготовок, деталей, инструмента, оснастки в зону обработки (сборки) и из нее; удаление отходов при обработке (сборке) от основного оборудования; смены инструмента и оснастки в автоматическом сборочном технологическом оборудовании; выполнения ряда подготовительных операций (зачистка, отмывка поверхностей деталей и т. д.).

Конкретные конструкции ПР, их компоновка и технические характеристики приводятся в соответствующих каталогах и справочниках, что позволяет решать практические вопросы, связанные с их выбором для компоновки сборочных автоматических линий и роботизированных технологических комплексов (РТК). Они наряду с другими автоматами выступают в качестве элементной базы для построения различных типов и назначения автоматизированных линий, а также более сложных автоматических и кибернетических систем, какими являются гибкие производственные системы (ГПС).

Структура любого ПР (рис. 2.4) независимо от его типа и назначения состоит из механической части (*III*), инструментальной системы (*V*), датчиков внешней (*II*) и внутренней (*I*) информации, системы управления (*IV*).



Механическая часть, несущая рабочие и другие органы промышленного робота и осуществляющая все необходимые их перемещения (линейные горизонтальные или вертикальные, поворачивание, качение, захваты), состоит из станины и рычажно-захватывающего устройства, расположенного сверху станины. Рычажно-захватывающее устройство (основной рабочий орган РР) представляет собой разомкнутый многосвязный механизм, состоящий из рычажного устройства с приводом. Рычажно-захватывающие устройства разделяют по типу конструкции, типу приводов и числу степеней свободы (3—5 степеней).

Основное назначение системы управления РР — формирование логической последовательности его действия и обеспечение автоматической работы рычажного, захватного и других устройств в соответствии с заданной программой, осуществление связи между действиями самого РР и обслуживаемого им технологического оборудования, а также контроль за рабочей зоной работы с целью устранения несчастных случаев. Применяемые в настоящее время системы управления РР можно условно разделить на жестко программируемые (позиционно-цикловые, позиционно-аналоговые, позиционно-числовые), контурные (импульсные, числовые), комбинированные (позиционно-контурные), управляемые от ЭВМ. Системы управления с жесткой программой предназначены для выполнения повторяющихся операций в неизменной среде, имеют механическую память и задают движение рабочим органам промышленного робота в виде последовательности

значений требуемых положений. Системы управления на базе ЭВМ осуществляют последовательность выполнения операций по программе. Гибкость и многофункциональность системы управления достигается самообучением, предусмотренным в программном обеспечении ЭВМ.

3. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПР

ПР применяются в операциях сборки, обслуживания станков с ЧПУ, сварки и контроля. По вычислительной нагрузке на управляющую ЭВМ производственные операции делятся на два вида:

- информационно-простые операции — это операции переноса большого числа предметов или предметов, тяжелых для человека;
- информационно сложные операции — это операции сборки и контроля.

Для выполнения этих операций применяют 16-ти и 32-разрядные процессоры с памятью 256 Кбайт и выше, развитые операционные системы, включая средства защиты памяти, с робото-ориентированным и задачно-ориентированными языками программирования высокого уровня. Перспективное направление — использование как аналоговых микропроцессоров (где в одном кристалле реализованы цифровые элементы микропроцессора), так и цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей и схема управления периферийными устройствами. Важная характеристика систем управления ПР — надежность. Для ее обеспечения используют адаптивные микропроцессоры. Наличие в этих устройствах узлов, средств диагностики отказов и самовосстановления, реализующих в совокупности адаптивные внутренние связи, способствует увеличению надежности робото-ориентированных вычислительных устройств до показателей, отвечающих производственным требованиям.

3.1. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПР

Системы управления ПР предназначены для управления его работой и организации его взаимодействия с технологическим оборудованием (рис. 3.1).

