

А. И. ПЕТРЕНКО,
О. И. СЕМЕНКОВ

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИ- РОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
СТЕРЕОТИПНОЕ

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования
УССР в качестве учебника
для студентов
инженерных специальностей
вузов

КИЕВ
ГОЛОВНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ВИЩА ШКОЛА»
1985.

УДК 681.3 (075.8)

Основы построения систем автоматизированного проектирования. / А. И. Петренко, О. И. Семенов.— 2-е изд., стер.— К.: Вища шк.: Головное изд-во, 1985.— 294 с.

В учебнике описаны принципы построения и программно-аппаратурные средства систем автоматизированного проектирования (САПР) инженерных объектов с помощью ЭВМ, изложены основные задачи, связанные с разработкой и использованием базовых подсистем САПР: поиска и выбора технических решений, математического и семиотического моделирования инженерных объектов и оптимизации их характеристик, рассмотрены средства общения с ЭВМ, а также примеры действующих САПР.

Для студентов инженерных специальностей вузов.

Табл. 25. Ил. 86. Библиогр.: 86 назв.

Рецензенты: кафедра радиотехнических устройств и систем Московского института электронного машиностроения (профессор А. И. Чернушенко, доцент Ю. Н. Кофанов); доцент В. И. Салыга (Харьковский институт радиоэлектроники)

Редакция литературы по кибернетике,
электронике и энергетике
Зав. редакцией М. С. Хойнацкий

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
1. ОРГАНИЗАЦИЯ САПР И ЕЕ ПОДСИСТЕМЫ	6
1.1. Системы автоматизированного проектирования	6
1.2. Этапы проектирования и структура САПР	12
2. ТЕХНИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР	27
2.1. Технический комплекс САПР	27
2.2. Программное обеспечение САПР	43
3. ИНЖЕНЕР-ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	55
3.1. Разделение функций пользователя и ЭВМ	55
3.2. Лингвистическое обеспечение САПР	59
4. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	79
4.1. Поиск технических решений	79
4.2. Выбор рациональных вариантов решения технической задачи	85
5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ	94
5.1. Иерархическая система математических моделей	94
5.2. Автоматическое формирование аналитических моделей инженерных объектов	105
6. МЕТОДЫ АНАЛИЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТА	123
6.1. Методы анализа статико-динамических режимов и чувствительности	123
6.2. Выбор метода численного интегрирования	136
7. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	150
7.1. Методы оптимизации	150
7.2. Подсистема параметрической оптимизации характеристик объектов	166
8. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В САПР	174
8.1. Функции и структура систем геометрического моделирования	174
8.2. Математические модели геометрических объектов	182
9. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ	
9.1. Метод конечного элемента для пространственных конструкций	201
9.2. Плоские конструкции. Размещение и соединение компонентов	216
10. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА (ТПП)	
10.1. Структура и функции ТПП	224
10.2. Автоматизация решения проектно-технологических задач в САПР-ТПП	231
11. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ САПР	
11.1. Информационно-логическая модель проектной организации	241
11.2. Анализ проектной организации и план внедрения САПР	245
12. ПРИМЕРЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ САПР В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	
12.1. САПР в радиоэлектронике	268
12.2. САПР в машиностроении	280
Список литературы	297

В учебнике отражены следующие основные направления исследования и разработок в области теории, методологии и практики САПР:

1) выбор и разработка адекватных формальных моделей технических объектов, процессов проектирования и процедур принятия проектных решений как основы построения САПР;

2) выделение и формирование ряда системообразующих программных комплексов, инвариантных относительно области применения и реализующих в совокупности внутренние механизмы функционирования САПР;

3) разработка и внедрение отдельных пакетов прикладных программ, ориентированных на решение более или менее крупных групп функционально однородных задач автоматизированного проектирования с объектной и проблемной их ориентацией;

4) выбор и разработка функционально-инвариантных компонентов математического обеспечения САПР, имеющих межотраслевое применение, и разработка на их основе совокупности типовых проектных решений, которые могут быть тиражированы и многократно использованы в проектных САПР;

5) построение САПР преимущественно на технической базе ЕС ЭВМ и периферийных средств и терминальных комплексов на базе СМ ЭВМ, автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Авторами использованы оригинальные результаты работ по созданию подсистем САПР, полученные ими в Институте технической кибернетики АН БССР и Киевском политехническом институте.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7, Головное издательство издательского объединения «Вища школа».

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время практически во всех отраслях науки, техники и промышленности завершился процесс организационного обеспечения работ по созданию систем автоматизированного проектирования (САПР), разработан ряд соответствующих нормативных и руководящих документов, расширилось сотрудничество стран — членов СЭВ в этой области. Поэтому вузы нашей страны приступили к реализации ряда комплексных целевых программ по подготовке квалифицированных кадров для САПР. С 1980 г. введены специализации по подготовке разработчиков САПР в составе специальностей «Электронные вычислительные машины», «Автоматизированные системы управления», «Прикладная математика», «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры», а с 1983 г. — новая специальность «Системы автоматизированного проектирования».

Инженер-разработчик САПР должен уметь проводить анализ конкретной системы проектирования, выбирать и разрабатывать состав технических и программных средств САПР, системное программное обеспечение и информационные банки данных; знать методы теории принятия решений, массового обслуживания, современной дискретной математики, математического программирования, системного программирования, принципы разработки компиляторов и интерпретирующих систем, особенности задач, реализуемых в САПР отраслей; иметь навыки комплексирования технических средств САПР, создания диалоговых и информационно-вычислительных систем коллективного пользования.

В рамках различных инженерных специальностей предусмотрена подготовка инженеров-пользователей САПР, умеющих вести автоматизированное проектирование, конструирование и технологическую подготовку производства. Инженер-пользователь САПР должен уметь разрабатывать модели объектов и процессов конкретной предметной области, разрабатывать пакеты прикладных программ (функциональные модули), работать на устройствах графического и текстового отображения ЭВМ; должен знать технологию проектирования в конкретной области, принципы построения САПР, методы разработки прикладного программного обеспечения, математическое программирование; должен иметь представление об архитектонике вычислительных систем, математическом и информационном обеспечении ЭВМ, организации диалога, машинной графике, методах моделирования.

Исходя из этого разработан курс «Основы построения САПР», включающий наиболее общие принципы, методы и средства, реализуемые в САПР, которому и соответствует настоящий учебник.

1 ОРГАНИЗАЦИЯ САПР И ЕЕ ПОДСИСТЕМЫ

1.1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование — одна из важнейших сфер инженерной деятельности, звено, связывающее научное исследование и практическую реализацию. В соответствии с ГОСТ 22487—77 проектирование — это процесс составления описания, необходимого для создания еще не существующего объекта (алгоритма его функционирования или алгоритма процесса), который осуществляется преобразованием первичного описания (технического задания), оптимизацией заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования, устранением некорректности первичного описания и последовательным представлением описаний детализируемого объекта на различных языках для различных этапов проектирования.

Проектирование соответствует информационному процессу, в котором осуществляется преобразование входной информации о проектируемом объекте, состоянии знаний в рассматриваемой области, предыдущем или аналогичном опыте проектирования в выходную информацию в виде проектных документов, выполненных в заданной форме и содержащих проектные решения или результаты проектирования.

Проектирование можно рассматривать как целенаправленную последовательность актов принятия проектных решений, в результате которых осуществляется построение описания проектируемого объекта с заданной степенью детализации.

Проектная деятельность имеет ряд специфических особенностей:

1. Продуктом проектной деятельности является упорядоченная совокупность сведений, служащих знаковой моделью объекта, в момент проектирования реально еще не существующего.

2. Процедуры проектирования реального объекта соответствуют преобразованию его исходного описания в некотором конечном пространстве.

3. Способы преобразования информации при проектировании нельзя отразить в виде математических соотношений, т. е. невозможно построить строгую математическую модель такого процесса преобразования.

4. Ввиду сложности проектируемых объектов на каждом этапе разработки вовлекаются различные специалисты, что придает проектированию характер коллективной деятельности.

5. Проектируемый объект входит в упорядоченную иерархию объектов и, с одной стороны, выступает как часть системы более высокого уровня, а с другой — как система для объектов более низкого уровня. В соответствии с этим процесс проектирования можно разделить на два этапа: внешнего (объект — часть системы более высокого ран-

га) и внутреннего проектирования (объект — совокупность компонентов).

6. Проектирование, как правило, имеет итерационный многовариантный характер; для принятия проектных решений используются различные научно-технические знания.

Процесс проектирования реализуется в соответствии с определенным планом, который обычно представляется в виде логической схемы (логического графа) построения проекта. Такая схема отображает очередность выполнения основных проектных процедур и операций. Проектная процедура соответствует формализованной совокупности действий, выполнение которых оканчивается принятием проектного решения. Под проектным решением понимается промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования.

Проектная процедура состоит из элементарных проектных операций со строго установленным порядком их выполнения и направлена на достижение локальной цели в процессе проектирования. Проектная операция — это действие или формализованная совокупность действий, составляющая часть проектной процедуры, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур. При этом алгоритм проектирования соответствует совокупности предписаний, необходимых для выполнения проектирования.

Примерами операций являются некоторые вычислительные работы (извлечение корня, решение уравнения и др.), способы интерпретации результатов (например, построение графика, таблицы), виды подготовки данных. Каждая проектная процедура характеризуется набором параметров (группой), включающих в общем случае исходные данные, ограничения, математическую модель, решающую процедуру, проектное решение и критерий оценки проектного решения.

Процедуры проектирования опираются на язык проектирования, который служит средством лингвистического или графического представления и преобразования описания при проектировании.

Существенную роль играет методология проектирования, включающая основные аспекты процесса проектирования. Методология проектирования должна быть: общей, пригодной для широкого круга инженерных задач; способной давать решения для проектирования больших сложных систем; доступной для изучения и использования; гибкой и способной к расширению; обеспечивающей высокое качество проектирования, его надежность и эффективность. Методология проектирования базируется на общей теории систем (например, теории многоуровневых иерархических систем), дискретной математике, теории решений, праксеологии, теории информации и др.

Решение творческих задач при проектировании технических объектов разделяют на эвристические и систематические. Эвристическими называются также такие решения, когда важная часть творческого процесса и получения творческого результата совершается в мозгу человека и не может быть логически получена из предшествующего опыта. Систематическими называются решения, полученные в результате использования методов, стимулирующих «творческую деятель-

ность» (например, метода мозгового штурма, морфологического метода, инверсии, синектики, эмпатии, алгоритма решения изобретательских задач).

Систематические решения базируются на осознанном процессе поиска и решении задачи в результате упорядочения мышления и применения методов активизации мышления. Различий между решениями, полученными эвристическими и систематическими методами, может и не быть. Однако подходы к достижению результата и способы его получения различны. Методы стимулирования творческой деятельности основываются на логике и используют заранее определенную последовательность действий и операций (технологии проектирования).

Декомпозиция проектных задач и системный подход. Для логического процесса творчества характерна декомпозиция — разбиение задачи на составные части. Можно выделить следующие уровни декомпозиции технического объекта:

- системный — наиболее общее описание назначения объекта и его связей с учетом тех изменений, которые объект внесет в окружающую искусственную и естественную среды;
- архитектурный — описание структуры объекта;
- функциональный — описание законов функционирования подсистем объекта, или решение задачи работоспособности объекта как системы заданной структуры;
- конструктивный, или элементный (приборный) — детальный выбор и описание всех элементов системы (объекта).

Возможны и другие подходы к декомпозиции проектируемого объекта, например, для сложных машиностроительных объектов вводят уровни декомпозиции: функционально-структурный, пространственной компоновки, кинематической модели, технической и рабочей модели изделия; для технологических процессов: принципиальной схемы техпроцесса (состава и последовательности этапов обработки деталей), маршрутного процесса (состава и последовательности операций, выбора оборудования, оснастки, норм времени), операционного техпроцесса (детализации состава и последовательности переходов в каждой операции, выбора инструментов, режимов резания, выявления элементов траектории режущего инструмента) [80].

При системном подходе любой объект рассматривается как некоторая система, которую можно разделить на подсистемы. Каждая из этих подсистем может быть разделена на подсистемы более низкого порядка. Подсистемами самого низкого порядка являются элементы, внутренняя структура которых не представляет интереса для решения задач определенного уровня, однако свойства ее влияют на другие подсистемы и систему в целом. Например, при проектировании радиоэлектронных систем элементами являются микросхемы и другие изделия электронной техники, однако при проектировании самих микросхем элементами выступают отдельные транзисторы, диоды и т. д.

Каждая система, в свою очередь, является подсистемой системы более высокого порядка, а та — подсистемой системы еще более высокого порядка. Очевидно, что полностью построенная иерархия системы содержит бесконечное количество систем и подсистем. Однако при решении технической задачи нет необходимости строить всю иерархию

систем, в нее следует включить только системы и подсистемы на два порядка выше и ниже исходного, существенно связанные с проектируемой.

Современное проектирование, в процессе которого используются электронные вычислительные машины, опирается на отработанную технологию проектирования. Последняя позволяет упорядочить в процессе проектирования используемую информацию по вертикали (в соответствии с логической схемой построения проекта) и по горизонтали (в соответствии с системной связью между элементами решаемой задачи).

Определение и классификация САПР. Применение математических методов и ЭВМ при проектировании способствует повышению технического уровня и качества проектируемых объектов, сокращению сроков разработки и освоения их в производстве. Автоматизация проектирования особенно эффективна, когда от автоматизации выполнения отдельных инженерных расчетов переходят к комплексной автоматизации, создавая для этой цели системы автоматизированного проектирования. При этом автоматизация проектирования естественным образом дополняет предшествующие ей автоматизацию производственных процессов и автоматизацию управления и организации производства (АСУ), ставшие в настоящее время реальностью.

Уровень научно-технических знаний в конкретной отрасли обеспечивает различные возможности и границы применения ЭВМ для автоматизации проектирования. Чем глубже разработана теория того или иного класса объектов, тем объективно существуют большие возможности для автоматизации процесса их проектирования.

Среди возможных проектных задач чаще выделяют следующие четыре, связанные с различными типами объектов проектирования:

1. Проектируемый объект может быть скомпонован из готовых элементов и блоков. При этом имеются наибольшие возможности применения ЭВМ для автоматизации процедур документирования, составления спецификаций, хранения архивов, решения задач компоновки объекта из готовых элементов, выбора и оценки различных вариантов и др.

2. Для проектирования объекта нет полного набора готовых компонентов, но существуют аналогичные, из которых изменением параметров можно получить недостающие. ЭВМ в данном случае дополнительно используются для анализа и оценки вариантов построения компонентов, выбора их оптимальных параметров, компоновки и детализации и т. д.

3. В отличие от п. 2 не существует аналогичных элементов, но известны принципы их построения. Применение ЭВМ для автоматизации процессов проектирования объектов этого типа возможно при использовании математических моделей, соответствующих используемым принципам, на которых обрабатываются искомые конструктивные решения.

4. В отличие от п. 3 не известны принципы построения элементов объекта. Опираясь на результаты проводимых фундаментальных и прикладных исследований, при проектировании таких изделий (помимо выполнения научно-технических расчетов) ЭВМ применяется для

моделирования различных физических процессов и явлений, обработки данных и управления модельными и натурными испытаниями и др.

Возрастание сложности проектируемых объектов привело к формированию концепции и методологии автоматизации проектирования, в которых моделирование является одним из основных методов обеспечения проектных работ. Поэтому САПР можно рассматривать как систему, основанную на регулярном применении современных математических методов и средств вычислительной техники в процессе принятия проектных решений в организации и управлении проектированием.

Различают следующие четыре вида САПР:

1. Уникальные САПР, имеющие межотраслевой характер и создаваемые для решения крупнейших народнохозяйственных задач.

2. Универсальные САПР отраслевого назначения с системой коллективного пользования, обеспечивающие проектирование всей номенклатуры технических изделий отрасли (подотрасли). Такие САПР обычно строятся по двухуровневому иерархическому принципу: на первом уровне — мощная ЭВМ с большим объемом памяти и высоким быстродействием; на втором — периферийные ЭВМ, обслуживающие отдельные терминалы, устройства, абонентские пульты. Опыт показывает, что годовой объем проектируемой документации, создаваемый такой САПР, достигает 10 тыс. комплектов с физическим объемом до 100 тыс. документов.

3. Специализированная САПР проектной организации, по существу, также система коллективного пользования, но ориентированная на выполнение наиболее массовых проектных работ по конкретному изделию и реализованная на средних ЭВМ серии ЕС и ЭВМ серии СМ. С помощью таких систем проектировщик получает возможность использовать эффективные математические модели, методы моделирования и оптимизации на всех основных стадиях проектирования заданного объекта (например, электрической машины, запоминающего устройства, радиотехнической аппаратуры).

4. Индивидуальные САПР, реализованные на мини- и микро-ЭВМ, предназначенные для выполнения отдельных видов инженерных расчетов и проектных работ (например, выполнения чертежно-графических работ, проектирования программного обеспечения микропроцессорных систем, проектирования печатных плат, проведения механико-прочностных расчетов). Условно к этому типу САПР можно отнести Автоматизированные Рабочие Места (АРМы), построенные на мини-ЭВМ.

Система автоматизированного проектирования представляет собой организационно-технический комплекс, состоящий из большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих компонентов. Основной функцией САПР является осуществление автоматизированного проектирования объектов и их составных частей на основе применения математических и других моделей, автоматизированных проектных процедур и средств вычислительной техники.

Интегрированная САПР выполняет проектирование объекта от первичного описания до выдачи проекта с необходимым комплексом документации в едином технологическом цикле.

Таблица 1. Основные компоненты САПР

Виды базовых обеспечений	Компоненты	Основа построения
Методическое (Математическое и лингвистическое)	Теории, методы, способы, математические модели, алгоритмы, терминология, нормативы, алгоритмические и специальные языки, обеспечивающие методологию проектирования в САПР	Перспективные методы проектирования, эффективные математические модели проектируемых объектов и их элементов, применение методов многовариантного проектирования и оптимизации
Программное	Общесистемные и прикладные программы и эксплуатационные документы, предназначенные для получения проектных решений	Адаптируемость к различным конфигурациям ЭВМ и их операционным системам, модульность построения, обеспечение мультипрограммной работы, режим диалога, режим разделения времени
Техническое	Устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства или их сочетания, обеспечивающие функционирование САПР	Серийные средства вычислительной техники общего назначения и другие современные технические средства
Информационное	Базы данных и средства управления базой данных (СУБД), образующие автоматизированные банки данных (АБД)	Возможность логической структуризации данных по формальным признакам, гибкость организации и открытость структуры, защита данных
Организационное	Правила и приказы, регламентирующие права, обязанности и функции участников разработки и эксплуатации САПР: проектировщиков-пользователей САПР, программистов, операторов ЭВМ и внешних устройств, операторов банка данных и администратора САПР	Прогрессивные методы организации проектирования, современные методы планирования и материального стимулирования

САПР создается и функционирует в проектной организации или на предприятии как самостоятельная система. Однако она может быть связана с подсистемами и банками данных других автоматизированных систем: с автоматизированной системой для научных исследований (АСНИ), обеспечивающей получение и обработку математических моделей для различных объектов и процессов; с автоматизированной системой управления (АСУ), организующей проектирование и распределение ресурсов на проектные работы; с автоматизированной системой управления производством (АСУП), изготавливающим проектируемый объект. Научно-технический уровень САПР во многом определяется этими связями, их полнотой и интенсивностью.

САПР следует рассматривать как постоянно развивающуюся (эволюционную) систему, в которой опыт и интуиция проектировщика постоянно передаются машинной среде. При этом в ЭВМ создается определенная модель процесса проектирования, а сам человек под воздействием информационно-программной среды САПР интенсифици-

рует свой труд и поднимается на более высокий интеллектуальный уровень.

В соответствии с ГОСТ 23501.0—79 в любой автоматизированной системе проектирования регламентируются следующие базовые обеспечения: методическое, программное, техническое, информационное и организационное, компоненты которых приведены в табл. 1.

САПР отличается от обычной системы проектирования прежде всего тем, что в ней с помощью ЭВМ частично или полностью автоматизированы процедуры подготовки и обработки информации, выбора принципов действия технических объектов и принятия решения, выполнения расчетно-вычислительных работ, проектирования документации. Заметим, что термин «система проектирования» не является синонимом понятия «конструкторское бюро», он охватывает только ту сторону деятельности разрабатывающего подразделения, которая непосредственно связана с проектированием и получением проектных документов.

Система автоматизированного проектирования в сравнении с обычной характеризуется рядом свойств, обусловленных широким применением ЭВМ: модифицированной организационной структурой. специализацией работников по выполняемым видам работ, полной механизацией и автоматизацией рутинных операций, широким использованием технических средств проектирования, высоким профессиональным уровнем проектировщиков — пользователей, ориентацией на более творческие процедуры генерации вариантов решения и гипотез.

1.2. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРУКТУРА САПР

Базовые проектные процедуры. Общая технология проектирования различных объектов, процессов, систем предусматривает ряд основных стадий разработки (рис. 1).

Реальная потребность в объекте обуславливает постановку задачи проектирования, определенной исходной ее формулировкой. Однако сущность задачи в этой формулировке часто выражена недостаточно четко. Поэтому необходим этап уточнения задания для решаемой технической задачи (ТЗ), выделение функций проектируемого объекта (системы) и выявление действительных ограничений при его проектировании.

Поскольку поиск решений в случайно выбранном направлении обычно не приводит к нужному решению, вводится специальный этап определения направления поиска. Далее в выбранных перспективных направлениях организуется поиск решений на базе методов стимулирования творчества, позволяющих в течение короткого промежутка времени найти большое число новых и оригинальных решений для технической задачи. Из множества решений, полученных в результате поиска, выбирается лучшее с помощью определенной процедуры на основе технико-экономических показателей.

Предварительное проектирование начинается с выбора структуры объекта и материально-энергетических средств его реализации, определения характеристик объекта и составляющих его звеньев.