ПР состоит из манипулятора 2 и системы управления 4. Внешняя по отношению к роботу среда включает обычно технологическое оборудование /, которое обслуживает робот и транспортирующую позицию 10 (выходной участок непрерывного или дискретного транспорта, вибробункер, лоток с ориентированными и неориентированными деталями и т. п.). Сие-

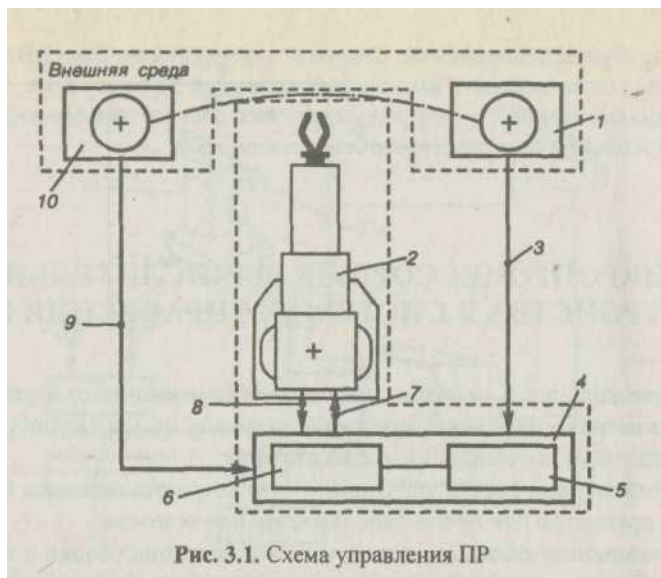


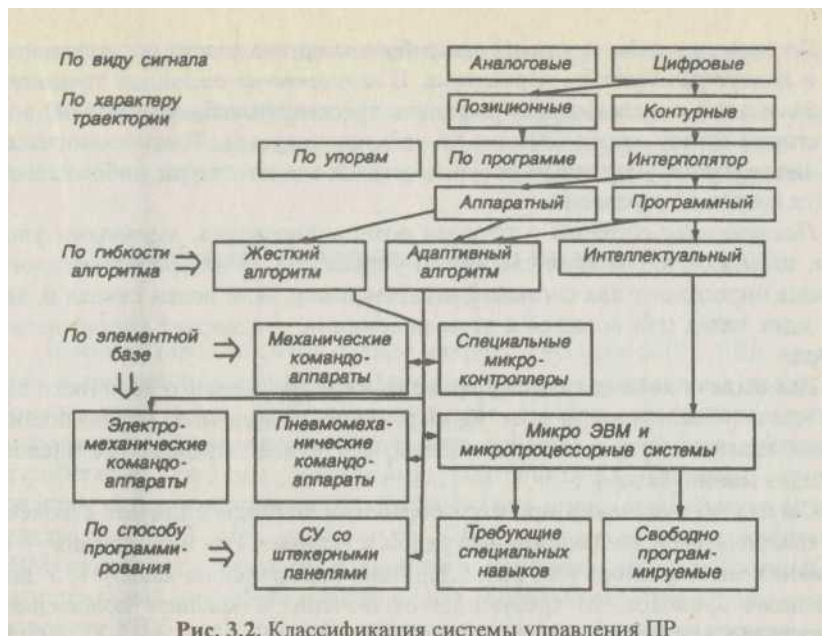
Рис. 3.1. Схема управления ПР

тема управления формирует информационный поток, содержащий набор команд для управления манипулятором.

Этот поток формируется на основе информации о состоянии манипуляторов (поток 8) и информации о состоянии внешней среды (потoki 3 и Р). Информация о состоянии манипулятора — это совокупность сигналов, например, с конечных выключателей, путевых датчиков о положении элементов манипулятора. Эти сигналы говорят, например, что захват выдвинут до упора или на расстояние S и разжат, их достаточно, чтобы с некоторой степенью точности управлять положением рабочих органов манипулятора в пространстве, однако его работа не будет синхронизирована с работой станка и транспортирующей системы.

Обычно необходимы синхронизирующие сигналы по цепи 3 о готовности технологического оборудования, и сигнал по цепи 9 о присутствии полуфабриката. Только при наличии обоих синхросигналов система управления выдает команду на начало цикла работы манипулятора.

Управляющие команды на манипулятор часто простым механическим, математическим или преобразованием внешней или внутренней информации не могут быть сформированы или это оказывается сопряженным с большим числом трудностей, например, с необходимостью очень большого числа сигналов. Так, если необходимо остановить захват в некотором промежуточном положении при первом проходе и не останавливать при втором, помимо наличия сигналов с датчика промежуточного положения необходимо еще считать и запоминать проходы.



Система управления в этом случае, кроме блока преобразования информации 6, должна иметь память 5, наличие которой существенно уменьшает число необходимых для управления сигналов.

3.1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПР

Классификация системы управления ПР представлена на рис. 3.2.

В аналоговых системах передаваемая информация по линии связи (электрическому проводу, рычажной системе и т. п.) — это величина сигнала, которая может быть любой в некотором допустимом диапазоне и непосредственно несет информацию о требуемой реакции манипулятора.

В цифровых системах сигнал принимает дискретные значения, например, при двоичном кодировании, если сигнал меньше 1 В, то считают, что передается 0, если больше 3 В, то — 1. Такие сигналы менее подвержены помехам, проще обрабатываются, сопрягаются с ЭВМ. При двоичном кодировании, чтобы захват робота переместился вперед на шесть шагов, необходимо передать команду 110.

Такая команда передается последовательно по одному проводу (последовательность двух импульсов и паузы), либо параллельно по трем проводам — это последовательный и параллельный способы передачи информации.

По возможностям перемещения рабочего органа различают позиционные и контурные системы управления. В *позиционных системах* точно определены лишь отдельные крайние точки траектории рабочих органов, вид траектории между этими точками не регламентируется. Точки позиционирования задаются упорами на рабочих органах манипулятора, либо определяются системой управления.

Позиционные системы с точками позиционирования, заданными упорами, называют цикловыми системами управления. В них работу каждого привода определяют два сигнала 0 и 1. Например, если подан сигнал 0, захват идет назад или остается в этом положении, 1 кодирует перемещение вперед.

Для выдачи команд каждому приводу достаточно одного двоичного канала связи. Совокупность всех одновременно выдаваемых управляющих команд называют управляющим словом, его длина определяется числом приводов манипулятора.

Сигнал об окончании процесса обработки команды снимают с конечных выключателей, расположенных рядом с упорами. Эта информация — о состоянии манипулятора (см. рис. 3.1), и она передается по каналу 7. У позиционных приводов, не требующих отключения в крайнем положении, обратная связь отсутствует.

Если точки позиционирования задаются не упорами, а системой управления, то между ней и приводом производится работа. На привод подается команда о перемещении, в систему управления с датчика внутренней информации начинает поступать сигнал о величине перемещения, который сравнивается с сигналом, характеризующим заданное перемещение, и при их совпадении выдается сигнал об остановке привода.

В *контурных системах* перемещение организуется малыми последовательными шагами по двум или трем координатам. Для этого необходимо выдавать команду на каждый шаг, число команд велико. Так, при перемещении в точку с координатами $X = 100$ мм, $K = 50$ мм из нулевой точки по прямой линии с шагом 0,1 мм необходимо 1500 команд. Программировать и хранить в памяти каждую такую команду нерационально, поэтому в памяти задают вид перемещения (линейная, круговая, параболическая интерполяция) и константы, однозначно характеризующие траекторию.

Это конечная точка при линейной интерполяции, радиус, координаты центра и направление. Все промежуточные команды, определяющие, по какой из координат и в каком направлении делать очередной шаг, формирует интерполятор (функции интерполяции выполняются аппаратно).

ПР на базе микропроцессоров имеют специальные программы интерполяции, формирующие очередной шаг, исходя из конечной точки и вида траектории. Программные интерполяторы в АЛУ рассчитывают требуемые координаты траектории перемещения на очередном шаге, отклонения от них при шаге по координатам X и Y и дает команду на шаг по той координате

те, которая обеспечивает наименьшее отклонение от теоретической траектории.

По степени гибкости алгоритма управления различают системы управления с жесткими алгоритмами, адаптивными и интеллектуальными. В соответствии с этим различают роботы первого, второго и третьего поколений.

3.2. АРХИТЕКТУРА УПРАВЛЯЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Имеются серийные УВК на базе микропроцессоров (МП). УВК встраивают в технологическое оборудование или в производственные процессы. Понятие архитектуры УВК включает в себя структуру процессора, память, внешние устройства, систему адресации, средства управления внешними устройствами, системы прерываний, синхронизации, форматы команд, средства программирования. Особое значение имеет способ связи между отдельными УВК. При архитектуре УВК с автономно расположенными ЭВМ возникают трудности, связанные с внешними интерфейсами. Хотя магистральный интерфейс «общая шина» обеспечивает унификацию связей устройств УВК с центральным процессором через единую магистраль ввода-вывода, он не позволяет достигать необходимой производительности информационного обмена при совместной работе большого числа процессоров в блоке УСО.

Рассмотрим отдельные модули УВК. Структура однопроцессорных УВК показана на рис. 3.3.