На этапе эскизного проектирования производится дальнейшее уточнение и конкретизация структурной схемы объекта, а также детальный анализ характеристик используемых технических средств и их оптимизации. С этой целью решаются задачи инженерного синтеза и анализа, при этом синтез охватывает формирование принципов реализации и конкретизацию технических решений, а анализ включает проведение исследований (на математической модели или прототипе объекта) и их оценку. Оценки сопровождаются принятием решения, являющимся необходимым компонентом процесса проектирования и связанным с поиском компромиссных решений.

Одна из основных целей проектирования заключается в оптимизации решений, т. е. в достижении заданных показателей проектируемого объекта при наименьших затратах или наилучших показателей объекта при ограниченных затратах имеющихся ресурсов. Сущность оптимизации сводится к отысканию при наложенных ограничениях таких структур и значений переменных параметров объекта, которые дают минимум (максимум) некоторой целевой функции, характеризующей комплексную эффективность проектируемого объекта. При оптимизации используется мощный аппарат математических методов оптимизации [12, 79]. Процесс оптимизации характеризуется дискретным выбором структуры и непрерывным поиском (детерминированным или случайным) направления изменения переменных параметров и постепенным приближением к оптимальному решению за счет количественного изменения величин переменных параметров. Существенным при этом является улучшение отдельных показателей (подсистем) объекта с учетом влияния процедуры оптимизации на другие подсистемы и объект в целом.

На этапе технического проектирования выпускается конструкторская и технологическая документация, необходимая для изготовления опытной партии объектов в заводских условиях. Отметим однотипность проектных процедур, выполняемых на этапах предварительного, эскизного и технического проектирования [49]. Эта однотипность распространяется на процедуры регенерации и конкретизации принципов и вариантов решения; создания модели объекта (или его фрагмента) для исследования (инженерного анализа) и оптимизации; принятия проектных решений. Существенно, что при переходе от этапа

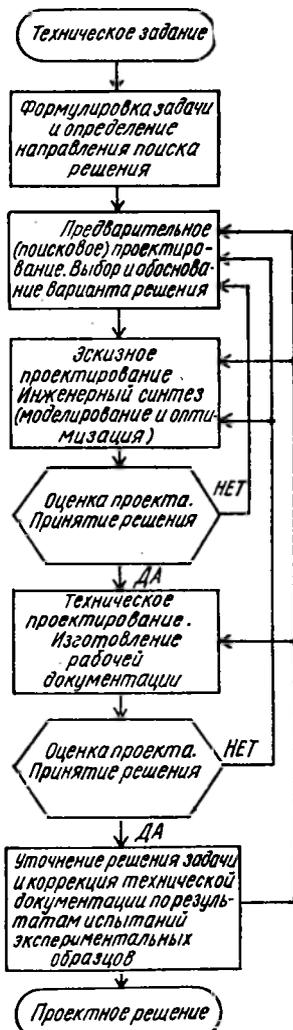


Рис 1. Типовая логическая схема процесса проектирования.

Рис. 2. Итерационный алгоритм процесса проектирования на каждом уровне декомпозиции.

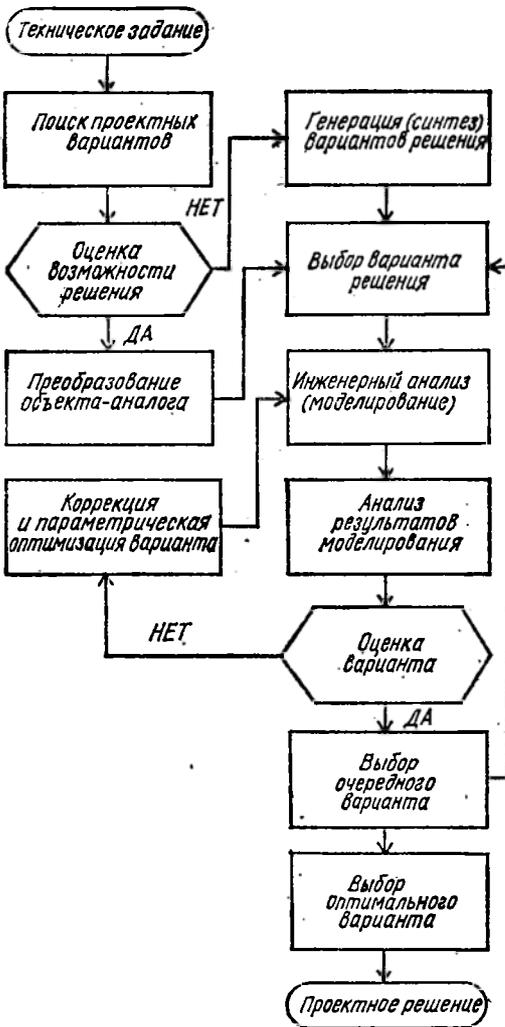
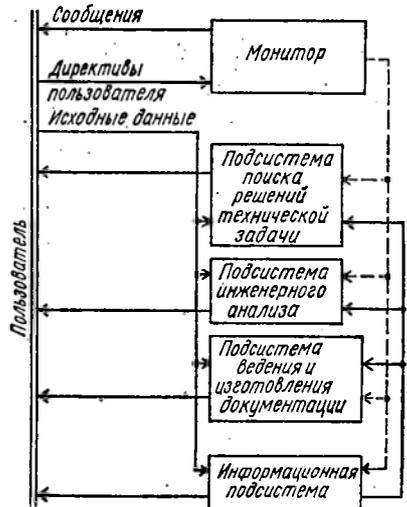


Рис. 3. Базовые подсистемы САПР.



к этапу происходит уточнение моделей и углубление анализа и как следствие приближение объекта к заданным в техническом задании характеристикам. При этом модели строятся в виде математических, информационно-графических (описаний, схем, чертежей) или макетов, экспериментальных и опытных образцов.

Если декомпозицию процесса проектирования провести не по этапам предварительного, эскизного и технического проектирования, а по уровням (системному, архитектурному, функциональному, конструктивному), то однотипность и инвариантность используемых процедур проектирования сохраняется. Структурная схема итерационного алгоритма процесса проектирования при этом содержит укрупненные проектные операции и процедуры (рис. 2).

Из-за отличающейся степени детализации проектных решений на

отдельных уровнях декомпозиции используются разные методы моделирования, оценки и отбора проектных решений.

Логические схемы процессов проектирования даже для одного и того же класса объектов могут во многом различаться. Факторами, влияющими на архитектуру процесса проектирования, являются исторически сложившийся опыт проектной организации, творческий почерк генерального конструктора, особенности конструкции и эксплуатационных характеристик проектируемого объекта и др.

Подсистемы САПР. Основными структурными звеньями САПР являются подсистемы. Подсистемой САПР называют выделенную по некоторым признакам часть САПР, обеспечивающую выполнение некоторой законченной проектной процедуры с получением соответствующих проектных решений и проектных документов.

Указанные базовые этапы и процедуры проектирования реализуются следующими подсистемами преобразования информации, входящими в состав САПР (рис. 3).

Информационная подсистема. Основная задача этой подсистемы состоит в сборе, хранении, поиске, упорядочении, пополнении, выдаче всей необходимой для обеспечения процесса проектирования информации. Применение ЭВМ позволяет создавать базу данных как совокупность упорядоченных комплексных сведений о проектируемом объекте, включающих: мировой научно-технический уровень, фиксируемый в виде публикаций, описаний патентов и изобретений; фонд методов генерации вариантов решения, включая синтез новых принципов действия с библиотекой физических эффектов; методики проектирования, представляющие собой формализованный коллективный опыт специалистов в данной области; описания параметров и характеристик проектируемого объекта, его моделей для различных стадий проектирования; архив, хранилище накопленного в системе опыта в виде уже имеющихся решений как всей задачи в целом, так и ее отдельных фрагментов; описания типовых элементов, комплектующих изделий, материалов; руководящие и справочные данные, нормативы, стандарты, положения и другие данные, регламентирующие процесс проектирования.

Имеется система управления базой данных, реализованная в банке данных, регулирующая механизм доступа к ним (запись, объединение, стирание или выдачу информации) в зависимости от запросов и их приоритетов, машинных ресурсов и т. д.

Очевидно, что чем большим количеством информации обладает САПР, тем большее количество знаний переходит в проектируемый объект, а значит, тем большее количество живого и овеществленного труда будет сэкономлено в ходе разработки, организации производства и эксплуатации проектируемого объекта. С этой точки зрения процесс проектирования — это непрерывное потребление и переработка информации, в результате чего производятся генерирование и отбор вариантов построения проекта, его анализ и оптимизация.

Построение базы данных — сложный и трудоемкий процесс, определяющий во многом эффективность функционирования системы. Формализация предметной области САПР должна быть зафиксирована в словаре понятий, который описывает объекты САПР, определяет

их семантическое значение и представление в системе. Взаимосвязь понятий предметной области отражается в информационно-логической модели объекта, описывающей их реальные свойства и взаимоотношения с учетом решаемых задач и модульности построения базы данных. Информационно-логическая модель объекта с учетом типа и ограничений, накладываемых системой управления базами данных, представляет собой отображение реального объекта проектирования в выбранную базу данных. База данных со своей системой управления образуют банк данных (БД).

Информационная подсистема пополняется данными, получаемыми пакетами проектирующих программ, и из нее извлекается информация для последующих ручных и автоматических этапов проектирования. Наличие в САПР информационной подсистемы позволяет иметь избыточную, полную и актуальную информацию о проекте, сократить объем и повысить достоверность данных, использовать средства, предоставляемые системой управления, для ведения базы данных, защиты информации от несанкционированного доступа и др.

Важной характеристикой САПР является степень ее информационной связи с окружающей средой. Система называется статической, если в процессе проектирования не требуется информация о текущем состоянии внешней среды в данный момент времени, и динамической, если при функционировании система непрерывно потребляет информацию о состоянии внешней среды из источников, находящихся в системе проектирования.

Понятно, что разработка информационной подсистемы и ее отдельных компонентов (структур данных, структур памяти, систем управления, характера обмена с пользователями, видов управления, характера обработки), а также ее эксплуатация, постоянное совершенствование и пополнение выходит за пределы возможностей проектировщика конкретных технических объектов, квалифицированного специалиста в своей области. К тому же это частная задача использования универсальных средств современных информационно-вычислительных систем, решаемая специалистами соответствующего профиля, входящими в организационную структуру системы автоматизированного проектирования. Например, можно рекомендовать для использования в САПР систему управления базами данных ИНЕС, разработанную ВНИСИ и Институтом проблем управления и предназначенную для создания автоматизированных систем обработки данных в виде банков данных.

Подсистема поиска решений технической задачи. Потребность в поиске и разработке новых технических идей и решений возникает на начальных стадиях проектно-конструкторских разработок, при поиске альтернативных вариантов будущих решений для технических объектов, обладающих патентноспособностью, и пр. Условно можно выделить два класса задач: поиск новых принципов действия (ПД) технических объектов (ТО) и поиск вариантов решения (ВР) при известных принципах действия. В инженерной практике чаще приходится решать задачи второго класса. В настоящее время существуют различные методики поиска решения технических задач с применением ЭВМ. С одной стороны, это позволяет сделать поиск более целенаправлен-

ным и осозанным, а с другой — повысить эффективность его выполнения, программно реализовать некоторые элементы поиска решений, относящихся к формальным действиям.

Эффективность применения методов и автоматизированных систем генерации рациональных вариантов решения технической задачи можно оценить по следующим основным показателям:

в несколько раз (иногда в десятки и сотни) сокращается время разработки конструктивных решений для создаваемых или модернизируемых изделий, при этом программное обеспечение подсистемы поиска и выбора технических решений может быть использовано при проектировании объектов различных классов;

генерируются решения, близкие к глобально оптимальным, в связи с этим повышается качество проектируемых и конструируемых изделий (в среднем на 20...30 %, а иногда и в несколько раз).

Методы автоматизированной генерации решений повышают интеллектуальные способности и творческую активность проектировщиков. Количество возможных вариантов решений инженерных задач зависит от стадии их разработки. Наименьшее число вариантов решений существует на стадии разработки принципа действия объекта, наибольшее — на стадии его конструкторского исполнения. Но ошибки в выборе принципа действия приводят, как правило, к повторному полному циклу проектирования, а ошибки на стадии конструкторского исполнения устраняются незначительными изменениями конструкции и тысячами переделками.

Разработка вариантов решения технической задачи соответствует творческому этапу проектирования, при реализации которого проектировщик использует все свои знания и умение. Поэтому автоматизация решения этой задачи представляет одно из важнейших направлений в проблеме искусственного интеллекта.

Учитывая важность этой подсистемы, в организационной структуре САПР желательно предусмотреть группу специалистов в данной области, пополняющей рассматриваемую подсистему новыми алгоритмами творчества, учитывающими как особенности характера и структуры решаемых задач, так и особенности психической деятельности человека. С этой точки зрения можно говорить о потенциальной возможности настройки САПР на конкретного проектировщика-конструктора, при которой предусматривается оптимальное сочетание его личности с возможностями, представляемыми САПР.

Подсистема инженерного анализа (моделирования объекта и оптимизации его характеристик). Основное назначение подсистемы — выполнение всех вычислительных работ, связанных с детализацией выбранного варианта решения проектной задачи. Важность такой базовой подсистемы определяется общей тенденцией математизации науки и техники, при этом, как правило, использование более сложных моделей объектов и более мощных вычислительных методов позволяет значительно приблизить показатели модели к действительным показателям объекта. Вычислительные методы сегодня используются и при решении задач, где еще недавно преобладали преимущественно интуитивные методы (примерами являются задачи разработки внешнего вида объекта, пространственного проектирования). Арсенал вычисли-

тельных методов постоянно пополняется, многие инженерные задачи проектирования стимулируют разработку новых подходов и методов, новых критериев и алгоритмов.

Возможны различные виды моделей, используемых для выбора параметров объекта:

- Аналитические (детерминированные — непрерывные и дискретные, стохастические), причем этапам эскизного, технического, конструкторского и технологического проектирования соответствуют свои модели.

- Имитационные, если объект отличается неопределенностью функционирования. Такие модели воспроизводят процесс функционирования проектируемого объекта, а оценка различных вариантов проектных решений при изменении управляющих переменных позволяет найти наиболее приемлемый.

- Эвристические и игровые модели, когда объект характеризуется неопределенностью функционирования и не установлены значения его параметров. В таком случае используется интуитивный выбор решения в условиях неполной информации.

В процессе проектирования рассмотренные модели используются в обратном порядке: от самых общих до самых точных.

Так как методика проектирования постоянно уточняется и модифицируется, то структура САПР должна допускать возможность изменения отдельных частей системы без изменения остальных составляющих или с их незначительными изменениями. Этим требованиям наиболее полно отвечают функциональные структуры САПР, называемые интегрированными. Такие системы характеризуются модульным принципом построения математического обеспечения, наличием встроенных операционных систем и набором альтернативных проектных процедур и их оценок на различных этапах процесса проектирования.

Разработку и эксплуатацию подсистемы инженерного анализа выполняют специалисты соответствующих профилей, входящих в организационную структуру САПР. Однако проектировщик-пользователь САПР взаимодействует с этой группой специалистов, поскольку только он может уточнять и формировать математические модели проектируемых объектов, предлагать модификации методики проектирования, исходя из возможностей, обусловленных новыми вычислительными и проектными процедурами.

Подсистема ведения и изготовления документации. Проектно-конструкторская документация, в которой отображен будущий объект, является основным результатом функционирования системы проектирования. Назначение подсистемы ведения и изготовления документации состоит в обеспечении получения проектных документов (чертежей, технических описаний, схем, графиков, таблиц), необходимых для создания объекта проектирования. Разработка и изготовление документации составляет обычно 45 ... 60 % всех затрат, причем это наиболее однообразная и утомительная работа. Автоматизация этих процессов позволяет сократить затраты труда и времени и сравнительно легко обеспечить внесение во все части проектной документации изменений и коррекций.

Автоматическое проектирование документации, полностью заменяющее человека на этих операциях, осуществляется с помощью современных технических средств: чертежных автоматов и графопостроителей, устройств микрофильмирования, репродукционирования и др.

Данной подсистемой осуществляется компоновка документов, т. е. разбиение его на страницы стандартного формата, размещение графических символов на поле одной страницы, проведение соединительных линий между размещенными графическими символами.

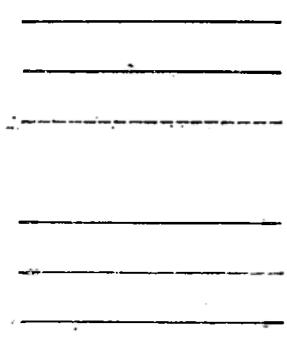
Используемые для получения документации устройства можно разделить на два типа: 1) быстродействующие дисплеи и АЦПУ, позволяющие организовать контроль за качеством изготовления документации и оперативно вносить в ее изменения; при этом АЦПУ обладает ограниченным алфавитом, снижающим качество окончательного документа, а в случае применения дисплеев требуется дополнительное оборудование для получения точной копии; 2) медленные графопостроители (часто с печатающей головкой), дающие возможность получить графическую документацию в законченном виде.

Образцы некоторых документов, полученных, например с помощью графопостроителя, приведены на рис. 4, 5, 6 и 7.

Отличительная черта современных САПР проявляется в том, что они ориентированы на сквозную автоматизацию, предусматривая при выпуске проектной документации для объектов одновременное изготовление машинных носителей информации для технологических автоматов гибкого автоматического производства (ГАП), на которых предусматривается изготовление объекта (станков с числовым программным управлением, обрабатывающих центров, промышленных роботов, программ для ЭВМ группового управления оборудованием, контрольных автоматов и т. п.).

Рассмотренные подсистемы составляют основу новой технологии автоматизированного проектирования инженерных объектов и являются, по существу, инвариантными по отношению к объекту проектирования. Описанную технологию проектирования применяет проектировщик, которому достаточно знать только правила записи технического задания на проектирование с помощью специальных языков описания объекта и директив управления системой, чтобы инициировать процесс обработки и отображения информации в САПР. Специальные диалоговые средства (гл. 2, п. 1) позволяют ему оперативно получать промежуточные результаты в процессе решения задачи и иметь возможность влиять на ход ее решения, не прерывая вычислительного процесса. Средством доступа и взаимодействия пользователя с ЭВМ является терминальное устройство (терминал), в качестве которого могут быть телетайпы, дисплеи и пр.

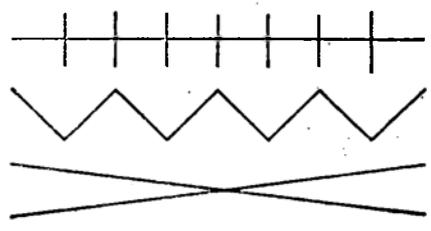
Можно выделить и другие подсистемы в САПР, которые в общем случае подразделяются на объектно-ориентированные, осуществляющие проектирование некоторого объекта на определенной стадии проектирования (например, проектирования частей зданий и сооружений, технологического проектирования, конструирования деталей), и инвариантные (объектно-независимые) подсистемы. Последние осуществляют функции управления и обработки информации, не зависящие от особенностей проектируемого объекта (диалоговых процедур,



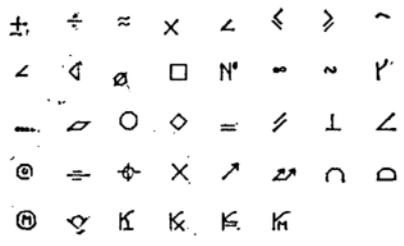
75 ТИПОВ ЛИНИЙ



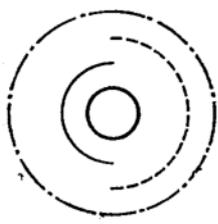
75 ТИПОВ СПЕЦСИМВОЛОВ



ЛИНИИ ОРТОГОНАЛЬНЫЕ, ДИАГОНАЛЬНЫЕ И ПРОИЗВОЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ



СИМВОЛЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ СОГЛАСНО ГОСТ 2.309-68



ДУГИ И ОКРУЖНОСТИ

А Б В Г Д Е Ж

ЗЕРКАЛЬНЫЙ ТЕКСТ
ЗЕРКАЛЬНЫЙ ТЕКСТ

АЛФАВИТНО-ЦИФРОВЫЕ СИМВОЛЫ РУССКОГО, ЛАТИНСКОГО И ГРЕЧЕСКОГО АЛФАВИТОВ ДЕВЯТИ МАСШТАБОВ, ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ, ПРЯМЫМ И ЗЕРКАЛЬНЫМ ОТБРАЖЕНИЕМ ПО ОСЯМ КООРДИНАТ

α β γ δ ε ζ η

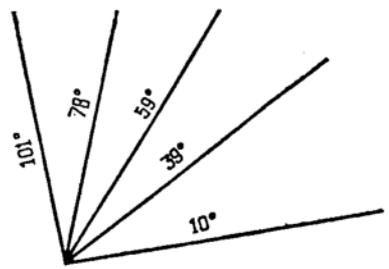


Рис. 4. Элементы графического отображения.

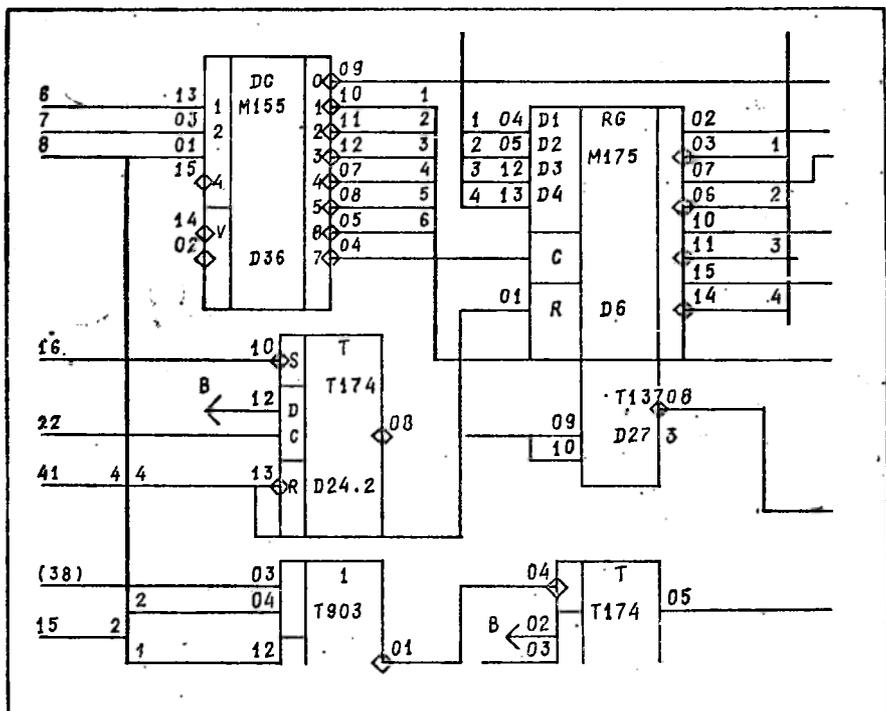


Рис. 5. Фрагмент электрической схемы.

численного анализа, оптимизации, информационно-поисковых процедур, ввода/вывода графической информации).

Подсистемы и компоненты САПР соединяются и взаимодействуют друг с другом под управлением операционной программы проектирования, отображающей логическую схему построения проекта, в соответствии с директивами пользователей системы. Подвергаясь воздействию проектных процедур, модель проекта развивается, накапливая и структурируя поступающую все более детальную проектную информацию таким образом, чтобы в любой момент предоставить ее в распоряжение конструктора или какой-либо из программ системы. Такой организацией системы достигается решение важнейшей задачи разработчиков САПР — обеспечение единства модели проекта на всех фазах и стадиях процесса проектирования. Наличие общего для всех программ образа проектируемого объекта существенно отличает САПР от простого объединения разрозненных программ, каждая из которых требует специфического описания данных о проекте.

Системе автоматизированного проектирования свойственно следующее: информационная модель проекта строится в памяти ЭВМ при выполнении проектных процедур с помощью ЭВМ; развитие модели происходит в результате непосредственного взаимодействия с ее различными группами пользователей, что делает описание проекта более детализированным; по указанию пользователя модель проекта может

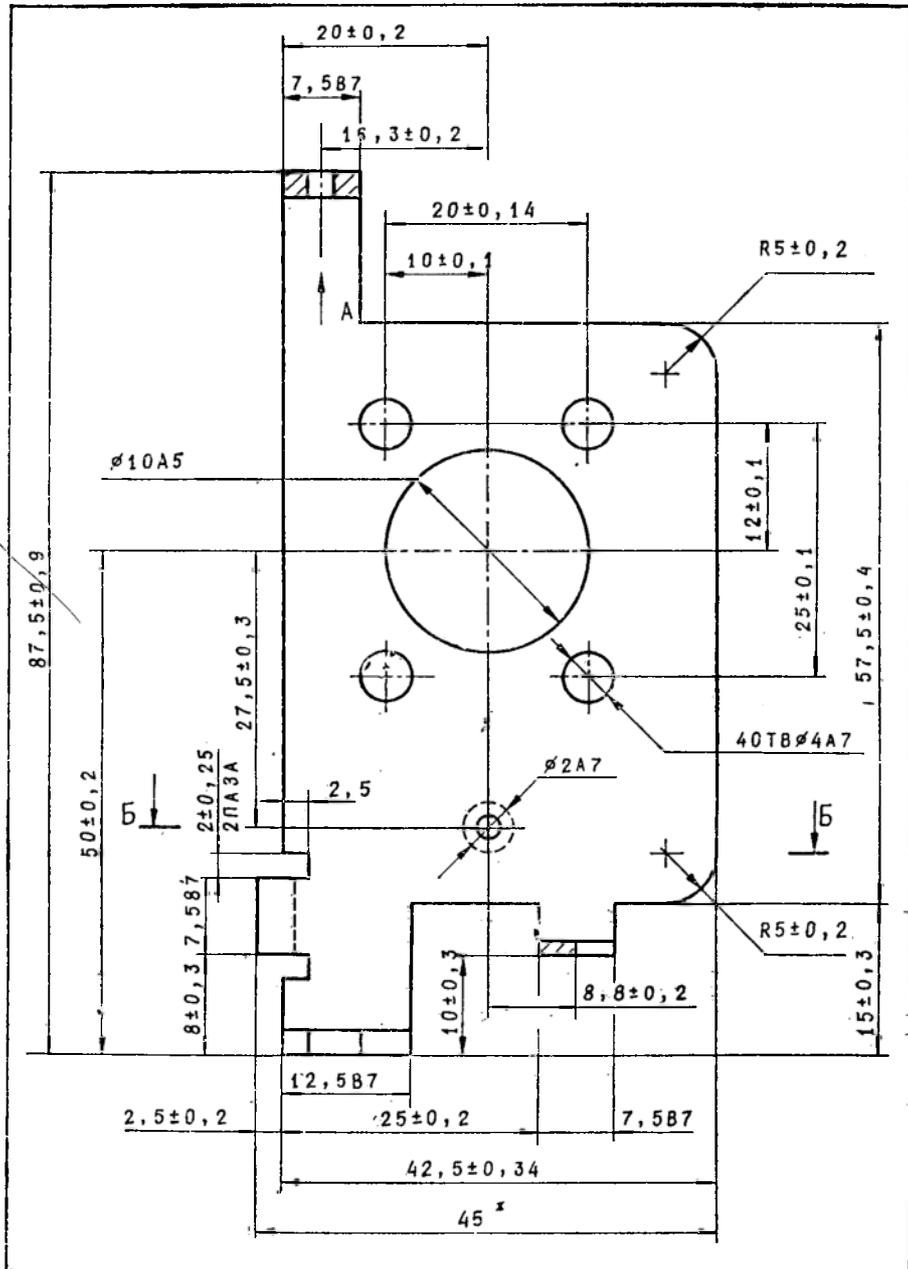


Рис. 6. Фрагмент машиностроительного чертежа.

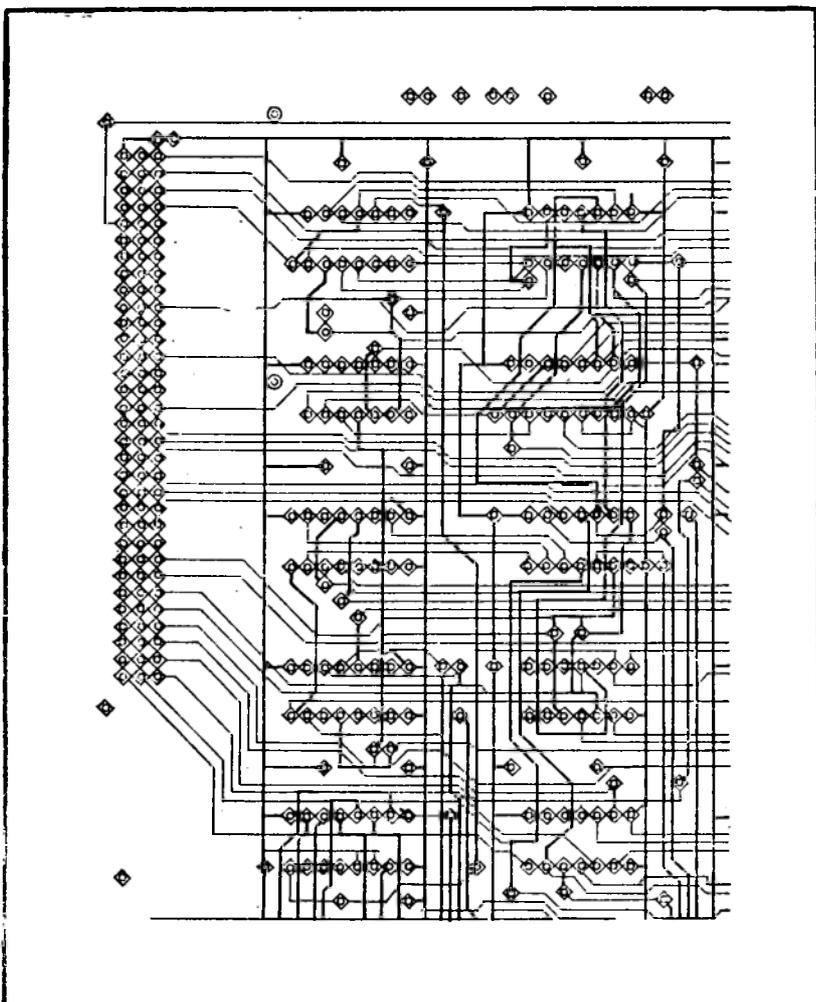


Рис. 7. Фрагмент печатной платы.

быть подвергнута любой из процедур, находящихся в библиотеке системы.

● *Проектирование* — это творческий процесс коллектива специалистов различного профиля, объединенных в рамках единой проектной организации. Это объединение определяется иерархической системой моделей проектных процедур, а также системой терминальных устройств, распределение, состав и функциональные характеристики которых соответствуют функциям основных структурных подразделений проектной организации. С помощью этих устройств обеспечивается одновременный и независимый дистанционный доступ всем категориям пользователей к центральной части системы, что позволяет им выполнять с помощью ЭВМ основные проектные процедуры и операции по развитию проекта и управлению системой в целом.

минимизации расхождений измеренных характеристик объекта и характеристик, вычисленных на основе его модели. Методы структурной и параметрической идентификации объектов и их компонентов являются составной частью каждой конкретной предметной области.

Совокупность моделей объекта на структурном, логическом и количественном уровнях моделирования представляют собой иерархиче-

Таблица 12. Сравнительные характеристики различных видов моделирования

Показатели	СхМ	АдМ	ФЛМ	СМ
Уровень	Приборный (транзистор)	Функциональный (инвертор)	Функциональный (инвертор, счетчик, регистр)	Функциональный (устройство, блок)
Модель	Аналитическая (микромодель)	Аналитическая (макромодель), регрессионная, факторная	Функциональная, структурно-функциональная	Информационная, вероятностно-эвристическая
Переменные	$u(t), i(t)$ (погрешностью 1%)	$u(t), i(t)$ (погрешность 20%)	1, X, 0, задержки	Система команд и сигналов управления (0%)
Связь с технологией	Высокая (100%)	Слабая (80%)	Очень слабая (20%)	Методы массового обслуживания, искусственного интеллекта, теории дискретных систем
Алгоритм моделирования	Численные методы решения различных типов уравнений	Численные методы, методы экстраполяции и аппроксимации, математической статистики, планирования эксперимента	Методы математической логики и событийного моделирования	Методы массового обслуживания, искусственного интеллекта, теории дискретных систем
Используемые процедуры	Арифметические	Арифметические	Логические	Логические
Максимальная сложность объекта инверторов	30...50	3000	20 000	1 000 000

скую систему моделей, раскрывающую взаимосвязь различных описаний объекта и обеспечивающую связность его элементов и свойств в процессе проектирования. При переходе на более высокий уровень абстрагирования данные о моделируемом объекте свертываются, при переходе к более низкому уровню описания — детализируются.

В табл. 12 приведены сравнительные характеристики различных моделей, используемых в процессе автоматизированного проектирования электронных схем, выделены уровни схмотехнического (СхМ), адекватного (АдМ), функционально-логического (ФЛМ) и системного (СМ) моделирования.

Из данных табл. 12 видна тенденция свертки данных и уменьшения степени связи с порождающей средой (технологией) по мере перехода на более высокие уровни абстрагирования за счет повышения быстродействия процесса моделирования.

целесообразный уровень автоматизации, который во многом определяется наличием адекватной математической модели задачи. Далее составляется план процесса проектирования, затем намечаются этапы проектирования и реализации соответствующего технического, информационного и программного обеспечения, комплексной отладки и опытно-промышленной эксплуатации САПР.

Разработкой, внедрением, эксплуатацией и модернизацией подсистем и компонентов САПР занимается специализированное подразделение — служба САПР, создаваемая в проектных организациях и включающая группы специалистов соответствующих специальностей.

Создание и развитие САПР осуществляется самой проектной организацией с привлечением при необходимости других организаций — соисполнителей, в том числе научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений.

Создание САПР — сложная и длительная работа, выполнить которую может только высококвалифицированный и большой коллектив разработчиков. Однако, в отличие от АСУ, ее существенная эффективность реализуется уже после внедрения первых очередей САПР.

Разработка САПР имеет ярко выраженную отраслевую специфику. Поэтому для проведения единой технической политики по созданию САПР при министерствах или ведомствах выделены головные организации по САПР из числа ведущих научно-исследовательских или проектно-конструкторских организаций министерства. Головная организация по САПР создает и развивает отраслевую систему автоматизированного проектирования, обеспечивает создание и развитие отраслевого фонда компонентов методического, программного, информационного и организационного обеспечения САПР.

Возможность тиражировать, широко распространять в проектных и конструкторских организациях наиболее прогрессивные, а также типовые и стандартные методы расчетов, предопределяет высокую эффективность САПР. Даже небольшая проектная организация получает возможность применять самые совершенные и современные методы инженерных расчетов, заимствуя их у организаций-разработчиков САПР.

Высокая эффективность САПР обусловила действенную межведомственную кооперацию проводимых разработок по САПР, а также международную кооперацию по этим вопросам в рамках координационных планов Межправительственной комиссии по сотрудничеству социалистических стран в области средств вычислительной техники (МК СВТ).

Система автоматизированного проектирования может быть универсальной или специализированной. Универсальная (многофункциональная) САПР наиболее широко применима, однако ее создание гораздо дороже и сложнее по сравнению со специализированной САПР.

Крайности в выборе типа САПР связаны с недооценкой общих законов развития технических систем. На текущем этапе развития системы определенного класса, предназначенные для решения заданной совокупности задач, включает как универсальные (многофункциональные), так и специализированные компоненты. Непрерывное повышение требований и расширение класса решаемых задач приводит к быстрому росту количества специализированных компонент подсистем.

В машиностроении средствами автоматизированного проектирования выполняется: формирование общего вида изделий; моделирование сложных технических кривых и поверхностей; конструкторские расчеты деталей машин (синтез зубчатых передач, расчеты валов, выбор подшипников качения); проектирование и конструирование инструментов, штампов и станочной оснастки; расчет режимов резания и нормировки технологических процессов механической обработки деталей.

В строительстве автоматизированное проектирование охватывает: планировку генеральных планов городов, дорог, промышленных зданий; архитектурно-строительное проектирование промышленных предприятий и их компоновочные решения; расчет железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности; проектирование водопроводных, канализационных и других инженерных сетей; расчет мостовых, ферменных и стержневых систем.

2 ТЕХНИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

2.1. ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС САПР

Центральное место в САПР занимает технический комплекс. От типов составляющих его элементов и их структуры зависят возможности системы, виды и объем услуг, оказываемые ЭВМ.

Основной составляющей технического комплекса является процессор, который выполняет арифметические и логические операции, управляет последовательностью выполнения команд, организует обмен с устройствами ввода/вывода информации и имеет средства обращения к оперативной памяти. К основным элементам технического комплекса также относятся внешняя и внутренняя (оперативная) памяти, устройства ввода/вывода информации, устройства коммутации и связи и др.

Средства вычислительной техники. Технический комплекс современных САПР (например, САПР предприятия и САПР пользователя) создается на базе средств вычислительной техники общего назначения, разрабатываемых в рамках ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ.

Единая система ЭВМ (ЕС ЭВМ) представляет собой семейство конструктивно, информационно и программно-совместимых моделей ЭВМ третьего поколения, позволяющее обеспечить любые потребности пользователей [24].

В состав системы входят модели процессоров, работающих со скоростью от нескольких тысяч до 5 млн. операций в секунду (табл. 2).

ЕС ЭВМ имеют общий для всех моделей состав периферийных устройств, которые обеспечивают: ввод и вывод данных на перфокартах и перфолентах; вывод данных на печать; ввод, вывод и запоминание данных на магнитных лентах, магнитных дисках и магнитных барабанах; связь с абонентами по телефонно-телеграфным линиям с

ЕС-1040	ЕС-1045	ЕС-1050	ЕС-1060	10-1065
250 тыс.	800 тыс.	450 тыс.	1,5 млн.	5 млн.
7	1	2	0,6	0,228
1,4...1,8	0,4...0,5	0,65	0,2...0,3	0,14
128...1024	2048...4096	124...1024	1024...8126	4096...8126
100 25	100 25	100 25	100 25	100 25
50...200	100...450	100...450	100...450	100...450
1200	1500	1300	1500	1500

В ЕС ЭВМ принята побайтная адресация при 24-битовом адресе, позволяющая адресовать память с емкостью 16,8 Мбайт.

Команды ЕС ЭВМ имеют пять форматов, коды которых определяют в общих чертах местонахождение участвующих в операции операндов, и используют разные способы адресации: непосредственную, относительную и косвенную. В зависимости от формата команды могут быть безадресными, одно-, двух- и трехадресными. Полный набор содержит 144 команды для арифметических действий над числами с фиксированной и плавающей запятой, команды логических операций, операций управления и обмена, десятичной арифметики и логических операций с данными переменной длины. Машина ЕС-1035 имеет 172 команды.

Система прерывания позволяет прервать работающую программу и перейти к обработке новой. Старое состояние программы запоминается, и она возобновляется после обработки программы прерывания.

Различают следующие классы прерываний: ввода/вывода, программные, внешние, от схем контроля, прерывания при обращении к супервизору (управляющей программе). С помощью системы прерываний организуется одновременная работа центральных и периферийных устройств, автоматическое проведение многопрограммной обработки, автоматизируется процесс отладки программ, создаются удобства общения пользователя с ЭВМ. Кроме того, система прерываний синхронизирует вычислительный процесс с текущим временем с помощью таймера и позволяет вмешиваться в работу ЭВМ.

Для ЕС ЭВМ создана развитая система программного обеспечения, включающая комплекс программ технического обслуживания, операционные системы, трансляторы с алгоритмических языков различного уровня и пакеты прикладных программ. Совместимость программирования, стандартизация команд и кодов, принятая на ЕС ЭВМ, обуславливают широкое распространение этих машин в различных областях;

Средние машины этого ряда (ЕС-1035, ЕС-1045) имеют встроенный адресный транслятор, преобразующий логические адреса программ в физические, т. е. имеют виртуальную память. Все машины Ряда-2 имеют в составе центрального процессора быстродействующую память на интегральных схемах (локальную память). Крупные модели (ЕС-1060, ЕС-1065) имеют повышенную пропускную способность мультиплексных и селекторных каналов.

В САПР используется также система малых ЭВМ (СМ ЭВМ), которые по ряду показателей не уступают средним ЭВМ (табл. 3).

Таблица 4. Основные характеристики микро-ЭВМ

Показатели	НЦ-03Т	НЦ-80-01	Э-60	К1-10	ПС-300	СМ-1800
Разрядность, бит	16	16	16	8	16	8
Быстродействие, тыс. операций/с	150	300	200	300	50	350
Емкость оперативной памяти, Кбайт	2...16	16	4...28	1	10	2...4
Емкость постоянной памяти, Кбайт	16	16	2	4	1	2...4
Объем адресуемой памяти	64	64	28	64		2
Число команд	190	404	54	78	26	72
Уровни прерывания	8	10	2	8	1	1
Элементная база	K587	K1801	K581	K580	K176	K580 K589

СМ ЭВМ оснащают необходимым периферийным оборудованием, а также современными средствами математического обеспечения. Такие ЭВМ имеют одношинную структуру, при которой все устройства подсоединяются к общему быстродействующему каналу передачи данных. Использование общей шины позволяет: передавать потоки информации в широком диапазоне скоростей, выбирая, в зависимости от требуемой скорости, соотношение программных и аппаратных средств управления потоками; устанавливать прямую связь внешних устройств между собой и с памятью, без участия процессора; легко модифицировать и расширять систему, компоновать многопроцессорные комплексы, поскольку абоненты общей шины адресуются так же, как и ячейки памяти и доступны любым адресным командам процессора.

Для индивидуальных САПР в последнее время применяются микро-ЭВМ, построенные на микропроцессорных наборах БИС, которые по параметрам приближаются к мини-ЭВМ (табл. 4). Повышение степени интеграции и аппаратная реализация на кристалле средств операционной системы (ОС) и трансляторов с языков высокого уровня обуславливают быстрый рост функциональных возможностей микро-ЭВМ (табл. 5).

В настоящее время микро-ЭВМ и мини-ЭВМ оснащены периферийным оборудованием для работы с печатающим устройством, накопителями на магнитных дисках, телетайпом, экранными пультами с ЭЛТ

гового режима — несложность внесения изменений в данные. Если в пакетном режиме структуры входных данных обычно фиксированы и данные вводятся в определенной последовательности, то в диалоговом режиме процесс ввода ограничен только базовыми операциями ввода: добавление, исключение, корректировка данных. Эти операции, в свою очередь, обладают гибкой командной структурой и предусматривают изменение не только записи в целом, но и отдельных ее элементов. При обработке результатов вычислений преимущества диалогового режима заключаются в следующем: пользователь может выборочно просмотреть результаты, а затем определить объем вывода; возможно свободно контролировать объем вывода; для предварительного просмотра результатов можно воспользоваться упрощенными форматами вывода; на основании текущих результатов можно гибко определять набор процедур проектирования.

Функции диалогового ввода и вывода не изолированы друг от друга и в каждой реальной системе они так или иначе взаимодействуют. Подготовка и редактирование массивов исходных данных, а также реализация графических процедур вывода результатов анализа выполняется сравнительно быстро, поскольку при этом не используются арифметические операции.

Дисплеи снабжены устройствами обратной связи в виде следящего перекрестия и светового пера, а также функциональной клавиатурой, позволяющей оперировать с графическими изображениями. Комбинируя возможности светового пера и клавиатуры, проектировщик вводит в ЭВМ через экран дисплея первоначальный замысел будущей конструкции объекта, а затем с помощью ЭВМ совершенствует ее и детализирует. Принципы работы конструктора, использующего графический дисплей, описаны в [59].

К основным параметрам дисплеев относятся: вид изображаемой информации (алфавитно-цифровая или графическая); тип используемой электронно-лучевой трубки (ЭЛТ с регенерацией изображения и запоминающие ЗЭЛТ); способ формирования на экране ЭЛТ (координатный и растровый); количество одновременно обслуживаемых устройств отображения (однопультные и многопультные); степень удаленности устройства отображения от ЭВМ (местное и дистанционное размещение).