Структура включает процессорный модуль, внешние устройства, интерфейсы внешних устройств, модули УСО, вспомогательные устройства расширения функций. Процессорные модули выполняют в виде закончен-

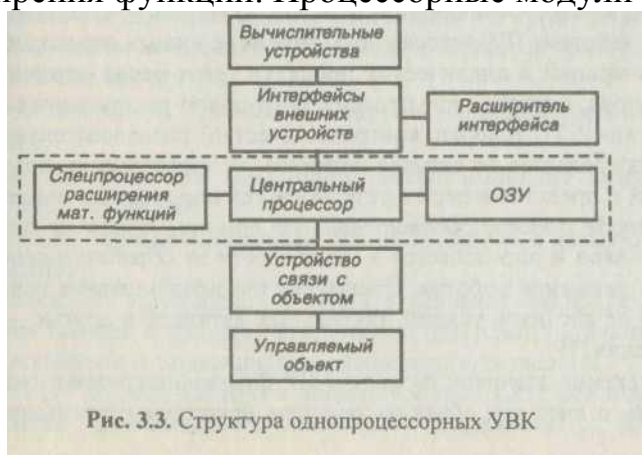


Рис. 3.3. Структура однопроцессорных УВК

ных вычислительных устройств, имеющих микроконтроллер, ОЗУ, контроллеры прерываний и различные формы интерфейсов с внешними устройствами.

Микропроцессорные БИС в модуле имеют самостоятельные функции: обработки данных, управления, хранения управляющих *nig*. Система регистровых операций и гибкая система адресации (последовательная, косвенная, индексная, стековая) повышают производительность процессорных модулей при выполнении одно- и двухбайтовых операций.

Существенное ограничение УВК — малый объем ОЗУ, но адресное пространство можно расширить путем программно-аппаратной сегментации памяти. Обычно УВК ориентируют на конкретное применение, т. е. используется ОС реального масштаба времени (ОС РВ). Эти ОС РВ используются для систем управления производственными участками и роботами, станками с ЧПУ.

ОС РВ реализованы на интегральных схемах, содержат набор системных вызовов и представляют программистам группы команд высокого уровня, которые решают задачи более низкого уровня.

3.3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В РТК 3.3.1. МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПР

Метод прямого обучения предполагает ручное перемещение робота во все требуемые положения и запись соответствующих или обобщенных координат сочленений. Кроме того, для некоторых положений указывается необходимость выполнения таких операций, как смыкание захватного устройства. Выполнение программы заключается в перемещении сочленения робота в соответствии с заданной последовательностью положений.

Прямое обучение — простой и легко реализуемый метод программирования (не требует универсальных ЭВМ), но для него есть ограничения: невозможность использования датчиков. Пользователь определяет последовательность действия ПР, которая не содержит условных переходов, вычислительных операций и циклических процедур. Этот метод применяется в точечной сварке, окраске, при простых погрузочно-разгрузочных работах. В более сложных ТП (сборка, контроль качества) последовательность действий ПР определяется от сигнала датчиков, от информации, получаемой из баз данных и представляемой в результате тех или иных вычислений.

В *методе роботоориентированного программирования* производится опрос датчиков и определяется в зависимости от обработки сенсорной информации движение роботов. Преимущество использования сенсорной информации от датчиков усилий, тактильных датчиков и других — в коррекции движения ПР.

Применение датчиков позволяет ПР функционировать в ситуации, когда данным о внешних объектах присуща некоторая степень неопределен-

ности, что расширяет область применения ПР. К недостаткам робото-ориентированных языков относится то, что пользователь должен иметь высокую квалификацию в области программирования.

Упростить процедуру программирования можно посредством использования в робото-ориентированных языках программирования методов машинной графики. Этот путь связан с заменой метода прямого обучения моделированием рабочего пространства ПР.

В *методе заданно-ориентированного программирования* определяется не движение ПР, а расположение объектов. Это позволяет абстрагировать от особенностей конкретного ПР, и пользователю не приходится определять траектории движения и положения, зависящие от геометрии и кинематики ПР. Исходной информацией является геометрическая модель рабочего пространства и робота. Задачно-ориентированное программирование называют системами программирования рабочей обстановки. Если провести аналогию с языками программирования ЭВМ, то задачно-ориентированное программирование относится к робото-ориентированному программированию так же, как и языки высокого уровня относятся к языку ассемблера и другим языкам низкого уровня.

3.3.2. ПРИМЕРЫ РОБОТО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

МНІ — язык программирования, созданный для первых роботов (1961), управляемых от ЭВМ. Основные приемы программирования базируются на концепции осторожного движения, которое осуществляется до тех пор, пока не будет получен определенный сигнал от датчика. С помощью МНІ не выполняются арифметические действия, выходящие за рамки опроса датчиков.

WAYE (1975) имеет основное допущение, которое заключается в том, что параметры движения заранее рассчитаны и в процессе выполнения движения допустимы небольшие отклонения от заданных траекторий. Здесь были реализованы процедуры:

- описания положения с помощью декартовых координат исполнительного органа;

- координации движения сочленений, обеспечивающие непрерывность скоростей и ускорений;

- определения последовательности этапов движения в декартовой системе координат.

Для надежного выполнения заданий в условиях неопределенности и обнаружения ошибок в процессе выполнения программы в системе WAYE реализуется концепция податливого и осторожного движения.

3. MINI (1976) получен путем введения в язык LISP некоторого числа дополнительных функций, обеспечивающих сопряжение со специальной

ЭВМ (СВС), на которой программа выполняется в реальном масштабе времени. Отличие MINI от других языков программирования состоит в том, что сочленения ПР управляются независимо друг от друга. Исполнительный орган перемещается в декартовой системе координат, что позволяет уменьшить влияние недостатков некоординированных последовательных перемещений из одного положения в другое. С помощью операторов языка MINI можно установить целевые положения или усилия для каждого сочленения робота, считать показания датчиков положения и усилий, а также задать режим ожидания какого-либо сообщения. Но в языке MINI отсутствуют операторы управления и средства обработки геометрической информации.

4. В языке AL сочетаются специфические функции ПР и возможности языков ALQOL и PASCAL. В системе AL программы выполняются на 2 ЭВМ. На 1-й — производится компиляция исходной программы, на второй — полученная в результате компиляции программы низкого уровня исполняется в реальном масштабе времени на управляющей ЭВМ.

Особенности языка AL:

- реализованы методы описания движения (спецификация траекторий в декартовой системе координат, расчет траекторий, алгоритм податливого движения);

- обеспечены возможности для работы в реальном масштабе времени, параллельное выполнение и синхронизация процессов;

- реализованы способы представления геометрической информации с помощью векторов, матриц и систем координат;

- созданы разнообразные средства моделирования рабочей обстановки, с помощью которых можно производить взаимную привязку систем координат, в том числе и временных, создаваемых, например, в процессе работы ПР в режиме захвата предметов.

5. VAL — это интерпретатор. Усовершенствованные методы расчета траекторий позволяют исключить этап предварительных расчетов. Особенности языка VAL:

- наличие спецификации позиционных перемещений и перемещений путем интерполяции точек в декартовой системе координат, включая движения подвода и отвода;

- возможность преобразования декартовых систем координат или задания положений в произвольной системе координат;

- возможность использования целочисленных переменных, арифметических действий и условных ветвлений;

- возможность установки и проверки состояния двоичной канальных шин, опрос шин.