Организация отображающей части с использованием обычной ЭЛТ и применением для начертания изображения координатной развертки является наиболее распространенной. Она обеспечивает наименьшее время модификации изображения, дает возможность эффективно использовать разнообразные средства ввода графической информации (световое перо, клавиатура, планшеты ввода и др.), отличается высоким качеством изображения.

Процесс отображения информации в дисплее происходит следующим образом. От центральной ЭВМ на местный графический процессор выводится массив, представляющий собой программу, состоящую из графических команд, обеспечивающих вычерчивание изображения, и команд управления.

Графические команды позволяют управлять электронным лучом и засвечивать на экране точки, вектора и символы. Команды управ-

граммы управления восстановлением системы, использующиеся при переходе системы от одних режимов работы к другим.

Управляющие программы осуществляют первоначальную загрузку оперативной памяти и управление работой системы, включая обработку прерываний, распределение работы каналов, загрузку программ из библиотеки в оперативную память. Они организуют прием заданий, их контроль, подготовку запрашиваемых программ к выполнению, запуск, автоматический переход к следующему заданию.

Ход решения задачи контролируется программой супервизором. Задача может выполняться в однопрограммном или в мультипрограммном режиме. В однопрограммном режиме ЭВМ выполняет только одну задачу, и все технические средства ЭВМ находятся в распоряжении этой задачи.

В мультипрограммном режиме ЭВМ может одновременно выполнять несколько независимых друг от друга задач, и ОС распределяет технические средства между ними, осуществляет динамическое распределение памяти и организует работу по приоритету со многими заданиями и задачами.

К обрабатываемым программам относятся трансляторы с основных алгоритмических языков ФОРТРАН, ПЛ-1, ПАСКАЛЬ и др. Важным свойством алгоритмических языков является возможность автоматического перевода описания задачи в машинную программу. Описание алгоритма на алгоритмическом языке представляется в символах, сходных с обычными математическими, что облегчает его чтение. Алгоритмические языки обеспечивают возможность записи алгоритмов решения задачи независимо от ЭВМ, на которой задачи будут решаться. Специфику машины учитывает АССЕМБЛЕР — машинно-ориентированный язык, снимающий с программиста многие рутинные обязанности по запоминанию машинных кодов команд, вычисление истинных адресов памяти.

В операционной системе программа, написанная на алгоритмическом языке, транслируется в объектный модуль, специфика исходного языка программирования после трансляции теряется. Для получения готовой к выполнению программы объектный модуль должен быть обработан редактором связей. Результат его работы называется абсолютным, или загрузочным модулем. Загрузочный модуль может собираться из независимо протранслированных частей (объектных модулей) и подпрограмм, хранящихся в библиотеках.

В соответствии с особенностями загрузки абсолютные (программные) модули делятся на однократно и повторно используемые, а также реентерабельные. Последние соответствуют рекурсивной процедуре, использующей саму себя в качестве подпрограммы. Тип модуля определяется во время редактирования связей по указанию программиста.

По структуре загрузочные модули бывают простыми и сегментированными. Загрузочный модуль простой структуры содержит в себе все необходимые для выполнения команды. Если длина модуля слишком велика, то применяют сегментированные модули. В таком случае может быть использована оверлейная структура, при которой одна и та же область оперативной памяти используется разными сегментами,

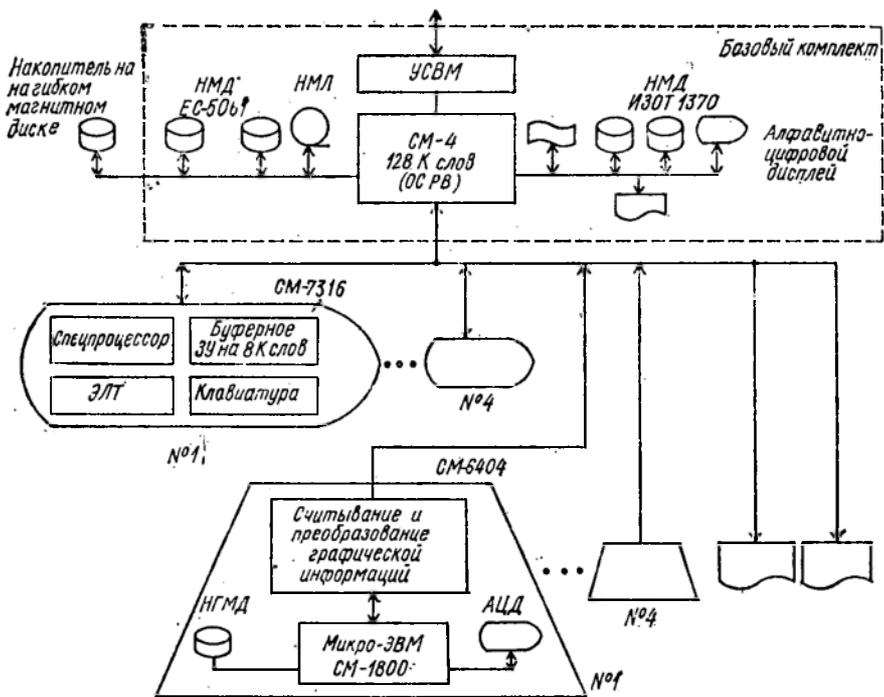


Рис. 8. Комплекс технических средств для проектирования в диалоговом режиме (АРМ2—01).

Комбинацией основных режимов является режим дистанционной пакетной обработки. В этом режиме экранные пульты используются лишь для автономного ввода/вывода.

Терминалы могут располагаться на значительном расстоянии от основного оборудования вычислительной системы. Дистанционный режим использования вычислительных машин и систем обеспечивается через телефонные и телеграфные коммутируемые и некоммутируемые линии с помощью специального оборудования — абонентских пультов, модемов и мультиплексоров. Модемы выполняют прямое и обратное преобразование двоично-кодированной информации в серии частотно-модулированных сигналов, передаваемых по каналам связи. Мультиплексоры осуществляют сопряжение линий связи с мультиплексным каналом ЭВМ.

Значительное влияние на организацию диалогового взаимодействия оказывает вычислительное оборудование. В современный эффективный комплекс терминальной станции САПР для реализации диалогового режима работы проектировщика (рис. 8) обычно входят: малая специализированная или универсальная вычислительная машина с набором устройств ввода/вывода алфавитно-цифровой информации, обеспечивающая управление работой всего комплекса технических средств, а также реализацию функциональных программ обработки графической информации; устройства автоматического и полуавтоматического ввода графической информации (кодировщики), используемые для

ческое редактирование топологии; контроль технологических расстояний; протоколирование работы оператора, формирование данных на МЛ языке генератора изображений с минимизацией управляющей информации и др.

В настоящее время начат серийный выпуск комплексов диалоговых средств АРМ-2, предназначенных для максимального приближения пользователя к вычислительным средствам САПР. Основные отличия АРМа второго поколения от первого состоят в возможности, во-первых, отображать и обрабатывать значительно более сложные графические объекты, во-вторых, работать в режиме многопультового диалога. Эти характеристики обеспечиваются техническими и программными средствами комплекса. Созданы пять модификаций АРМ-2, в которых в качестве мини-ЭВМ используется СМ-4.

АРМ 2-01 ориентирован на разработку РЭА и изделий машиностроения с возможностью ввода графической и алфавитно-цифровой информации, ее редактирования, оперативного отображения и выпуска документации на машинных носителях. Количество одновременно работающих пользователей — восемь.

АРМ 2-02 предназначен для проектирования деталей машиностроения, технологических процессов их изготовления и разработки инструмента и оснастки. Количество одновременно работающих пользователей — шесть.

АРМ 2-03 создан для разработки управляющих программ для станков с ЧПУ и проектирования цифровой РЭА, при этом одновременно могут работать четыре пользователя.

АРМ 2-04 используется для разработки и редактирования программ и выпуска текстовой документации. Количество одновременно работающих пользователей — восемь.

АРМ 2-05 предназначен для отладки управляющих программ и микропрограмм, отработки их в реальном масштабе времени, занесения отлаженных программ в ПЗУ цифровых устройств с программируемой логикой работы (микропроцессорных устройств).

Технические средства базового комплекса АРМ 2-01 входят мини-ЭВМ СМ-1407 с оперативной памятью 128 Кслов, сменными магнитными дисками емкостью 29 Мбайт и операционной системой разделения времени; до четырех терминалов подготовки и ввода графических данных СМ-6404 и четырех пультов СМ-7316, один или два графопостроителя (рис. 8).

Экранный пульт СМ-7316 предоставляет оператору удобные средства для выполнения наиболее часто употребляемых операций редактирования без обращения к центральной ЭВМ; на экране индицируется сложный графический объект (например, печатная плата на 40...50 микросхем или чертеж 22-го формата). Автономная работа дисплея обеспечивается буферным ЗУ емкостью 16 Кбайт и специальным процессором, осуществляющим функции регенерации и редактирования изображения.

Устройство подготовки и ввода графических данных СМ-6404 характеризуется высокой скоростью съема привязанных координат графических изображений и признаковой информации, а также сервисными функциями, упрощающими работу оператора. Оно выполнено

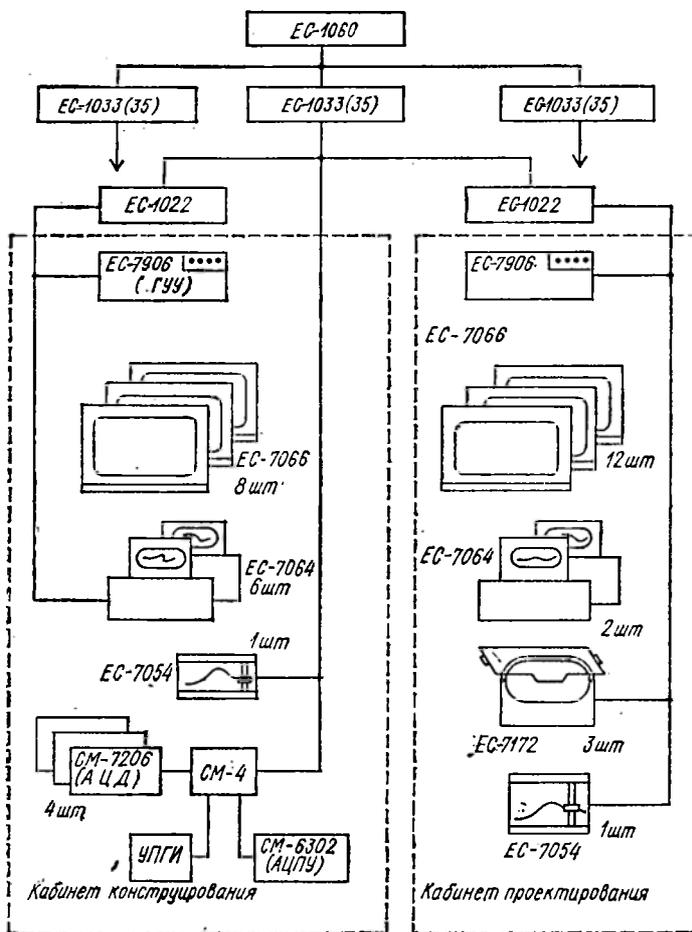


Рис. 9. Структурная схема учебной вузовской САПР.

номическим эффектом; при этом центральная ЭВМ выполняет преимущественно программы, требующие больших вычислительных мощностей, а запросы от средств диалога воспринимаются и обрабатываются мини-ЭВМ; при невозможности доступа к центральной ЭВМ терминальная станция способна продолжить решение задач в автономном режиме с сохранением результатов работы и последующей их пересылкой в большую машину; мини-ЭВМ гарантирует мобильность программного обеспечения различных устройств отображения путем эмуляции на ней системы дисплейных команд.

Характеризуя большинство современных дисплейных терминалов, применяют определения «интеллектуальный», «разумный». Это означает, что терминальная станция имеет достаточную автономность или вычислительную мощность, чтобы без привлечения центральной ЭВМ решать следующие задачи: обрабатывать вводимую алфавитно-цифровую и графическую информацию, редактировать, преобразовывать и

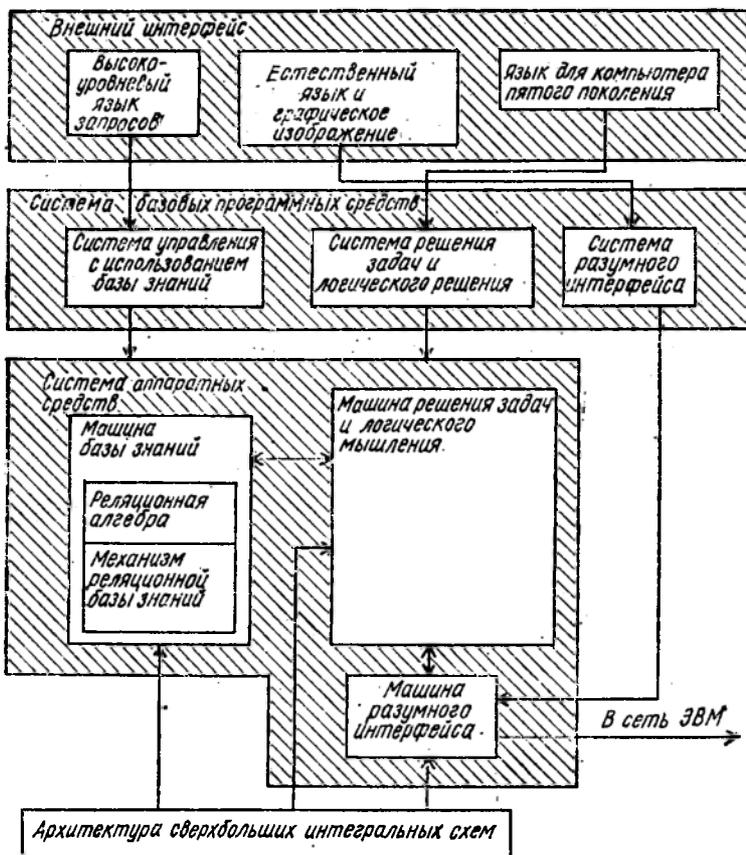


Рис. 10. Компоненты вычислительных систем пятого поколения.

базы знаний, а не только базы данных, когда специализированная ЭВМ управления базами знаний может использовать и понимать содержимое базы данных.

Использование вычислительных систем пятого поколения в САПР позволит резко сократить сроки исполнения проектно-конструкторских работ; создать интеллектуальные автоматизированные рабочие места на базе мощных персональных ЭВМ, оснащенных периферийными устройствами со «слухом», «речью» и «пониманием» смысла текста и изображений; обеспечить оперативный доступ к необходимой для проектирования информации и др.

2.2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

При разработке программного обеспечения САПР необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на выбор структуры и, в конечном счете, на эффективность системы: стоимость разработки и развития в процессе эксплуатации программного обеспечения САПР;

граммы управления восстановлением системы, использующиеся при переходе системы от одних режимов работы к другим.

Управляющие программы осуществляют первоначальную загрузку оперативной памяти и управление работой системы, включая обработку прерываний, распределение работы каналов, загрузку программ из библиотеки в оперативную память. Они организуют прием заданий, их контроль, подготовку запрашиваемых программ к выполнению, запуск, автоматический переход к следующему заданию.

Ход решения задачи контролируется программой супервизором. Задача может выполняться в однопрограммном или в мультипрограммном режиме. В однопрограммном режиме ЭВМ выполняет только одну задачу, и все технические средства ЭВМ находятся в распоряжении этой задачи.

В мультипрограммном режиме ЭВМ может одновременно выполнять несколько независимых друг от друга задач, и ОС распределяет технические средства между ними, осуществляет динамическое распределение памяти и организует работу по приоритету со многими заданиями и задачами.

К обрабатываемым программам относятся трансляторы с основных алгоритмических языков ФОРТРАН, ПЛ-1, ПАСКАЛЬ и др. Важным свойством алгоритмических языков является возможность автоматического перевода описания задачи в машинную программу. Описание алгоритма на алгоритмическом языке представляется в символах, сходных с обычными математическими, что облегчает его чтение. Алгоритмические языки обеспечивают возможность записи алгоритмов решения задачи независимо от ЭВМ, на которой задачи будут решаться. Специфику машины учитывает АССЕМБЛЕР — машинно-ориентированный язык, снимающий с программиста многие рутинные обязанности по запоминанию машинных кодов команд, вычисление истинных адресов памяти.

В операционной системе программа, написанная на алгоритмическом языке, транслируется в объектный модуль, специфика исходного языка программирования после трансляции теряется. Для получения готовой к выполнению программы объектный модуль должен быть обработан редактором связей. Результат его работы называется абсолютным, или загрузочным модулем. Загрузочный модуль может собираться из независимо протранслированных частей (объектных модулей) и подпрограмм, хранящихся в библиотеках.

В соответствии с особенностями загрузки абсолютные (программные) модули делятся на однократно и повторно используемые, а также реентерабельные. Последние соответствуют рекурсивной процедуре, использующей саму себя в качестве подпрограммы. Тип модуля определяется во время редактирования связей по указанию программиста.

По структуре загрузочные модули бывают простыми и сегментированными. Загрузочный модуль простой структуры содержит в себе все необходимые для выполнения команды. Если длина модуля слишком велика, то применяют сегментированные модули. В таком случае может быть использована оверлейная структура, при которой одна и та же область оперативной памяти используется разными сегментами,

живными файлами пользователей (на основе стандартных средств ОС ЭВМ).

Структура программного обеспечения. В состав программного обеспечения САПР входят пакеты прикладных программ (ППП), ориентированные на решение определенных задач проектирования и реализуемые как надстройка на ОС. Архитектура современных ППП обычно представляется следующим образом. Основу ППП составляет конечное множество программных модулей, каждый из которых является узкоспециализированной программой некоторого алгоритма или его фрагмента. Из этого множества выделяется подмножество управляющих модулей, составляющих универсальный или специализированный монитор САПР. Программа-монитор САПР организует вычислительный процесс в соответствии с принятым алгоритмом управления.

Проследим за определенной аналогией процедур проектирования и программирования.

Проектирование	Программирование
Структурная схема	Схема алгоритма
Функциональная схема	Блок-схема программы
Рабочий проект	Программа
Настройка	Отладка
Компонент объекта	Оператор языка
Технология проектирования	Технология программирования

В настоящее время применяются два способа организации вычислительного процесса в САПР: первый предполагает наличие в ППП специальных языковых средств, позволяющих пользователю явно описывать алгоритм решения прикладных задач САПР; второй — наличие в САПР средств автоматизированной или автоматической генерации цепочки программных модулей, соответствующей алгоритму решения выбранной прикладной задачи.

Проблемная ориентация САПР позволяет проектировщику определять лишь исходные данные, задавать вид их обработки и указывать форму представления результатов. Для выполнения этих функций в состав системы должны быть включены: входной язык и транслятор с него, прикладные программы проектирования заданного инженерного объекта, программы обработки и вывода результатов в форме, удобной и привычной для проектировщика-пользователя САПР.

Широкий круг пользователей САПР — следствие ее доступности, которая определяется, главным образом, возможностями языка взаимодействия, простотой организации вычислительного процесса, наличием вспомогательных сервисных операций, автоматизирующих процедуры накопления и редактирования библиотек САПР. Возможная структурная схема программного обеспечения такой проблемно-ориентированной САПР (например, третьего типа — САПР проектной организации) представлена на рис. 12.

В основу организации рассматриваемой САПР положен модульный принцип с последовательной работой прикладных программных модулей. Под программным модулем понимается функционально-определенная совокупность взаимно-связанных программ (в частном случае, одна программа), обладающая единой формой межмодульных связей и

Модели инженерных объектов (элементов) и таблицы их параметров хранятся в соответствующих библиотеках системы, погруженных в банк данных. Библиотеки имеют иерархическую структуру, определяемую типом используемой памяти: текущая библиотека находится в памяти с произвольной выборкой (НМД), а постоянная — в памяти с последовательным доступом (НМЛ).

Загрузка в оперативную память и инициализация МОНИТОРА САПР определяется на языке управления заданиями ОС. После этого связь с системой возможна только с помощью проблемно-ориентированного языка взаимодействия САПР.

В настоящее время существуют два типа прикладных диалоговых систем. В системах первого типа диалоговые программы создаются на основе набора специализированных подпрограмм, ориентированных на обмен с внешними устройствами. При этом акты взаимодействия полностью программируются в прикладной программе, что делает ее зависимой от используемых технических средств взаимодействия.

В диалоговых системах второго типа создается набор аппаратурно-зависимых программных средств, ориентированных на обеспечение диалогового взаимодействия с любой прикладной программой. Примером является система программирования графического диалога ДИФОР для терминальных комплексов АРМ, разработанная в Институте технической кибернетики АН БССР. Она предназначена для программирования диалоговых прикладных процедур на языке ФОРТРАН и включает в качестве компонентов входной язык разработчика программы графического диалога, средства генерации диалоговых программ и средства организации вычислительного процесса.

Многообразие технических и программных средств, сложность задач, стоящих перед системой, трудоемкость их реализации требуют большой согласованности в работе многих разработчиков САПР. Для создания совместной САПР коллективного пользования необходимо согласовывать: словарь полей, т. е. правила кодирования информации в САПР; структуру файлов пользователей, предназначенных для хранения информации в процессе решения конкретной прикладной задачи и сокращения числа обращений к автоматизированному банку данных (БД); структуру БД; программы обмена между файлами пользователя и БД; управляющую программу, обеспечивающую включение в САПР пакетов прикладных программ, работающих непосредственно с БД и файлами; выбор операционной системы (например, ОС 6.1 ЕС при наличии дисплейных станций ЕС 7920) и БД (например, БД ОКА).

При выполнении вышеизложенного даже в случаях неполной идентичности технических и программных средств различных САПР реализуется возможность независимого создания ППП и обмена ими между пользователями САПР, а также возможность создания различных конфигураций САПР в зависимости от характера проектируемого объекта и технических средств, имеющихся в распоряжении пользователя.

Программные средства учебной САПР. К программным средствам, используемым в учебных кабинетах автоматизированного проектирования (см. рис. 9), относятся монитор, диалоговая система программи-

мах является не изучение языка программирования, а получение программы решения задачи пользователя.