Система VAL допускает стыковку с системой технологического зрения ПР и может определять систему координат деталей, попадающих в поле зрения телекамеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) *Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
- 2) *Алиев А. С. и др.* Интеллектуальные САПР технологических процессов в радиоэлектронике. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
- 3) *Алиев Р. А. и др.* Производственные системы с искусственным интеллектом. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
- 4) *Арефьев И. Б., Кезлинг Г. Б., Кукор Б. Л.* Интегрированные АСУ в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1988. 244 с.
- 5) *Артамонов Г. Т., Тюрин В. А.* Топология сетей ЭВМ и многопроцессорных систем. М.: Радио и связь, 1991. 248 с.
- 6) *Асельдеров З. М., Донец Г. А.* Представление и восстановление графов. Киев: Наук, думка, 1991. 192 с.
- 7) *Базаева С. Е. и др.* Технология разработки диалоговых графических систем. М.: Наука, 1992. 212 с.
- 8) *Барканова Д. С., Тихомиров Ю. С.* Порядок и правила разработки, оформления и обращения конструкторской документации. М.: Изд-во стандартов, 1992. 160 с.
- 9) *Барнс Дж.* Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990. 238 с.
- 10) *Басакер Р., Саати Т.* Конечные графы и сети. М.: Наука, 1973. 368 с.
- 11) *Березин А. С., Мочалкина О. Р.* Технология и конструирование интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1992. 320 с.
- 12) *Булевский П. И., Зайденберг М. Г.* Надежность приборов систем управления: Справ, пособие. Л.: Машиностроение, 1975. 328 с.
- 13) *Валиев Т. А., Нишанбаев Т. Я., Лоссий И. О.* Оптимизация информационно-вычислительных систем методами имитационного моделирования на ЭВМ. Ташкент: Фан, 1991. 132 с.
- 14) *Василенко В. А.* Сплайн-функции: теория, алгоритмы и программы. Новосибирск: Наука, 1983. 320 с.
- 15) *Васильев Ф. П.* Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
- 16) *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 384 с.
- 17) *Верма П.* Сети связи ЭВМ. М.: Радио и связь, 1992. 114 с.
- 18) *Гаврилов Т. А., Червинская К. Р.* Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. М.: Радио и связь, 1992. 200 с.
- 19) *Гольц Г.* Рабочие станции и информационные сети. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.
- 20) *Горностаев Ю. М.* Компьютерные сети. М.: Электронные знания, 1992. 159 с.
- 21) *Грешилов А. А.* Как принять наилучшее решение в реальных условиях. М.: Радио и связь, 1991. 320 с.
- 22) *Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З.* Численные методы анализа. М.: Физматгиз, 1962. 368 с.

- 23) *Диго С. М.* Проектирование и использование баз данных. М.: Финансы и статистика, 1995. 208 с.
- 24) Диоды, тиристоры, транзисторы и микросхемы широкого применения. Справочник./ Б. Ф. Бессарабов, В. Д. Федюк, Д. В. Федюк - Воронеж: ИПФ «Воронеж», 1994. 720 с.
- 25) *Директор С, Рорер Р.* Введение в теорию систем. М.: Мир, 1974. 464 с.
- 26) *Евстигнеев В. А.* Применение теории графов в программировании. М.: Наука, 1985. 352 с.
- 27) Единая система конструкторской документации: Справ, пособие. М.: Изд-во стандартов, 1989. 352 с.
- 28) *Ефимов Е. Н.* Решатели интеллектуальных задач. М.: Наука, 1982. 320 с.
- 29) *Жук К. Д., Тимченко А. А.* Автоматизированное проектирование логико-динамических систем. Киев: Наук, думка, 1981. 320 с.
- 30) *Иванов Ю. В., Лакота Н. А.* Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов: Учеб. пособие для вузов. Радио и связь, 1987. 464 с.
- 31) *Йенсен П., Бернес Д.* Потокное программирование: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1984. 392 с.
- 32) *Квасов А. С.* Основы художественного конструирования промышленных изделий: Учеб. пособие / МАМИ. М., 1989. 98 с.
- 33) Конструирование функциональных узлов ЭВМ на интегральных схемах / Б. Н. Ермолаев и др. М.: Радио и связь, 1998. 200 с.
- 34) *Кофанов Ю. Н.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь, 1991. 360 с.
- 35) *Крон Г.* Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1978. 720 с.
- 36) *Курейчик В. М.* Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. М.: Радио и связь, 1990. 352 с.
- 37) *Луканцев В. Я., Якушенков Ю. Г.* Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах М.: Радио и связь, 1981. 179 с.
- 38) *Лунд П. К.* Прецизионные печатные платы. Конструирование и производство. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
- 39) *Лэсдон Л. С.* Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975. 432 с.
- 40) *М. Де Гроот.* Оптимальные статистические решения. М.: Мир, 1974. 492 с.
- 41) *Малышев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженьюк А. В.* Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991. 136 с.
- 42) *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики. Новосибирск: Наука, 1973. 352 с.
- 43) Микроэлектронные устройства автоматики: Учеб. пособие для вузов / А.А.Сазонов и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 394 с.
- 44) *Мостеллер Ф., Тьюки Дж.* Анализ данных и регрессия. М.: Финансы и статистика, 1982. 317 с.