В качестве пакета графических программ можно использовать пакет ДИСГРАФ, обеспечивающий работу с графическим дисплеем ЕС 7064 в ОС ЕС ЭВМ. Пакет ДИСГРАФ совместим с программами, написанными на языках ФОРТРАН, ПЛ-1, КОБОЛ, АССЕМБЛЕР. Пакет имеет двухуровневую иерархическую структуру, при этом верхний уровень доступен пользователю, который с помощью операторов языков ФОРТРАН и АССЕМБЛЕР может формировать и обрабатывать графические изображения. При работе с пакетом ДИСГРАФ реализована динамическая загрузка модулей пакета, что позволяет экономно использовать оперативную память ЭВМ, особенно в случаях одновременной работы нескольких пользователей. Пакет ДИСГРАФ можно подключать к диалоговой системе ДИАЛ и организовывать получение выходной документации на графическом дисплее или графопостроителе.

Информационно-справочную подсистему наиболее просто реализовать на базе дисковой диалоговой многопользовательской системы (ДИАМС) СМ ЭВМ, предназначенной для управления базами данных и решения информационно-логических задач [58]. ДИАМС позволяет организовать одновременный доступ к базе данных до 40 пользователей.

Выполнение студентами проектных работ с применением описанных программно-технических средств кабинета автоматизированного проектирования позволяет повысить качество проектов, приблизить их к процессу современного проектирования в отраслевых научных и проектно-конструкторско-технологических институтах.

В кабинетах целесообразно также использовать программные средства систем автоматизированного конструирования алгоритмов и автоматизированных обучающих систем [13].

Для эффективного взаимодействия с системой автоматизированного конструирования алгоритмов пользователь, не имеющий подготовки по программированию, должен хорошо представлять себе неавтоматизированное решение задачи, а также знать набор терминов, определенных инструкций к соответствующей системе и используемых в процессе диалога по конструированию алгоритма. Диалог заключается в предъявлении человеку последовательности вопросов и команд, направленных на анализ условий задачи, и наводящих пользователя на операторы языка программирования. К системам этой группы относятся ДИСКАОД (диалоговая система конструирования алгоритмов решения задач обработки данных) и АКАОД (автоматизированный конструктор алгоритмов решения задач обработки данных), созданные в Институте кибернетики АН УССР совместно с Белорусским Государственным университетом. Программы конструируются на языке ЯСОД (язык систем обработки данных). В программе, написанной с помощью этих систем, практически нет синтаксических ошибок. Поэтому они не требуют отладки и могут быть сразу переданы для трансляции и выполнения.

Опыт эксплуатации ДИСКАОД и АКАОД показывает, что непрофессиональный пользователь ЭВМ на конструирование алгоритма

ненная в Институте кибернетики АН УССР на базе системы ПРОЛОГ-ЕС позиционная игра, в которой пользователь и ЭВМ имеют возможность поочередно принимать решения, причем ЭВМ, принимая решение при выборе своего очередного хода, осуществляет просмотр на два хода вперед.

В заключение представим работу студента-пользователя, который первый раз обратился с задачей к САПР в кабинете автоматизированного проектирования. Контакт с ЭВМ начинается с ознакомления пользователя с элементарными манипуляциями на алфавитно-цифровом дисплее. Обслуживающая программа разъясняет назначение клавиш, а также объясняет, какие основные действия придется выполнить для решения конкретной задачи. Далее (автоматически или по команде пользователя) подключается обслуживающая программа, помогающая пользователю уточнить и формализовать постановку его задачи. Затем пользователь может обратиться к автоматизированной информационной системе для того, чтобы попытаться найти в библиотеке САПР готовую программу решения задачи. Если такая программа имеется, пользователь вводит исходные данные самостоятельно или по подсказке ЭВМ и запускает эту программу на выполнение. Если готовая программа не найдена, пользователь может написать ее либо самостоятельно, либо с помощью специальной обслуживающей программы конструирования программ. Конструирование программ может сочетаться с пошаговым ее выполнением, для чего вызывается соответствующий транслятор или интерпретатор. В процессе программирования пользователь может требовать от ЭВМ справки и разъяснения по интересующим его средствам языка, а также заказывать себе более или менее развитый режим автоматизированного обучения этим средствам.

Интеллектуальное взаимодействие пользователя с ЭВМ при решении задач программирования — прообраз тех средств «разумного» интерфейса, возможностей обучения и логического мышления, понимания содержания данных баз знаний, которыми будут обладать вычислительные системы пятого поколения (рис. 5), реализуемые на основе методов и средств искусственного интеллекта и языков программирования ПРОЛОГ и ЛИСП.

Выбор компонентов САПР. Сложность рационального выбора компонентов технического и программного обеспечения САПР обуславливается многофакторностью оценки возможностей вычислительных комплексов САПР при обслуживании заданного потока запросов на обслуживание и обеспечении необходимого объема вычислительных работ. Обычно для этой цели используют специальные имитационные программные модели (МП) и аппарат теории массового обслуживания, теории полумарковских и марковских процессов, теории надежности и асимптотического анализа.

МП моделируют алгоритмы взаимодействия аппаратурных и программных средств ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ, а также временные характеристики их функционирования. При этом предусматривается возможность изменения количества и быстроты действия процессоров в выбираемой вычислительной системе (ВС); задания различных способов организации основной памяти (а также локальной памяти для каждого процессора, общего поля оперативной памяти); изменения конфигурации и

3 ИНЖЕНЕР-ПОЛЬЗОВАТЕЛЬ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.1. РАЗДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ И ЭВМ

Применение математических методов и средств информационно-вычислительной техники для автоматизации проектно-конструкторских работ вносит большие изменения в организационную структуру системы проектирования. В отличие от традиционных систем проектирования, когда одни и те же люди последовательно выполняют основные проектные процедуры, в САПР осуществляется разделение труда сотрудников в соответствии с функциональным назначением основных подсистем.

Особенности организационной структуры САПР. Основную роль в САПР играет проектировщик-пользователь, требования к профессиональной подготовке которого значительно повысились. Освобождая проектировщика от выполнения многих формальных и рутинных операций в процессе проектирования, САПР создает реальную основу для повышения производительности труда пользователя за счет стимулирования процесса его творческой деятельности. Проектировщик получает возможность быстро проанализировать различные аспекты принятого им решения по любому из вопросов, касающихся проектируемого объекта. Процесс проектирования может разделяться на ряд связанных задач, решаемых параллельно специалистами различных отраслей знаний, взаимодействующих с одной и той же ЭВМ с помощью интерактивных систем в режиме разделения времени.

Группы сотрудников, обслуживающие различные подсистемы САПР, специализируются в соответствии с функциональным назначением этих подсистем. Если в обычных системах проектирования группы технической информации, обслуживания архивов и инженерных расчетов, как правило, немногочисленны на фоне крупных служб технической документации, то в САПР наблюдается следующее. Значительно увеличивается число сотрудников, связанных с подготовкой и обработкой информации, включая разработку и эксплуатацию программно-технического комплекса подсистем информационного и инженерного анализа. Благодаря применению ЭВМ резко сокращается число сотрудников, связанных с разработкой документации. К обеспечению функционирования подсистемы поиска решений, как и использованию САПР в целом, привлекаются наиболее квалифицированные специалисты.

Изменяя в организационной структуре САПР, обуславливают повышение требований к управлению процессом проектирования в целом. Последнее осуществляется администратором системы или системным программистом, детально изучившим общесистемное математическое обеспечение САПР и имеющим право вносить изменения в систему.

«образованности» ЭВМ определяется ее программным обеспечением. Желательно, чтобы количество информации, получаемой на запрос проектировщика-пользователя, было переменным и могло изменяться по требованию пользователя. Таким образом можно ускорить диалог.

● *Обращение с информацией.* Емкость мозга человека для сохранения детализированной информации невелика, но обладает интуитивной, неформальной возможностью ее организации. Эффективность вторичного обращения к памяти зависит от времени. В ЭВМ емкость памяти большая, организация формальная и детализированная, вторичное обращение не зависит от времени. Поэтому целесообразно накапливать и организовывать информацию автоматическим путем и осуществлять ее быстрый вызов по удобным для человека признакам.

● *Оценка информации.* Человек умеет хорошо разделять значимую и несущественную информацию. ЭВМ таким свойством не обладает. Поэтому должна существовать возможность макропросмотра информации большого объема, что позволяет человеку выбрать интересующую его часть, не изучая всю накопленную информацию.

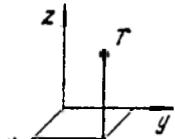
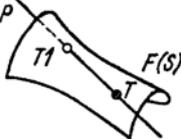
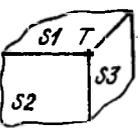
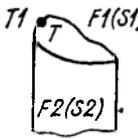
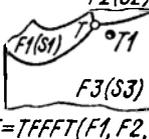
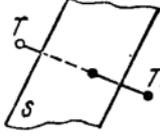
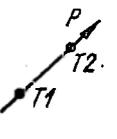
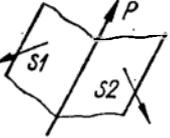
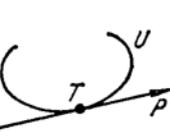
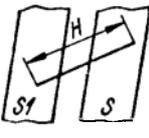
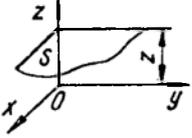
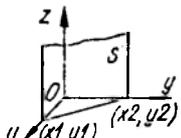
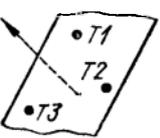
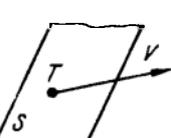
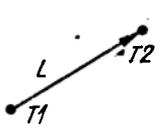
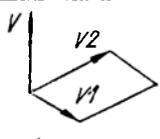
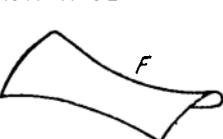
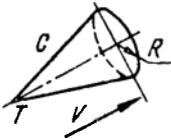
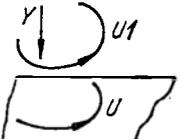
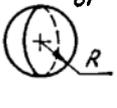
● *Отношение к ошибкам.* Человек часто допускает существенные ошибки, исправляя их интуитивно, при этом метод обнаружения ошибок чаще всего также интуитивный. ЭВМ, наоборот, не проявляет никакой терпимости к ошибкам и метод обнаружения ошибок строго систематический. Однако в области формальных ошибок возможности ЭВМ значительно больше, чем при обнаружении неформальных. Поэтому нужно обеспечить возможность проектировщику-пользователю вводить в ЭВМ исходную информацию в свободной форме, написанную по правилам, близким к обычным математическим выражениям и к разговорной речи. ЭВМ выполняет проверки и поправки, преобразует информацию к стандартному виду, удобному в процедурах обработки и формального устранения ошибок. Далее желательно осуществить обратное преобразование и предъявить информацию пользователю в наглядной, например графической форме, для обнаружения информационных смысловых ошибок.

● *Обращение со сложными описаниями.* Человеку трудно воспринять большое количество информации. Поэтому следует поручить ЭВМ автоматическое разбиение сложных конфигураций на относительно независимые части, охватываемые одним взглядом. Естественно, что изменения, сделанные в одной из этих частей (режим «окна»), должны автоматически производиться и во всех остальных.

● *Распределение внимания на несколько задач.* Выполнить это условие человеку, в основном, не удастся. При решении подзадачи приходится отвлекаться от основной. Поэтому на ЭВМ организуется система прерываний, восстанавливающая состояние основной задачи к моменту, нужному для пользователя. Аналогичным образом ЭВМ обслуживает процедуру анализа нескольких вариантов решения.

● *Память по отношению к проведенной работе.* Человек может забыть как то, что уже сделано, так и то, что ему запланировано еще сделать. Этот недостаток компенсируется ЭВМ, которая четко фиксирует и информирует пользователя о выполненных процедурах и предстоящей работе.

Таблица 9. Примеры операторов моделирования пространственных объектов

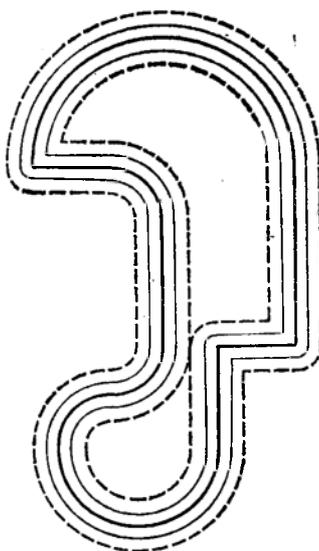
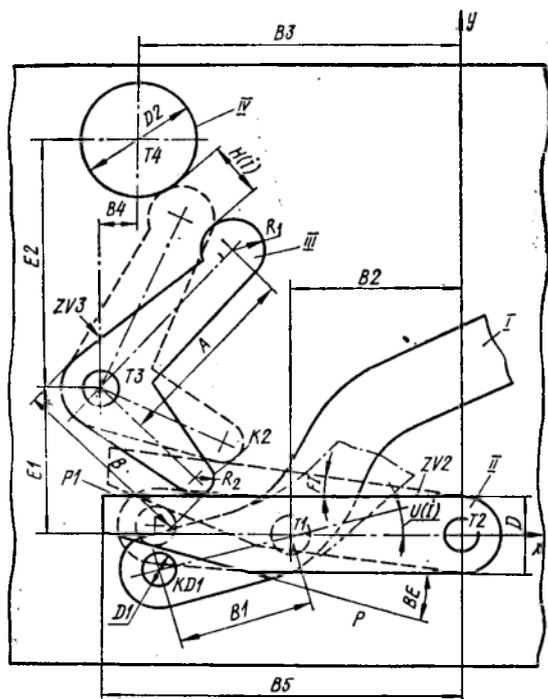
 <p>x, y, z $T = TXYZ(x, y, z)$</p>	 <p>$T = TPS(P, S)$</p>	 <p>$T = TPF(P, F, T1)$</p>	 <p>$T = TSSS(S1, S2, S3)$</p>
 <p>$T = TFFT3(F1, F2, T1)$</p>	 <p>$T = TFFFT(F1, F2, F3, T1)$</p>	 <p>$T = TS1MS(T1, S)$</p>	 <p>$P = PTT3(T1, T2)$</p>
 <p>$P = PSS(S1, S2)$</p>	 <p>$P = PUT(U, T)$</p>	 <p>$S = SSH(S1, H)$</p>	 <p>$S = SXOY(z)$</p>
 <p>$S = SX Y(x1, y1, x2, y2)$</p>	 <p>$S = STTT(T1, T2, T3)$</p>	 <p>$S = STVN(T, V)$</p>	 <p>$L = LTT3(T1, T2)$</p>
 <p>$V = VVVP(V1, V2)$</p>	 <p>$F = F10 F(F1, F2, F3, \dots, F10)$</p>	 <p>$C = CONUS(T, V, R)$</p>	
 <p>$U = PROU(U1, V)$</p>	<p>Построение сечения</p>  <p>$SH = SECHL(D, S)$</p>	 <p>$SF = SFERA(T, R)$</p>	 <p>$U = USKAN(F1, F2, T1, T2, T3, H)$</p>

различных областях техники разработаны и активно эксплуатируются разнообразные лингвистические средства САПР. Рассмотрим некоторые из них.

● Язык ФАП-КФ — формализованный аппарат геометрического моделирования на основе компилятора ФОРТРАНа [19]. В общем объеме проектных работ графика составляет не менее 30...40 %, достигая в случаях проектирования оснастки 70...80 %. Поэтому при разработке любых САПР возникает проблема рационального представления

Рис. 14. К моделированию кинематики плоского механизма.

Рис. 15. Построение эквидистанты плоской фигуры.



бок, а также специальный, геометрический, отладочный режим, позволяющий быстро обнаруживать и устранять ошибки.

Пакет имеет простую структуру и дает возможность легко создавать различные его подмножества, а также расширять его возможности за счет включения новых геометрических операторов.

В табл. 9 приведены типичные геометрические операторы языка ФАП-КФ.

Изображение рис. 13 моделируется с помощью следующих операторов языка ФАП-КФ. Коническая поверхность задается операторами:

$$T3 = TXYZ(0., 0., A)$$

$$V = VXYZ(0., 0., -1)$$

$$C = CONUS(T3, V, ATAN(.5 * D/A)).$$

Линия пересечения координатной плоскости $хоу$ и конической поверхности определяется операторами:

$$S = SXOY(0.)$$

$$U1 = USET(S, C, 1)$$

Линия пересечения конуса и сферы задается операторами:

$$SF = SFERA(T, -R)$$

$$T4 = TXYZ(X, Y, -R, Z)$$

$$T1 = TFFT3(SF, C, T4)$$

$$T2 = TXYZ(X, Y, R, Z - R)$$

$$U2 = USKAN(SF, C, T1, T2, T1, 3)$$

КОНЕЦ

Информационная часть директивы определяется:

<информационная часть>: = <внешние операнды>
<внутренние операнды>
<внешние операнды>
<внутренние операнды>

Внешними операндами являются последовательности имен обводов корпуса и баз данных. Имена обводов представляют собой идентификаторы, состоящие из символов Ш (шпагоуты), В (ватерлинии), Б (батоксы), С (сечения) и числовой части, изменяющейся от 1 до 500. Например, Ш22, Б1, В20, С127.

<внешние операнды>: = <упорядоченная последовательность имен>
<неупорядоченная последовательность имен>

<упорядоченная последовательность имен>: = <имя —имя>
<неупорядоченная последовательность имен>: = <имя>

Символом — (минус) разделяются имена с возрастающей числовой частью. Например, Ш5 — Ш25, В1 — В15, Б1 — Б7, С125 — С372, БАЗА 1 — БАЗА 9.

Например, Б1, Б7, В1, Ш5, Ш1.

Внутренними операндами могут быть масштабы, углы поворота, третья координата и некоторые другие величины, представленные числами.

<число>: = <+ целое без знака> <десятичная дробь>
<— целое без знака> <десятичная дробь>

<целое без знака>: = <цифра> <последовательность цифр>
<десятичная дробь>: = <. (точка) последовательность цифр>

Каждой директиве соответствует определенный вычислительный процесс, который контролируется пользователем по результатам работы ЭВМ, отраженным в выходных сообщениях системы. Организация вычислительного процесса при использовании ПОЯД выглядит как беседа конструктора с ЭВМ.

Рассмотрим некоторые директивы САПР ГЕОМЕТРИЯ.

Директива ВВОД предназначена для ввода точек геометрической линии (лежащей в плоскости, компланарной координатной) в память системы и построения математической модели.

Директива имеет следующий формат:

<ВВОД> <ИМЯ> <постоянная третья координата>
<гладкий участок линии I> ... <гладкий участок линии N>
<постоянная третья координата>: = <ЧИСЛО>
<гладкий участок линии>: = <особая точка линии □ регулярные точки линии □ особая точка линии >◇

Все точки линии (базовые) вводятся оператором с планшета полуавтомата считывания графической информации ПАСГИ, на котором укреплен теоретический чертеж.

< СЕЧЬ > < имя >

< семейство плоскостей > ◇

В первом случае информация берется из оперативной памяти системы, во втором — из базы данных.

Директива ТРАССИРОВАТЬ предназначена для прокладки пазовых линий на поверхности геометрического объекта. Координаты точек пазовой линии определяются с помощью расчетов по заданной величине расстояния (от начала) по трассируемым шпангоутам. Формат директивы

< ТРАСС > < ИМЯ ТРАССЫ > < ТРАССА > ◇

< ИМЯ ТРАССЫ > :: = < ЦЕЛОЕ ЧИСЛО >

< ТРАССА > :: = < УЧАСТОК ТРАССЫ >

< ТРАССА > < УЧАСТОК ТРАССЫ >

< УЧАСТОК ТРАССЫ > :: = < ИМЕНА ШПАНГОУТОВ >

< ОТСТОЯНИЕ >

< ОТСТОЯНИЕ > : = < ВЕЩЕСТВЕННОЕ ЧИСЛО >

Например,

< ТРАСС > < Ш15 — Ш28 > < 5000 >

На рис. 18 и 19 приведены чертежи пазовых линий на корпусе судна, полученные в результате выполнения директивы.

Директива ЧЕРТИТЬ предназначена для вывода на заданное оператором устройство графиков, линий, линейных каркасов, алфавитно-цифровых данных. При этом тип проекции и параметры линейных преобразований объекта и его изображения задается конструктором. Формат директивы следующий:

< ЧЕРТИТЬ > < ИМЯ ОБЪЕКТА > < А1 > < А2 > < А3 > < А4 >
> А5 > < А6 > < А7 >

где А1 — название устройства; А2 — наименование проекции; А3 — параметры проекции; А4 — углы поворотов в пространстве; А5 — параметры для преобразования изображения; А6 — масштабы по трем осям координат; А7 — координаты точки инцидентной объекту, окрестности которой необходимо изобразить.

Приведем некоторые операнды директивы.

< ИМЯ ОБЪЕКТА > :: = ПУСТО | ИМЯ ОБЪЕКТА В БАЗЕ ДАННЫХ |

< ИМЯ ОБЪЕКТА В БАЗЕ ДАННЫХ > :: = ИМЕНА ЛИНИЙ | ИМЯ ПОВЕРХНОСТИ |

< ИМЕНА ЛИНИЙ > :: = ИМЕНА КООРДИНАТНЫХ ЛИНИЙ | ПРОИЗВОЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ | ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЛИНИЯ |

< ИМЯ ПОВЕРХНОСТИ > :: = КАРКАС D | КАРКАС H |

< КАРКАС D > :: = | ДИСКРЕТНЫЙ КАРКАС | ВСЕ ЛИНИИ БАЗЫ ДАННЫХ |

< КАРКАС H > :: = НЕПРЕРЫВНЫЙ КАРКАС ПОВЕРХНОСТИ

< ПРОЕКЦИЯ > :: = ПУСТО | ИМЯ ПРОЕКЦИИ |

< ИМЯ ПРОЕКЦИИ > :: = ИМЯ АКСОНОМЕТРИИ | ПЕРСПЕКТИВА |

< ИМЯ АКСОНОМЕТРИИ > :: = ФРОНТАЛЬНАЯ | ПРОФИЛЬНАЯ | БОКОВАЯ | ИЗОМЕТРИЯ | ДИМЕТРИЯ | ТРИМЕТРИЯ |

< ИЗОМЕТРИЯ > :: = ПРЯМОУГОЛЬНАЯ | ФРОНТАЛЬНАЯ |

Рис. 18. Пазовые линии на корпусе судна, полученные с помощью директив ТРАСС и ЧЕРТИТЬ.

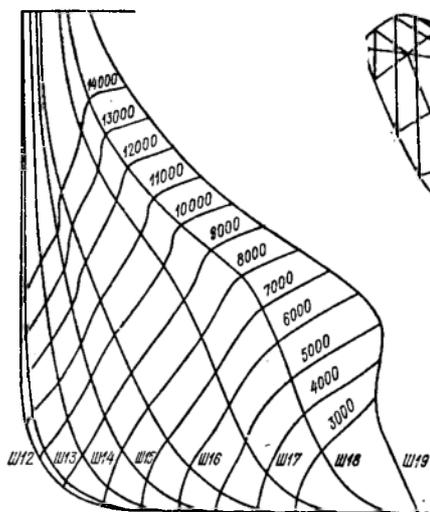
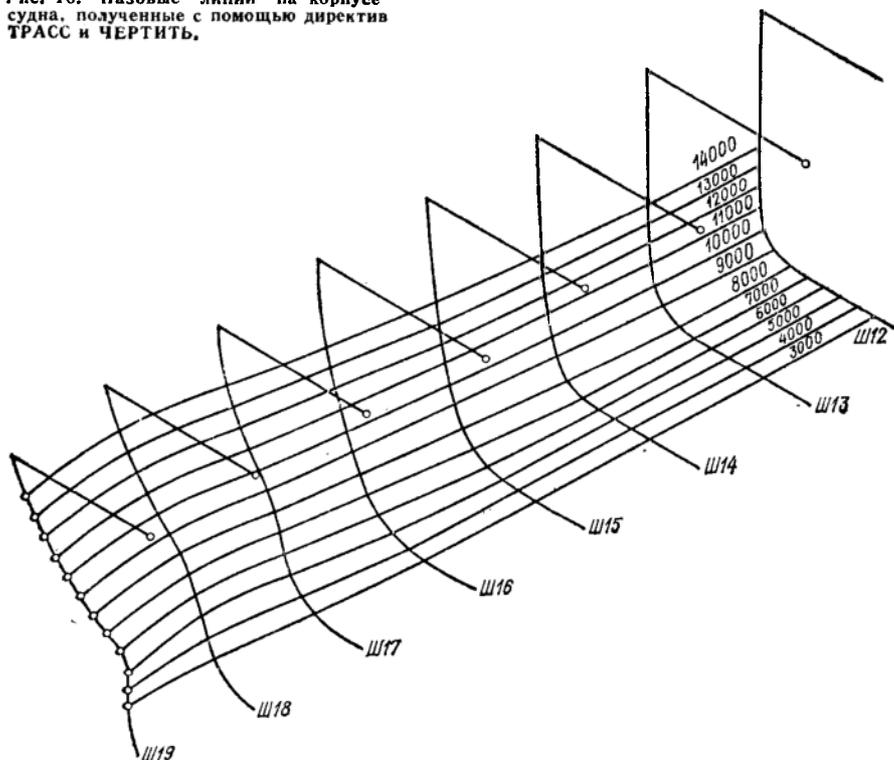


Рис. 19. Пазовые линии на корпусе судна в проекции КОРПУС.

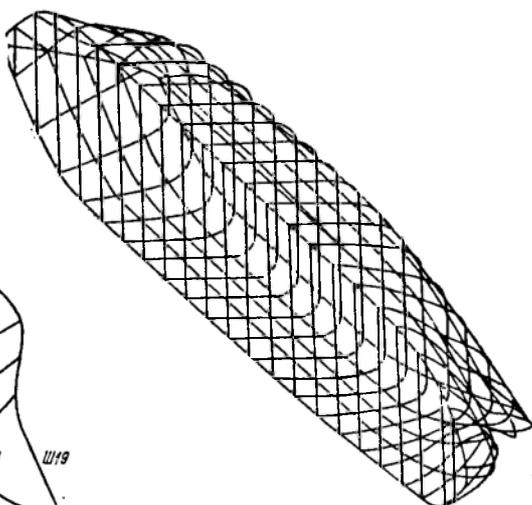
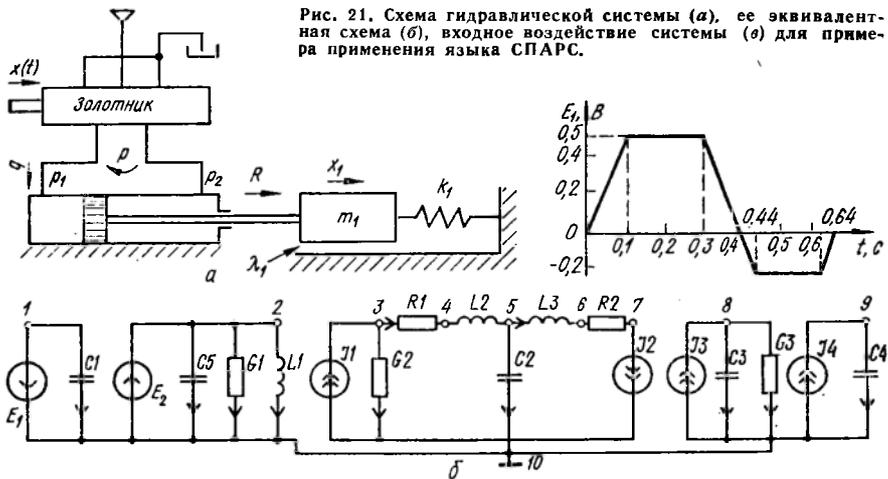


Рис. 20. Каркас корпуса судна, вычерченный на графопостроителе с помощью директивы ЧЕРТИТЬ.

Рис. 21. Схема гидравлической системы (а), ее эквивалентная схема (б), входное воздействие системы (в) для применения языка СПАРС.



Средствами языка управления заданиями ППП СПАРС можно определить многовариантный просчет схемы с модификацией ее описания и программных переменных с помощью директив <MODIFY, <INSTALL, <RUN. При этом результаты просчетов можно вывести на один чертеж, по которому на основании относительного расположения кривых можно судить о влиянии изменяемых величин на выходные переменные. Задания многовариантного просчета выполняются с помощью директивы <SAVECD.

Взаимодействие пользователя с библиотекой моделей и списков (БМС) осуществляется с помощью специальной директивы <LIB.

Круг исследуемых с помощью СПАРС объектов не ограничивается только радиоэлектронными схемами. Наличие в пакете входного языка с легко модифицируемым набором ключевых слов, применение произвольных схем замещения (макромоделей) многополюсных компонентов, отсутствие ограничений на уровень вложенности многополюсников, возможности достаточно простого учета широкого круга нелинейных функциональных зависимостей, наличие функционально-полного набора средств взаимодействия с библиотекой моделей — позволяет использовать пакет программ СПАРС при исследовании физических объектов, допускающих замену их эквивалентными схемами с сосредоточенными параметрами (например, электрических, механических, пневматических, тепловых). Так, на рис. 21, а приведена схема гидропривода, состоящая из золотника, исполнительного гидроцилиндра с трубопроводами и позиционной нагрузкой с упругостью. Схема замещения гидравлической системы, в которой токи i соответствуют объемным расходам Q , а напряжения u — давлениям p , представлена на рис. 21, б. Требуется определить переходной процесс в системе при входном воздействии, заданном на рис. 21, в, а также частотные характеристики передаточной функции системы в диапазоне частот $10 < \omega < 3000$ 1/с.

Описание эквивалентной схемы, в которой

$$C_1 = 1; C_2 = 1,7 \cdot 10^{-3}; C_3 = 2,1 \cdot 10^{-2}; C_4 = 1; C_5 = 2 \cdot 10^{-4}; \\ g_1 = 0,01; g_2 = 4,97 \cdot 10^3; g_3 = 0,06; r_1 = 0,8 \cdot 10^{-3}; r_2 = 0,8 \cdot 10^{-3};$$

Операторы 22...23 таблично определяют входное воздействие на систему. Требования на вычисление и построение амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик гидравлической системы определяются операторами 2...6 задания на исследование.

● **Язык КОМОЛ** — язык комплексного моделирования логических схем [51]. Во входном языке КОМОЛ выделено три типа синтаксических правил, на основании которых строится язык описания логических схем, язык описания параметров компонентов логических схем и язык управления.

Язык описания логических схем КОМОЛ позволяет, с одной стороны, определять в явной форме поведение и структуру схемы, задавая логические уравнения (булевы функции), или булевы модели функциональных компонентов логических схем; с другой стороны, — задавать информацию о составляющих схему компонентах и способе их соединения. При этом компоненты могут соответствовать реальным элементам (логическим и функциональным элементам, микросхемам), из которых строится схема. Для сокращения и упрощения структурных описаний используются макроопределения, выделяющие отдельные подсхемы. Имена входов и выходов предназначены для указания внешних контактов функциональных компонентов логических схем. При описании микросхем имена их входов и выходов соответствуют номерам контактов микросхем.

Для проведения динамического анализа логических схем описание структуры должно сопровождаться описанием основных параметров интегральных микросхем, к которым относятся коэффициент объёмного деления по входу и коэффициент разветвления по выходу, средняя задержка распространения сигнала, зона разброса задержки сигналов и др.

Описание основных параметров интегральных микросхем выполняется в явной форме, т. е. параметры указываются непосредственно в предложениях языка, описывающих функциональные компоненты логической схемы. Обычно таблицы параметров идентифицируются некоторыми именами, включенными в описание компонентов схемы. Логическая схема считается описанной, если определены ее компоненты, а также соединения компонентов друг с другом. Для определения компонента логической схемы достаточно указать его «имя» на принципиальной или функциональной схеме и реализуемую им функцию, задаваемую типом его модели.

Связи компонентов логической схемы задаются списком элементов. В этом случае устанавливается, какие элементы и какими входами нагружены на выход описываемого.

В качестве примера приведем описание логической схемы, показанной на рис. 22:

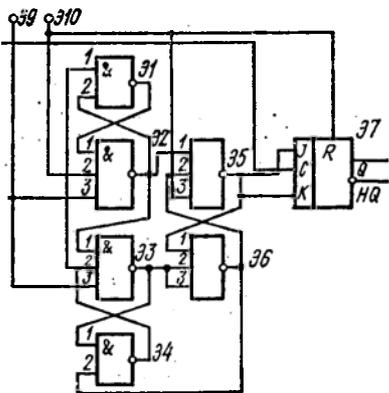


Рис. 22. Логическая схема для примера применения языка КОМОЛ.

4 АВТОМАТИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

4.1. ПОИСК ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

На начальных стадиях проектирования (разработка технического предложения и эскизного проекта) производится выбор вариантов узлов изделия или изделия в целом. На этих стадиях закладывается физическая и техническая основа будущего изделия, в значительной мере определяются его основные технико-экономические показатели. Алгоритмы методов автоматизированного поиска и выбора решения не являются четкими и не обеспечивают целенаправленное движение от некоторого формализованного технического задания (ТЗ) в сторону улучшенного решения. В данном случае создание четкого алгоритма (или алгоритма прямого синтеза решения, называемого иногда алгоритмом прямого структурного синтеза) требует знания свойств всего пространства решений для включения в программу синтеза информации о получении наилучшего варианта решения. Такой алгоритм — это компактный и удобный для использования способ передачи опыта проектировщика (группы), детально изучившего пространство решения какой-либо задачи.

Для сложных объектов пространство решений оказывается обширным: десятки и сотни тысяч вариантов. Обследовать такое пространство с приемлемой степенью детализации за разумное время для человека не представляется возможным, следовательно, и не возможно сформулировать удобный для использования четкий алгоритм ориентирования в вариантах этого объекта и прямого целенаправленного выбора наилучшего из них.

Однако задачи генерации (синтеза) решений можно решать и другим методом — методом проб и ошибок. В этом случае на первом этапе возникают объекты — гипотезы, качество которых еще не известно, а на втором — эти гипотезы проверяются и оцениваются. Задача определения характеристик этих объектов — гипотез является задачей анализа и не представляет принципиальных трудностей для программной реализации. При этом ситуация меняется, поскольку программе теперь задается информация не о том, где находится удачное решение, а лишь о том, где оно может находиться, где его можно попытаться найти, а качество найденного решения программа будет проверять сама, пользуясь критериями оценки.

В случае неудовлетворительного решения программа генерирует и испытывает новый вариант решения (новую комбинацию параметров из набора допустимых) и так далее до получения желаемого результата.

Метод синтеза решения, основанный на программном поиске в пространстве возможных вариантов и их анализе, называют итеративным (непрямым) методом синтеза решения, или непрямым методом структурного синтеза. Этот метод не требует от проектировщика знания всех свойств пространства решений для проектируемого объекта,

Основой для выбора классификационных признаков является иерархическая классификация выбранного класса изделий.

В качестве модели для выбора допустимых аналогов используется матрица соответствий в виде морфологической таблицы [6], в которой по горизонтали записываются наименования изделий, а по вертикали — показатели качества и классификационные признаки. В поле матрицы в колонке по каждому изделию поставлены значения показателей качества и сделана отметка о наличии того или иного классификационного признака.

Для поиска аналогов необходимо составить ТЗ, в которое включаются требуемые показатели качества и их значения, а также классификационные признаки. Их количество и ранжирование может быть произвольным и определяется характером решаемой задачи.

Подсистема выдает пользователю следующую информацию: наименование изделий-аналогов; список показателей качества и их значения, которыми характеризуются найденные аналоги; данные о наличии документации и ее литеры, адрес калькодержателя и т. д.; список технических требований, которым не удовлетворяют найденные аналоги; ссылка на графические изображения аналогов, которые могут находиться в специальном каталоге, входящем в состав документации на подсистему.

В большинстве случаев невозможно найти аналог, показатели качества которого в полной мере удовлетворяли бы всем требованиям ТЗ. Для улучшения некоторых показателей выбранного аналога используют подсистему оптимизации.

Иногда подсистему поиска аналога целесообразней представить в виде двух подсистем, одна из которых может базироваться на информации о ТР, содержащейся в различной технической литературе, в том числе патентной. Значения показателей качества таких ТР определяются с помощью экспертных методов оценки.

Подсистема синтеза ТР-1. Подсистема обеспечивает решение следующих задач: синтез допустимых ТР из узлов высокого уровня иерархии (если имеется информация об их моделях, могут осуществляться расчеты по их взаимосвязи); синтез допустимых ТР с использованием элементов всех уровней иерархии; синтез ТР с заданными структурными элементами.

Методы синтеза базируются на возможности описания пространства решений с помощью набора показателей и признаков (морфологических переменных), каждый из которых может принимать несколько значений. Показатели не должны быть обязательно материальными элементами или иметь числовое значение. Это любые признаки, по которым одно изделие или вариант объекта отличается от другого. Комбинируя между собой различные значения показателей, можно получить разные варианты решения. Процесс проектирования можно упростить, если объект разделить на фрагменты (узлы) и искать решения для этих фрагментов по отдельности, независимо друг от друга. А затем, комбинируя между собой получение варианта этих фрагментов, синтезировать различные варианты решения для всего объекта.

Алгоритм программного порождения различных вариантов решения аналогичен алгоритму порождения последовательности натурального

использования дополнительных элементов конструкций из других объектов аналогичного функционального назначения (разъемов, соединительных колодок, монтажных плат и др.). В целом граф решений имеет 1000 вершин и содержит примерно $4 \cdot 10^9$ вариантов технического решения для запоминающих устройств. Такое количество вариантов решения было получено благодаря преобразованиям прототипов запоминающих устройств с помощью известных эвристических приемов: количественных изменений; модификаций формы объектов или их элементов, используемых материалов; интеграцией и дифференциацией; применением способов пространственно-временных преобразований и профилактических мер и др.

Большинство эвристических приемов включает следующую информацию, необходимую для программирования и использования приема: во-первых, указывается пространство переменных, которые следует изменять в прототипе для получения улучшенного решения; во-вторых, устанавливается шаг изменения переменных.

В рассматриваемой подсистеме для обеспечения комплексной проработки синтезированных вариантов ТР кроме ссылок на графическую информацию, содержащуюся в каталоге, используется подсистема машинной графики, синтезирующая общий вид каждого варианта ТР на основе типовых графических изображений элементов машиностроительных объектов.

Подсистема синтеза физических схем. Подсистема дает варианты решений поставленной задачи на абстрактном уровне — уровне физической схемы объекта проектирования. Решаются следующие типы задач: по заданным входам и выходам технической системы (ТС) выбираются ее основные структурные элементы; проводится физический анализ заданной структуры ТС, в том числе ее функционирование при воздействии факторов окружающей среды; осуществляется выбор материалов и веществ для основных структурных элементов ТС.

Подсистема имеет следующие информационные массивы: база данных по физическим эффектам (ФЭ) и свойствам веществ и материалов, список наименований входов и выходов ТС, список технических требований, который может использоваться от предыдущих подсистем.

Для синтеза физической схемы ТС подсистема использует модели описания ФЭ. В отличие от ранее разработанных вариантов подсистемы описание отдельного ФЭ, входящего в базу данных, содержит описание как основных, так и дополнительных управляющих и управляемых параметров, входящих в модель ФЭ. Кроме того, в модель ФЭ включены параметры физического объекта, которые влияют на значения управляемых параметров. Если через E_i обозначить множество параметров модели ФЭ_{*i*}, входящего в физическую схему объекта проектирования, а E_{i+1} — множество параметров модели ФЭ_{*i+1*}, то условием взаимосвязи ФЭ_{*i*} и ФЭ_{*i+1*} будет $E_i \cap E_{i+1}$. Для определения E_i и E_{i+1} не обязательно иметь описание ФЭ_{*i*} и ФЭ_{*i+1*} в виде математической модели. Достаточно знать лишь совокупность входящих в нее параметров.

Благодаря учету дополнительных управляющих и управляемых параметров появилась возможность получать физические схемы различных технических объектов.

Подсистемы синтеза ТР-1 и ТР-2 имеют принципиальные различия. Подсистема синтеза ТР-1 базируется на известной информации о ТР данного класса. Она разрабатывается лишь на ограниченном количестве физических схем из-за значительной трудоемкости разработки информационного обеспечения, отсутствия необходимого количества информации о ТР, случайности в разработке возможных направлений развития данного класса объектов. Эта подсистема обеспечивает получение новой информации, в основном, с помощью комбинаторных эвристических приемов.

С помощью подсистемы синтеза ТР-2 получаем информацию о ТР на основе тех вариантов физических схем, которые сформированы при решении задачи подсистемой синтеза физических схем. При этом синтезируется новая информация, например, если полученная схема была ранее неизвестна или не была известна ее конструктивная реализация. Используя имеющиеся информационные массивы, подсистема синтеза ТР-2 строит некоторое дерево ТР, включающее альтернативные варианты структурных элементов и их признаков. А затем уже на построенном дереве выполняется поиск допустимых ТР.

4.2. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

При достаточно большом количестве вариантов решения (особенно на стадии поиска решений при определенном принципе действия объекта) выбор оптимального простым перебором затруднителен, а в ряде случаев практически невозможен.

Для поиска решений с помощью эвристических приемов широко распространены комбинаторные алгоритмы, основанные на организации множества генерируемых вариантов в виде древовидных (ярусных) графов. Если, например, количество ярусов (параметров) 15...20, а число значений параметров на каждом ярусе 3...5, то количество вариантов решения, которые необходимо просмотреть по одному техническому заданию, составляет $10^8 \dots 10^{12}$. Это означает, что даже при применении ЭВМ определение и оценка всех вариантов потребует больших затрат машинного времени.

Генерация множества решений технической задачи относится к области дискретного программирования [34, 49]. Для сокращения перебора (количества проектируемых вариантов) применяют следующие методы: отсеечения, Порето, ветвей и границ.

В связи с дискретным характером параметров объекта (частных критериев) и нелинейными ограничениями на область допустимых решений эти методы являются наиболее универсальными и позволяют получать наиболее точное решение. Другие известные методы сокращения перебора (линейного и нелинейного программирования, деления упорядоченных множеств пополам, локального поиска) или неприемлемы в таких ситуациях, или требуют настолько большой предварительной работы по изучению свойств пространства решения, что применение их оказывается нерациональным. Методы случайного поиска не гарантируют отличную от нуля вероятность потери хороших решений. При проектировании технических объектов для многосерийного

цы свидетельствуют о том, что вариант 1, 4, 3, 2, 1 является оптимальным.

Реализация метода последовательного анализа и отсеивания вариантов позволяет сократить количество просматриваемых вариантов по сравнению с полным перебором примерно в $\frac{(n-1)!}{2^n}$ раз. Для задач большой размерности трудности вычисления, связанные с последовательным анализом вариантов, остаются существенными.

Метод Порето. Для сужения области поиска оптимальных решений применяется также алгоритм выделения множества точек (области) Порето. Определение системы весовых коэффициентов W_i и ранжиро-

Таблица 10. Решение задачи о кратчайшем замкнутом маршруте методом последовательного анализа

\hat{x}_1	Оценка L_1	x_2	Оценка L_2	Перспективность	\hat{x}_3	Оценка L_3	x_4	Оценка L_4	Перспективность	\hat{x}_5	Оценка L_5	x_6	Оценка L_6
1,2	9	1, 2, 3	15	—	1, 4, 3	11	1, 4, 3, 2	17	+	1, 4, 3, 2	17	1, 4, 3, 2, 1	26
1,3	10	1, 4, 3	11	+	1, 3, 4	17	1, 3, 4, 2	25	—	1, 4, 3, 2	18	1, 4, 2, 3, 1	28
1,4	4	1, 2, 4	17	+	1, 4, 2	12	1, 4, 2, 3	18	+				
		1, 3, 4	17	+									
		1, 3, 2	16	—									
		1, 4, 2	12	+									

вание по ней решений из области Порето позволяют получить оптимальный компромиссный вариант, сбалансированный по противоречивости относительно совокупности частных критериев Φ_i проектирования, или показателей свойств объекта. Точками Порето являются точки пространства решений $x_n \in X$, для которых выполняется условие

$$\Phi(x_n) = \sum_{i=1}^m W_i \Phi_i(x_n) \leq \Phi(X).$$

Таким образом, точки области Порето представляют собой перспективные варианты решения. Для существования области Порето, т. е. для $x_n \in x$, необходимо, чтобы существовало также множество весов $W = (W_1, \dots, W_m)$, $W_i > 0$:

$$\sum_{i=1}^m W_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial x_n} = 0, \quad (4.1)$$

т. е.

$$\text{grad}(\sum W_i \Phi_i) = 0,$$

что позволяет сформировать комплексную целевую функцию

$$\Phi = \sum_{i=1}^m W_i \Phi_i \quad (4.2)$$

Принципы построения САПР. При создании и развитии САПР применяются основные общесистемные принципы: включения, предусматривающий согласование параметров и возможностей конкретной САПР с более сложной САПР, стоящей выше на иерархическом уровне; системного единства, обеспечиваемый тесными связями всех подсистем САПР; развития, предусматривающий наращивание и совершенствование компонентов САПР и связей между ними; комплексности, обеспечивающий связность проектирования отдельных элементов и всего объекта в целом на всех стадиях проектирования, т. е. своеобразный конвейер проектирования; информационного единства, требующий использования в подсистемах САПР установленных в отрасли соответствующими нормативными документами проблемно-ориентированных входных языков, языков программирования, способов представления информации, терминов, символов и др.; совместимости, обеспечивающий совместное функционирование всех подсистем САПР при сохранении открытой структуры системы в целом; инвариантности, требующий, чтобы подсистема и компонента САПР были по возможности универсальными или типовыми, т. е. инвариантными к проектируемым объектам и отраслевой специфике; моральной живучести, предполагающей наличие в САПР средств настройки, в общем случае, не ограниченный, но в то же время достаточно представительный класс технических баз проектирования.