- 45) *Мушик Э., Мюллер П.* Методы принятия технических решений. М.: Мир, 1990. 208 с.
- 46) *Ненашев А. П.* Конструирование радиоэлектронных средств. М.: Высш. шк., 1990. 432 с.
- 47) *Норенков И. П.* Основы теории и проектирования САПР. М.: Высш. шк., 1990. 311 с.
- 48) *Норенков И. П.* Разработка систем автоматизированного проектирования. Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. И. Э. Баумана. 1994. 207 с.
- 49) *Норенков И. П., Маничев В. Б.* Системы автоматизированного проектирования электронной и вычислительной аппаратуры. М.: Высш. шк., 1983. 272 с.
- 50) *Норенков И. П.* Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высш. шк., 1986. 311 с.
- 51) *Петров А. Е.* Тензорная методология в теории систем. М.: Радио и связь, 1985. 152 с.
- 52) *Подвальный С. Л., Савельев М. В., Тушканов Н. Б.* Автоматизация производства ЭВМ: Учеб. пособие /Новочерк. гос. техн. ун-т. Новочеркасск, 1996. 102 с.
- 53) *Поляк Б. Т.* Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. 384 с.
- 54) *Преснухин Л. Я, Воробьев Н. В., Шишкевич А. А.* Расчет элементов цифровых устройств. М.: Высш. шк., 1991. 526 с.
- 55) *Преснухин Л. Н, Шахнов В. А.* Конструирование электронных вычислительных машин и систем. М.: Высш. шк., 1986. 512 с.
- 56) *Разевиг В.Д., Блохнин СМ.* Система P-CAD. Руководство пользователя. М.: ООО «ИЛЕКСА», 1996. 288 с.
- 57) *Рубан В. Я, Дрогаль Т. Г.* Интеграция АСУ на основе баз данных. Киев: Техника, 1988. 192 с.
- 58) *Рыжов Э. В., Горленко О. А.* Математические методы в технологических исследованиях. Киев: Наук, думка, 1990. 184 с.
- 59) *Савельев А. Я., Овчинников В. А.* Конструирование ЭВМ и систем. М.: Высш. шк., 1989. 312 с.
- 60) *Савельев М. В.* Автоматизация проектирования вычислительных систем: Учеб. пособие /Новочерк. гос. техн. ун-т. Новочеркасск, 1997. 64 с.
- 61) *Савельев М. В.* Техническое, программное и интеллектуальное обеспечение САПР вычислительных систем: Учеб. пособие. Ростов н/Д: Изд-во Сев.-Кавк. науч. центра высшей школы, 1998. 79 с.
- 62) *Савельев М. В.* Техническое, программное и интеллектуальное обеспечение САПР вычислительных систем: Учеб. пособие. Ростов н/Д: Изд-во Сев.-Кавк. науч. центра высшей школы, 1998. 79 с.
- 63) *Савельев М. В., Теняков Е. И.* Конструирование средств измерительной и вычислительной техники: Учеб. пособие /Юж.-Росс. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. 107 с.
- 64) *Самошкин М. А.* Автоматизация преобразования и обработки графической информации. Минск: Наука и техника, 1991. 335 с
- 65) *Скляров В. А. и др.* Автоматизация проектирования ЭВМ. Минск:

Высш. шк., 1990. 356 с.

66) *Соломенцев Ю. М.* Проектирование автоматизированных участков и цехов. М.: Машиностроение, 1992. 272 с.

67) *Сучков Д. И.* Проектирование печатных плат в САПР P-CAD 4.5, P-CAD 8.5 и ACCEL EDA. М.: Малип, 1998. 576 с.

68) *Схрейвер А.* Теория линейного и целочисленного программирования: В 2 т.: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 360 с.

69) *Таусенд К, Фохт Д.* Проектирование и программная реализация экспертных систем на ПЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1990. 320 с.

70) *Ушаков Н. Н.* Технология производства ЭВМ: Учеб. для студ. вузов по спец. «Вычислит, машины, комплексы, системы и сети». М.: Высш. шк., 1991. 416 с.

71) *Фор А.* Восприятие и распознавание образов. М.: Машиностроение, 1989. 272 с.

72) *Фролов В. Н., Львович Я. Е., Меткин Н. П.* Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС. М.: Высш. шк., 1991. 463 с.

73) *Хакен Г.* Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 240 с.

74) *Хокс Б.* Автоматизированное проектирование и производство: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 296 с.

75) *Холодниок М.* Методы анализа нелинейных математических моделей: Пер. с чешек. М.: Мир, 1991. 368 с.

76) *Хофер Э., Лундерштенд Р.* Численные методы оптимизации. М.: Машиностроение, 1981. 192 с.

77) *Янишин А. А.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА. М.: Радио и связь, 1983.