Система должна легко адаптироваться к этим базам. Предусматривается три уровня настройки системы: системный, процедурный и параметрический. На системном уровне осуществляется смена общесистемных программ, например связанных с переходом на новые физические принципы реализации проектируемого объекта. Процедурный уровень используется при переходе на новый класс объектов проектирования и обеспечивает замену отдельных блоков в программных модулях входного описания объекта, инженерного анализа, документирования. На параметрическом уровне средствами, доступными разработчику, а не системному программисту, производится настройка системы внутри некоторого класса проектируемых объектов.

Разработка САПР начинается с системного обследования объекта проектирования и используемых известных ручных методов и приемов проектирования. Процесс обследования представляет собой опрос опытных проектировщиков. Цель обследования — составление описания объекта проектирования, самого процесса проектирования и проектной документации. Эти описания и являются исходными данными для разработки САПР.

К решению автоматизировать некоторую проектную задачу приходят в результате анализа тех изменений, которые вносит автоматизация в показатели эффективности процесса проектирования. Это прежде всего качество решения проектной задачи, затраты времени на проектирование и затраты труда проектировщиков на один проект.

Автоматизация решения задачи может быть реализована в различных формах (полностью автоматически, с участием проектировщика в ходе решения, с участием проектировщика для формирования исходной модели объекта) в универсальных или специализированных САПР, т. е. для каждой автоматизируемой задачи можно найти

Разнообразие этих компонент приводит к усложнению систем и становится экономически невыгодным.

При переходе систем на новый этап развития существенно увеличивается удельный вес универсальных компонент и минимизируются по составу и по количеству специализированные компоненты системы.

Опыт применения САПР показывает, что *критерий эффективности автоматизации проектирования* является векторной величиной, т. е. влияние ЭВМ проявляется в различных аспектах.

В качестве определяющих можно выделить следующие составляющие этого критерия: увеличение качества проектных решений; уменьшение времени проектирования; уменьшение трудоемкости проектирования.

Качество проектирования зависит от его сроков. В противном случае заложенные в проект научно-технические идеи и решения морально устаревают еще до начала эксплуатации объектов. Недостаточно глубокая проработка проектов на ранних стадиях проектирования обращивается длительной доводкой опытных образцов, что приводит к потере времени и дополнительным затратам. Снижение качества проектов определяется также несоответствием между сложностью объектов современной техники и устаревшими методами и средствами их проектирования.

Улучшение качества проектного решения достигается, во-первых, уточнением математической модели решаемой проектной задачи и увеличением количества анализируемых и оптимизируемых вариантов ее решения, во-вторых, применением более совершенных методик и подходов к самому решению.

Применение САПР, как правило, значительно снижает трудоемкость собственно процесса решения, формирования проектной документации, внесения изменений в проектную документацию (в среднем, на один исходный документ 10 документов на вносимые изменения). Однако возникает проблема подготовки данных (перфорации, контроля и ввода), трудоемкость которой несколько снижает эффект от автоматизации.

В целом по многим отраслям отечественной промышленности применение САПР способствовало повышению производительности труда проектировщика в 4...5 раз, сокращению времени проектирования в 5...10 раз, улучшению качества проектируемых изделий на 20...30 %. Применение САПР, в частности, сокращает время конструирования и доводки самолетов и ракет в 2...3 раза, позволяет создать новую модель автомобиля за 8...10 месяцев, сокращает цикл проектирования БИС до нескольких месяцев [43].

В настоящее время автоматизированное проектирование применяется во многих отраслях народного хозяйства, однако наибольшие успехи достигнуты в радиоэлектронике, машиностроении и строительстве. Так, в радиоэлектронике с помощью САПР осуществляется: проектирование компонентов, включая большие интегральные схемы (БИС) и микропроцессоры; моделирование функционирования технических систем; конструирование систем и их типовых элементов замены (ТЭЗов); автоматизация программирования систем и ЭВМ; проектирование технологических процессов.

Таблица 2. Основные характеристики базовых ЕС ЭВМ

Показатели	ЕС-1022	ЕС-1033	ЕС-1035
Быстродействие, операций/с	80 тыс.	200 тыс.	150 тыс.
Время умножения с фиксированной запятой, мкс	29...42	8,5	10...12
Время сложения с фиксированной запятой, мкс	3,3...6	1,4...2,7	1,7...3,2
Емкость оперативной памяти (ОЗУ), Кбайт	128...512	256...512	256...512
Емкость внешней памяти на магнитных дисках, Мбайт	7,25	7,25	29
на магнитной ленте, Мбайт	25	25	25
Скорость передачи в мультиплексном (байт-мультиплексном) канале, Кбайт/с	40	40	40
Скорость передачи в селекторном (блок-мультиплексном) канале, Кбайт/с	600	600	750

использованием терминальных пунктов и с отображением данных на электронно-лучевых трубках (дисплеях). Присоединяется периферийное оборудование к ЭВМ с помощью стандартного интерфейса, что обеспечивает возможность пополнения и обновления его состава.

Каждую из моделей ЕС ЭВМ можно расширить увеличением периферийных устройств и емкости оперативной памяти, созданием многомашинных вычислительных комплексов и, наконец, заменой процессора на более производительный.

Устройства ввода/вывода подключаются к процессору через специальные устройства обмена — каналы. В ЕС ЭВМ имеются каналы двух типов — селекторный и мультиплексный, различающиеся по внутренней структуре, режимам работы и назначению. Селекторный канал работает в монопольном режиме и выполняет обмен данными процессора поочередно только с одним из подключенных к нему устройств ввода/вывода, работающих с относительно высокой скоростью передачи данных (например, магнитные ленты или диски). Мультиплексный канал может работать в мультиплексном и монопольном режимах, и осуществляет параллельный обмен данными с несколькими устройствами ввода/вывода, работающими с относительно малой скоростью передачи данных (перфоленочные, перфокарточные и печатающие устройства, например, АЦПУ ЕС-7032, СМ-6302).

Поскольку мультиплексный канал обеспечивает работу со 176 внешними устройствами при минимальном объеме оперативной памяти в 65536 байт, в нем может быть использовано групповое управление внешними устройствами.

Структурной единицей данных в моделях ЕС ЭВМ является восьмибитовая кодовая группа — байт. Все остальные форматы данных кратны этой величине и определяются как полуслово — 2 байта, слово — 4 байта, двойное слово — 8 байтов, поле переменной длины — до 256 байтов.

возможность разрабатывать программы, независимые от конкретной машины; наличие общих для большинства вычислительных машин операционных систем; создание единого фонда пакетов прикладных программ.

ЕС ЭВМ построена таким образом, что появляется возможность на базе входящих в нее технических средств строить многопроцессор-

Таблица 3. Основные характеристики базовых мини-ЭВМ

Показатели	НАИРИ-4	«Электроника-100—25»	СМ-1	СМ-2	СМ-3	СМ-4
Быстродействие, тыс. операций/с	500	600	400	450	200	600
Разрядность слова	16	16	16	16	16	16
Время сложения, мкс	2,0	1,4	2,5	2,2	5,0	1,4
Запятая	фиксированная	фиксированная, плавающая	фиксированная, плавающая	фиксированная, плавающая	фиксированная, плавающая	фиксированная, плавающая
Количество основных команд	91	89	78	86	65	72
Число способов адресации	12	12	4	4	12	12
Число регистров общего назначения	20	8	6	6	8	8
Принцип работы	микропрограммный	параллельный	микропрограммный	микропрограммный	параллельный	микропрограммный
Количество каналов передачи данных	1	1	1...2	1...2	1	1
Скорость передачи данных «по общей шине», тыс. слов/с	2000	350	250	700	700	700
Емкость оперативной памяти, Кбайт	65	32	64	54...256	32...64	248
Цикл обращения, мкс	1,2	1,2	1,0	1,0	1,2	1,2

ные и многомашинные вычислительные системы. Связь между отдельными процессорами может быть организована на трех уровнях. Самый низкий по быстродействию уровень связи достигается при использовании общего устройства внешней памяти (например, накопителей на диске). Более высокая скорость обмена может быть получена при непосредственной связи каналов двух ЭВМ. Наконец, имеется возможность работы нескольких процессоров на общем поле оперативной памяти. Эти возможности увеличиваются при использовании средств прямого управления (для передачи данных от одного процессора к другому) и средств мультисистемной работы (для смещения области прямоадресных ячеек памяти, пуска одного процессора другим и одновременном решении совместной задачи), реализованных, например, в ЕС-1035 и других ЕС ЭВМ последних выпусков (Ряда-2).

для ввода и вывода графической и символьной информации, развитым математическим обеспечением, включающим операционную систему реального времени и дисковую операционную систему.

Для современных вычислительных систем характерно стремление к упрощению общения человека с машиной. Это достигается разнотипной математическим обеспечением и непрерывным совершенствованием устройств ввода и отображения информации. Все большее распространение получают выносные пульты (терминалы), позволяющие

Таблица 5. Функциональные классы микро-ЭВМ

Показатели	Микро-контроллеры	Микро-ЭВМ	Микро-мини	Микро-макси	Микро-супер
Разрядность, бит	8	8...16	16	16...32	32
Емкость памяти, Кбайт	1...2	4...64	32...256	128...1000	256...8000
Относительное быстродействие	1	1...5	8...10	25	20...70
Относительная скорость ввода/вывода	1	3...5	6	12	6...45
Прототипы	8048	8080	8086	APX432	—

пользователю работать в режиме диалога с ЭВМ, графопостроители, координатосъемщики и устройства подготовки графической информации (УПГИ).

Режимы и средства взаимодействия. Основными режимами работы вычислительных систем, определяющими способ организации взаимодействия, являются режим пакетной обработки данных и режим разделения времени.

В режиме пакетной обработки информации пользователь не имеет непосредственного доступа к ЭВМ, при этом процесс взаимодействия разбивается на следующие этапы: 1) описание проектируемого объекта на входном языке и определение необходимых процедур решения задачи проектирования; 2) передача описаний на перфорирование; 3) перфорирование; 4) передача пакета перфокарт на операторное обслуживание; 5) выполнение задачи проектирования на ЭВМ; 6) передача результатов пользователю; 7) анализ результатов.

Этапы 1) и 7) выполняет пользователь. Время решения технической задачи определяется длительностью этапов 3)—6) и зависит от организации работ на конкретном вычислительном центре. В среднем оно может занимать от 2...4 часов до нескольких суток.

Для режима разделения времени характерен прямой контакт пользователя с вычислительной системой, когда пользователь с помощью терминала непосредственно изменяет массивы исходных данных и управляет процессом решения. Если решение выполняется в реальном масштабе времени, то такой режим называется диалоговым в реальном масштабе времени.

Наиболее подходящим устройством ввода/вывода для диалоговых подсистем является экранный пульт (дисплей), связанный с каким-либо устройством документирования. Основное преимущество диало-

ления предназначены для организации прерывания процесса считывания информации из памяти, передачи управления по указанному в команде адресу, установления режима отображения графических элементов. В частности, в режиме указания на экране ЭЛТ отображается маркер (точка). Координаты последнего задаются с клавиатуры или с планшета ввода и с его помощью выделяется элемент изображения, подвергающийся преобразованиям (сдвигам, поворотам, перемещению,

Таблица 6. Технические характеристики выносных пультов ЕС ЭВМ на дисплеях

Показатели	Видиотон-34	ЕС-7066	ЕС-7927	ЕС-7064
Вид дисплея	Алфавитно-цифровой	Алфавитно-цифровой	Алфавитно-цифровой	Графический
Наименование комплекса	—	ЕС-7906	ЕС-7920	—
Емкость экрана	—	960 символов	1920 (480) символов	1024 × 1024
Число строк	16	12 (6)	16	56
Число знаков в строке	80	80 (40)	80	74
Генератор символов	Точечный	Векторный	Векторный	Векторный
Число символов	96	96	96	96
Емкость буферной памяти, байт	1280	—	—	2 × 4096
Частота регенерации изображения, Гц	50	50	50	50

стиранию и др.). В графических дисплеях реализуется режим слежения за световым пером при вводе графической информации.

Параметры наиболее распространенных дисплеев, используемых в терминальных станциях, представлены в табл. 6 и 7. В табл. 8 приведены характеристики устройств ввода/вывода графической информации.

Достаточно эффективно использование для графического диалога дисплеев на запоминающих трубках, стоимость которых на порядок ниже стоимости дисплеев с регенерацией изображения, а также специальных планшетов с координатной сеткой и указателем, позволяющих вводить значения координат в ЭВМ [51].

Диалоговый режим наиболее эффективен при подготовке исходных данных и при решении различных оптимизационных задач. Процесс взаимодействия состоит из следующих этапов: 1) описания инженерного объекта на входном языке; 2) передачи описаний на перфорирование; 3) перфорирование; 4) сеанса непосредственного взаимодействия с ЭВМ.

Этапы 1) — 3) выполняются при первичной подготовке исходных данных и в последующих сеансах взаимодействия могут отсутствовать. Длительность сеанса взаимодействия зависит от опыта пользователя и класса решаемых задач, но не должна превышать двух часов.

оперативного ввода графической информации; устройства оперативного графического взаимодействия проектировщика с машиной (дисплеи), предназначенные для отображения промежуточных графических результатов и их оперативной корректировки; устройства вывода графической информации (графопостроители, координатографы), предназначенные для документирования промежуточных и окончательных графических результатов проектирования.

В настоящее время серийно выпускаются автономные диалоговые вычислительные подсистемы, построенные на базе малых ЭВМ (типа СМ ЭВМ) и предназначенные для автоматизации проектирования в различных отраслях промышленности. К ним относятся такие комплексы технических и программных средств, как АРМ-Р (автоматизированное рабочее место проектировщика в радиоэлектронике), АРМ-М (место проектировщика в машиностроении), 15 УТ-4-07 (система, предназначенная для проектирования больших интегральных схем) [20].

АРМ-Р представляет собой совокупность технических и программных средств для организации диалоговых режимов проектирования радиоаппаратуры, а также выполнения различных работ, связанных с вводом/выводом, редактированием графической и текстовой информации. Ядром комплекса является мини-ЭВМ типа СМ-4 или НАИРИ-4. Процессор мини-ЭВМ связан общей шиной с периферийным оборудованием и с процессором большой ЭВМ. Прямой доступ к оперативной памяти имеет накопитель на магнитных дисках (НМД), накопитель на магнитных лентах (НМЛ) и графический дисплей (ЭПГ-400). Общесистемное математическое обеспечение АРМ-Р на базе дисковой ДОС с четырьмя разделами мультипрограммирования обеспечивает возможность модификации аппаратурных средств комплекса, ввода и вывода графических данных; проведения определенного объема вычислительных работ; подготовки информации для дальнейшей передачи ее на большую ЭВМ; отображения на дисплее и вывода результатов на графопостроитель; выпуск документации; корректировку и редактирование текстовой и смешанной информации; ввод типовых элементов в библиотеку и их редактирование.

В состав системы 15 УТ-4-07 входят мини-ЭВМ «Электроника-100—25», подсистема отображения и диалога, включающая кодировщик графической информации ЭМ-719, графический дисплей на ЗЭЛТ 15-ИГ-001, устройство управления маркером ЭМ-729, алфавитно-цифровой дисплей 15-ИЭ-002, пульт контроля и управления; графопостроитель ЭМ-721 (рулонный); внешнее запоминающее устройство на двух накопителях на сменных магнитных дисках ИЗОТ-1370 емкостью 25 мбит каждый (3 мбайт) и накопителя на МЛ ИЗОТ-5003 с объемом памяти 10^8 бит; подсистема документирования, включающая мозаичное алфавитно-цифровое печатающее устройство DZM-180 и печатающую машинку ЭПМ «Консул-260».

Система 15 УТ-4-07 может выполнять графическое описание топологического чертежа с параллельной визуализацией изображения и синтаксическим контролем; проектирование топологии, включая мультипликацию по осям X и Y ; формирование библиотеки элементов и архива на МД и МЛ, символическое или полное отображение элементов библиотеки разной сложности на графических терминалах; графиче-

в виде рабочего места, состоящего из планшета, на котором располагается кодируемый чертеж; съемника координат, имеющего гибкую связь с устройством; алфавитно-цифрового дисплея; накопителя на гибком магнитном диске. Функции управления устройством осуществляет микро-ЭВМ СМ-1800, которая осуществляет преобразование координат из системы координат планшета в систему координат чертежа, при этом гарантируется свободное расположение чертежа на поле планшета, округление значений координат в заданный шаг координатной сетки, контроль и выдачу диагностических сообщений, управление работой накопителя на гибком магнитном диске и алфавитно-цифрового дисплея и др.

Базовое программное обеспечение АРМ 2-01 позволяет выполнять следующее: описывать с помощью СМ-6404 на проблемно-ориентированном языке и вводить в ЭВМ графическую и текстовую информацию; вести диалог с ЭВМ на языке директив с любого рабочего места; редактировать графическую и алфавитно-цифровую информацию; формировать на магнитном диске оперативный архив результатов проектирования; обслуживать библиотеку стандартных элементов; выводить графическую и алфавитно-цифровую информацию на документирующие устройства.

Архитектура технического комплекса. Технический комплекс современной САПР рационально строить в виде трехуровневой системы, в которой на нижнем уровне находятся отдельные технические средства, на втором — терминальные станции и на третьем — центральные ресурсы системы: процессор, оперативная и внешняя памяти, каналобразующая аппаратура и главный пульт системы. Такой принцип построения системы позволяет снизить нагрузку на центральный вычислительный комплекс путем децентрализации функций управления терминальными устройствами.

В зависимости от варианта построения терминальной станции (ТС) в ее центральную часть могут быть введены мини- или микро-ЭВМ, специализированный многоканальный процессор для группового управления, аппаратура передачи данных и т. д. При этом центральный вычислительный комплекс выполняет следующие функции: организует работу и осуществляет координацию и управление всеми ТС САПР; реализует проектные процедуры и управляет моделью проекта.

Преимущества терминальной станции при использовании в ее составе малой ЭВМ следующие:

обеспечивает малое время реакции на запросы пользователя за счет обработки многих требований в самой станции независимо от центральной ЭВМ; станция размещается непосредственно на рабочем месте проектировщика, а не в вычислительном центре; реализация большого числа процедур в самой терминальной станции, ранее выполнявшихся в центральной ЭВМ, позволяет уменьшить объемы информации, передаваемые по каналу связи с большой ЭВМ, и тем самым организовать дистанционную работу станции по низкоскоростным дешевым каналам связи; мини-ЭВМ может быть применена в качестве ЭВМ общего назначения для решения задач неграфического характера; рационально распределяются функции в системе — центральная и мини-ЭВМ использует свои вычислительные ресурсы с большим эко-

генерировать изображения, формировать дисплейный файл, обмениваться информацией с центральной ЭВМ.

На рис. 9 показана современная многомашинальная вычислительная система, рекомендованная в качестве базовой учебной САПР для крупных вузов. Она строится на основе одной ЭВМ ЕС-1060, четырех ЭВМ ЕС-1033 (35) и восьми ЭВМ ЕС-1022, объединенных в систему, обеспечивающую функционирование соответствующих кабинетов автоматизированного проектирования, конструирования и технологической подготовки производства.

В частности, терминальные средства кабинета автоматизированного конструирования состоят из восьми алфавитно-цифровых дисплеев (АЦД) ЕС-7066 с двумя групповыми устройствами управления (ГУУ) ЕС-7906; двух графических дисплеев (ГД) с устройствами управления ЕС-7064; графопостроителя ЕС-7054; четырех алфавитно-цифровых дисплеев СМ-7206, АЦПУ СМ-6302 и устройства подготовки графической информации (УПГИ) СМ-6404. Такой кабинет обслуживает до 16 студентов, выполняющих следующие работы: написание и отладку программ в режиме диалога; исследования и расчеты в режиме диалога; формирование и обработку графической информации в режиме диалога; взаимодействие с банком данных иерархической структуры в режиме диалога.

В целом же учебная вузовская САПР рассмотренного типа позволяет проводить все виды учебных занятий для 2 тыс. студентов в кабинете проектирования (по 16 человек одновременно) и 2280 студентов в кабинете конструирования (по 16 человек одновременно), исходя из условия, что каждый студент за все время обучения должен затратить на практическую работу с ЭВМ 100...120 часов. Систему можно вводить в строй поэтапно: первая очередь — на ЭВМ ЕС-1022; вторая — на ЭВМ ЕС-1033 (35) с двумя ЕС-1022; третья — в полном объеме.

Велики перспективы САПР в связи с предстоящим переходом их технического комплекса на ЭВМ четвертого и пятого поколений. Вычислительные системы пятого поколения, построенные на основе сверхбольших интегральных схем (СБИС), охватывают широкий диапазон мощностей: от персональных ЭВМ с быстродействием 10 млн. операций в секунду и памятью 10 Мбайт (на 32 микропроцессорах) до супер-ЭВМ национального уровня ($10^8...10^4$ процессоров) с памятью до 10 Гбайт и производительностью до 10 млрд. операций в секунду. Например, в Японии уже в 1981 г. начат восьмилетний проект создания самой быстродействующей ЭВМ в мире с производительностью в десятки — сотни миллиардов операций.

Вычислительным системам пятого поколения, объединенным в единую вычислительную сеть, свойственно следующее:

простота взаимодействия пользователя с ЭВМ при помощи естественного языка, обычной речи и графических изображений, обеспечивающаяся специальной аппаратурой, называемой машиной с разумным интерфейсом (рис. 10); *способность обучаться*, осуществлять ассоциативную обработку информации и делать подобно человеку логические заключения, что позволит с помощью специальной аппаратуры (ЭВМ решения задач и логического мышления) вести пользователю разумную беседу с ЭВМ, осуществляя взаимодействие в виде вопросов и ответов;

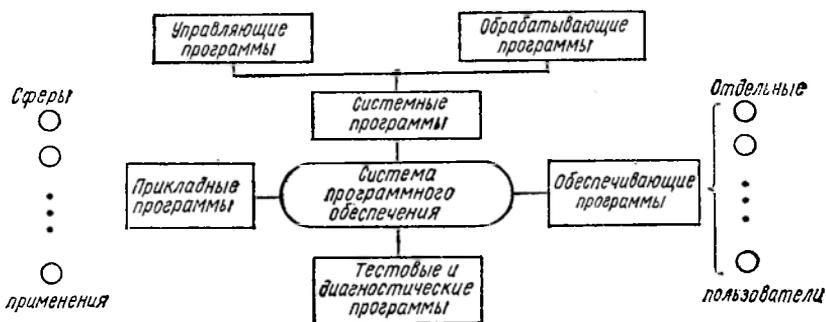


Рис. 11. Структурная схема программного обеспечения ЕС ЭВМ.

параметры технического комплекса САПР и его общего программного обеспечения; круг пользователей САПР и др.

Оптимизация экономических параметров САПР осуществляется с помощью прогрессивных методов программирования [29], использования принципа модульности как на уровне программ, так и на уровне языка взаимодействия, организацией общей базы данных, созданием автономных подсистем предварительной подготовки исходных данных.

Общесистемное обеспечение. Технические параметры общего программного обеспечения САПР определяются существующей номенклатурой операционных систем и комплексов программ технического обслуживания [73]. Основными операционными системами (ОС) ЕС ЭВМ являются ОС ЕС и ДОС ЕС, предназначенные для использования на всех совместимых моделях ЕС ЭВМ. Операционные системы обеспечивают высокий уровень производительности вычислительной системы, позволяя программисту: делить задачу на части и кодировать каждую из них на языке, наиболее для нее подходящем, затем объединять в готовую к выполнению программу; делить большую программу на секции для уменьшения потребности в оперативной памяти; автоматизировать процесс отладки программ; помещать готовые к выполнению программы в системную библиотеку и получать доступ к ним с помощью символических запросов; выполнять программу непосредственно после ее трансляции либо запоминать результат трансляции; использовать стандартные процедуры ввода/вывода для работы с данными.

Операционная система представляет собой несколько программных библиотек и системных таблиц. Основными компонентами ОС являются управляющие, обрабатывающие, а также сервисные (обеспечивающие и тестово-диагностические) программы (рис. 11).

Управляющие программы реализуют функции управления заданиями, выполнения программ и управления данными. Управляющая программа следит за выполнением обрабатывающих и прикладных программ, составленных пользователем. В состав управляющих программ входят: программа управления задачами (супервизор), управляющая ходом вычислительного процесса на машине; программа управления заданиями, подготавливающая систему для выполнения пакета заданий; программы управления данными, осуществляющие передачу данных между основной памятью и внешними устройствами; про-

сменяющимися друг друга. Для сложных задач удобней использование динамических структур абсолютных модулей, когда сегменты вызываются и загружаются при выполнении программы по мере необходимости.

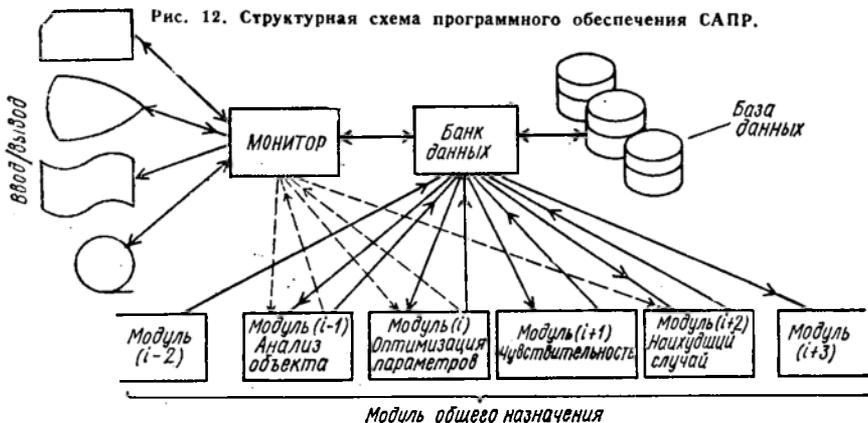
Операционная система содержит следующие сервисные программы: РЕДАКТОР СВЯЗЕЙ для получения программы, готовой к исполнению на ЭВМ; СОРТИРОВКА — ОБЪЕДИНЕНИЕ (БИБЛИОТЕКАРЬ) для корректировки и обслуживания библиотек ОС, неавтономной проверки внешних устройств; перезаписи массивов с носителя на носитель, перегруппировки записей и упорядочения массивов (утилиты); составления печатных отчетов на проблемно-ориентированном языке и др.

Сервисные программы объединяют транслируемые модули в одну или несколько исполняемых программ, составляют перекрывающиеся абсолютные модули, резервируют память для общих областей. Предусмотрена работа с библиотеками программ, реализующих функции копирования, обновления, сжатия и пополнения библиотек, а также создания личных библиотек. Программное обеспечение предусматривает средства для отладки программ и редактирования отлаженных программ, тестирования и диагностики функционирования технических и программных средств вычислительной системы.

Операционная система имеет модульную структуру, позволяющую приспособлять ее к конкретным конфигурациям технических средств ЕС ЭВМ. Программные компоненты ОС, а также конкретные функции управляющей программы могут включаться в систему выборочно. Процесс создания конкретной структуры ОС, учитывающей особенности ЭВМ и задач потребителя, называется генерацией системы. Средства генерации системы представляют собой совокупность программ и правил, позволяющих пользователю сгенерировать ОС для конкретных целей.

В многоуровневой САПР с терминальными станциями имеются специальные программные средства, обеспечивающие реализацию методов управления групповой работой и взаимодействием технических средств, а также подключение ТС к центральной ЭВМ через коммутируемые телефонные каналы связи. Эти общесистемные программные средства обеспечивают: возможность реализации групповых операций, одновременно выполняемых несколькими операторами ТС в режиме разделения времени; построение, модификации и манипулирование сложными иерархическими структурами данных; реализацию и контроль процессов ввода, вывода и редактирования командной, алфавитно-цифровой и графической информации с использованием разнообразных периферийных технических средств терминальных станций САПР; реализацию режима диалогового взаимодействия пользователей и информационными ресурсами системы с помощью средств машинной графики; работу с базой данных и пакетами прикладных программ в диалоговом режиме; реализацию многоуровневого протокола обмена информацией с центральным вычислительным комплексом по каналам связи; контроль и диагностику с широким охватом технических и программных средств терминальных станций; контроль доступа к информационным ресурсам системы; управление личными рабочими и ар-

Рис. 12. Структурная схема программного обеспечения САПР.



реализующая некоторую процедуру управления или преобразования информации.

Взаимодействие и функционирование программных модулей осуществляется через банк данных, для чего унифицируются их интерфейсы и форматы данных. Вновь создаваемые модули можно непосредственно подключать к базе данных. Если же в систему вводятся программные модули, которые разрабатывались ранее и уже эксплуатировались, то необходима разработка дополнительных небольших процедур преобразования форматов входных и выходных данных (пред- и постпроцессоров).

Подобная структура позволяет легко наращивать функциональные возможности системы, расширяя набор программных модулей и, кроме того, модифицируя существующие программные модули. Практическую ценность этого качества трудно переоценить, поскольку даже продуманная, тщательно отлаженная система программ имеет ошибки, которые обнаруживаются не только при экспериментальных исследованиях, но и в процессе последующей эксплуатации. Модульная структура САПР и специальные средства автоматизации включения новых программных модулей позволяет пользователю свободно развивать систему и адаптировать ее соответственно своим задачам.

Пользователь САПР взаимодействует преимущественно с банком данных через стандартные модули ввода/вывода универсального МОНИТОРА (рис. 12). Только в особых случаях он может вводить данные в программные модули и получать от них информацию (пунктирные линии на рис. 8). Унификация процедур ввода/вывода в такой системе позволяет использовать входные языки различных типов (свободного формата и жесткие — табличные), применять различные носители и организовывать пакетный или диалоговый режимы работы.

Планирование последовательности выполнения отдельных прикладных программных модулей (на основании приоритетов реализуемых ими процедур), управление банком данных, организация ввода и вывода данных осуществляется МОНИТОРОМ (рис. 12), настройка которого осуществляется описательными и управляющими операторами входного проблемно-ориентированного языка, модули которого постоянно находятся в оперативной памяти ЭВМ.

рования, пакет графических программ и информационно-справочная подсистема.

Монитор ЕС ЭВМ предназначен для написания, отладки и выполнения программ на языках АССЕМБЛЕР, ФОРТРАН и ПЛ-1 и обеспечения обмена сообщениями между алфавитно-цифровыми дисплеями и функциональными программами, а также управления ресурсами ЭВМ. Монитор должен иметь стандартный набор функциональных программ для ввода программ и данных пользователей в диалоговом режиме, синтаксического анализа и корректировки текстов программ, оформления заданий и передачи их для выполнения в пакетном и диалоговом режимах.

Диалоговая система программирования ЕС ЭВМ предназначена для решения исследовательских и проектных задач в режиме диалога с использованием алфавитно-цифровых дисплеев и устройств отображения графической информации. Система должна предоставлять пользователю: язык диалога; средства для синтаксического анализа и динамической отладки программ в режиме интерпретации; средства создания, модификации, хранения и вывода программ и данных; средства выполнения диалоговых программ; средства для вызова в рабочих программах модулей, написанных на языках ФОРТРАН, ПЛ-1; возможность выдачи протокола сеанса работы с ЭВМ.

Диалоговая система программирования должна обеспечивать одновременную работу 16 пользователей.

Пакет графических программ при работе с экранным пультом ГТС должен выполнять: формирование и вывод графической информации на экранный пульт или графопостроитель; построение и преобразование плоских изображений; изображение трехмерных объектов; построение изолиний.

Обращение к программам пакета допускается из программ, написанных на языках ФОРТРАН, ПЛ-1, а также на языке диалога.

Информационно-справочная подсистема должна обеспечивать: создание базы данных сетевой структуры; организацию эффективного доступа к записям в базе данных; добавление или исключение отдельных элементов данных из записей.

В качестве монитора ЕС можно использовать, например монитор операционной системы ОС ЕС версии 6.1 или монитор PRIMUS (priority monitor of users), функционирующий под управлением операционной системы ОС ЕС версии 4.0 и старше и обеспечивает одновременную работу 16 пользователей на алфавитно-цифровых дисплеях ЕС 7066.

Примерами диалоговых систем программирования являются система ДИАЛ, разработанная в Московском инженерно-физическом институте, системы ДИПРОФОР (диалоговое программирование на ФОРТРАНЕ) и АФРОДИТА (автоматизированный ФОРТРАН — режим обучающего диалога с терминалом автора), созданные в Институте кибернетики АН УССР.

Системы диалогового программирования представляют пользователю возможность составить программу решения задачи на неизвестном ему языке (при условии, что сам алгоритм решения задачи у пользователя имеется). Подобная система подсказывает пользователю операторы языка программирования, анализирует ответы на вопросы, задаваемые системой. Таким образом, целью диалога в подобных систе-

своей задачи тратит примерно такое же время, как и опытный пользователь. Как правило, после 4...5 программ, сконструированных под управлением системы, пользователь усваивал язык программирования и далее мог работать самостоятельно. В то же время при обучении обычным способом пользователь-непрофессионал приступал к самостоятельной работе лишь после 30 часов предварительной подготовки.

Автоматизированные обучающие системы (АОС) создают для пользователей-непрофессионалов обслуживающую и обучающую среду, помогающую им уточнять формулировку своих задач, разработать метод и алгоритм их решения, построить программу, не изучая подробно язык программирования. Вычислительная машина снабжает пользователя необходимыми сведениями по интересующей его задаче, возможным средствам ее решения, а также эффективно обучает пользователя применению этих средств.

АОС бывают двух типов: с фиксированным сценарием и генерирующие обучающие системы (ГОС). Обучение в АОС первого типа осуществляется по заранее разработанной схеме. Изучаемый материал разделен на информационные порции, сформулированы вопросы и императивы, с помощью которых контролируется процесс обучения, заданы эталоны ответов. Разработка сценариев обучения для таких АОС представляет собой трудоемкий процесс. В частности, для создания обучающего курса, рассчитанного на 30-часовое взаимодействие пользователя с ЭВМ с помощью дисплея, требуются затраты до двух человеко-лет. Примерами таких систем являются системы ПЕДАГОГ и СПОК (система программирования обучающихся курсов), разработанные в Институте кибернетики АН УССР.

Сценарий обучения (тренировки) в АОС второго типа строится в процессе непосредственного обучения, т. е. в период взаимодействия человека с ЭВМ. При этом в системе реализуется двухстороннее управление (от пользователя и от ЭВМ), распределение функций между человеком и машиной перестраивается на основании критериев эффективности. В результате обеспечивается наилучшее использование возможностей человека и ЭВМ.

Прообразом таких АОС может служить диалоговый КОНСТРУКТОР алгоритмов, если в нем объединить возможности систем ДИСКАОД, АКАОД и СВАРЗ (система ввода алгоритмов решения задач с удаленного терминала), реализовав переходы от режима к режиму не только по инициативе пользователя, но и ЭВМ. В таком случае обеспечивается автоматизированное конструирование отдельных фрагментов программы в процессе взаимодействия пользователя с подсистемами ДИСКАОД и АКАОД и самостоятельное написание программы или ее фрагментов пользователем (подсистема СВАРЗ). Примерами генерирующих обучающих систем являются системы SCHOLAR (США) и ГЕОГРАФ (СССР). Последняя реализована в Институте кибернетики АН УССР на базе программной системы ПРОЛОГ-ЕС, предназначенной для решения задач искусственного интеллекта. К АОС второго типа относят также тренирующие системы, предназначенные для накопления опыта принятия решений в сложной, критической и постоянно меняющейся обстановке. Примером такого тренажера является выпол-

мощности внешних ЗУ; изменения конфигурации диалоговых средств; введения дополнительных спецпроцессоров и др.

Входной поток в программную модель представляется потоком заявок-заданий на обслуживание, отображающих последовательность фаз проектных процедур счет — ввод/вывод. Дополнительно задаются законы распределения времени обслуживания, дисциплины обслуживания, ограничения на допустимую величину времени обслуживания в диалоговом режиме.

Основными характеристиками ВС, полученными в результате моделирования, являются функции распределения пребывания заявок в системе, время ожидания в очереди, загрузка ЭВМ и пользователя, время выполнения заданий указанного объема, длина очередей заявок в различных подсистемах, коэффициенты занятости ресурсов системы, время безотказной работы системы и др.

Критерием эффективности ВС служит относительная оценка комплексной производительности, характеризующая долю процессорного времени в общем времени прохождения потока заданий. Такая оценка позволяет определить степень сбалансированности технических средств САПР, в частности, сбалансированность быстродействия процессора и средств ввода/вывода, например загрузку мультиплексорных и селекторных каналов. Указанная сбалансированность улучшается повышением уровня мультипрограммирования в САПР, повышением относительного объема запросов к мультиплексорному каналу и др.

Исследуя с помощью имитационных моделей различные варианты архитектуры аппаратно-программных средств САПР, разрабатываемых под конкретные проектные задачи, можно получить оценки загрузки элементов системы в зависимости от ряда основных факторов (пропускной способности каналов, производительности процессора, потоков заявок на обслуживание), и тем самым обосновать рациональный выбор технических и программных средств проектируемой САПР. Отметим, что при реализации имитационной модели ВС обычно используется один из известных языков системного анализа типа GPSS, НЕДИС, СИМКРИПТ и т. д.

Примерами рассмотренных имитационных моделей могут служить пакет прикладных программ для сравнительного анализа характеристик вычислительного процесса на различных схемах комплексирования САПР из имеющейся номенклатуры технических средств, созданный в Институте технической кибернетики АН БССР, и пакет программ исследования и проектирования графических диалоговых систем, разработанный в Киевском политехническом институте. Экспериментальный вычислительный комплекс, позволяющий формировать конфигурацию аппаратно-программных средств проектируемой САПР, функционирует также в Институте кибернетики АН УССР.

Особенности организационной структуры САПР аналогичны особенностям автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и предприятиями в целом (АСУ).

Особенности задач автоматизации проектирования состоят, прежде всего, в том, что в большинстве случаев дать формальную полную постановку задачи сложно, и поэтому проектировщик-пользователь должен самостоятельно доопределять эту задачу на основе опыта, интуиции и т. д. Это обстоятельство предопределяет итерационный характер проектирования, требующий многочисленных модификаций и проверок решений в процессе разработки модели объекта и соответствующей проектной документации.

В зависимости от степени неопределенности условий принятия решений можно выделить три типа проектных процедур, характерных для задач проектирования.

1. Полностью детерминированная процедура, когда имеется алгоритм принятия решения, заданный в виде жесткой последовательности проектных операций, и все необходимые данные для них находятся в системе. Роль проектировщика-пользователя состоит в том, чтобы принять окончательное решение путем включения в нужный момент этой процедуры и оценки результатов ее работы.

2. Алгоритмически определенная процедура, но с неопределенными исходными данными. В отличие от первого типа здесь нет полного набора данных и, кроме того, часть необходимых данных может быть задана в виде допустимых диапазонов их изменения. Проектировщик-пользователь в этом случае формирует в диалоговом режиме с ЭВМ разные наборы исходных данных для различных проектных операций, пока не будет получено и оценено приемлемое проектное решение.

3. Процедура с неопределенным алгоритмом. В этом случае отсутствует формальный метод решения данной проектной задачи и известны лишь некоторые эвристические приемы, основанные на опыте решения аналогичных задач. Проектировщик, опираясь на интуицию и опыт, составляет несколько альтернативных вариантов решения и методом проб и ошибок решает задачу, настраивая ЭВМ на соответствующий вариант решения. ЭВМ реализует проектные процедуры и количественно оценивает варианты получаемых решений.

Таким образом, процедуры проектирования имеют алгоритмический и эвристический характеры, что в настоящее время исключает их полную автоматизацию. Поэтому САПР строятся как человеко-машинные системы, в которых объединены интеллект человека и совокупность формализованных знаний, хранящихся в памяти ЭВМ.

Сотрудничество пользователя и ЭВМ. В САПР вычислительная машина дополняет человека, но не заменяет его. Рассмотрим основные особенности сотрудничества человека и ЭВМ.

● *Логический метод рассуждения.* У человека он основан на интуиции, на использовании накопленного опыта и воображения. Метод машины — строгий и систематический. Наиболее удачным является сочетание, когда ЭВМ реализует отдельные небольшие процедуры, а их логическая последовательность определяется человеком — творцом проектируемого объекта.

● *Способность к обучению.* Человек обучается постепенно, степень

- *Способность к сосредотачиванию.* Эта способность у человека зависит от многих факторов, например продолжительности и напряжения внимания, влияния среды, общего состояния. Усталостью обуславливается рассеянность, удлинение реакций, нецелесообразные действия. В связи с этим интерактивная система с разделением времени должна адаптироваться к времени реакции отдельного пользователя.
- *Терпение.* При многократном повторении одних и тех же действий человек может испытывать чувство досады. Поэтому предусматривается, например введение исходных данных одним массивом при многократном их анализе. Для того чтобы не приходилось долго ждать ответа на запрос пользователя, необходимо правильно соизмерять выполняемые ЭВМ процедуры, а также распределять время между несколькими терминалами.
- *Самочувствие.* ЭВМ должна беречь самочувствие проектировщика, его чувство собственного достоинства и показывать ему, что именно машина его обслуживает, а не наоборот. Вопросы, ответы и замечания должны соответствовать разговору между подчиненным и его руководителем-проектировщиком, определяющим ход и направление процесса проектирования.
- *Эмоциональность.* Это чувство свойственно человеку и чуждо ЭВМ. САПР должна возбуждать у пользователя положительные эмоции: радость, удовлетворение, надежду и не допускать проявления отрицательных: досады, гнева, отчаяния.
- *Удобство рабочего места.* Проектировщик в режиме диалога с ЭВМ использует функциональную и алфавитно-цифровую клавиатуру, оперирует световым пером и другими средствами ввода и редактирования информации. Во время работы он обычно использует записки, эскизы, таблицы, чертежи и т. д. Необходимо предусмотреть рабочее место проектировщика и обеспечить его привычными удобствами для работы.

В процессе автоматизированного проектирования, имеющего характер совокупности актов принятия проектных решений, ЭВМ по отношению к пользователю может выступать как 1) информатор, 2) советчик или 3) партнер.

В первом случае ЭВМ полностью подчинена пользователю и по его указаниям быстро и точно отыскивает стандарты, технические требования, правила, каталоги, спецификации и другую информацию; осуществляет вычисления и проверки; выполняет эскизы, чертежи, копии и др.

Во втором случае ЭВМ, опираясь на результаты работы подсистем поиска решений технической задачи и инженерного анализа, предлагает для утверждения пользователю по его запросам различные варианты решения всей задачи или отдельных ее подзадач, снабжая объективной сравнительной информацией и указывая предпочтительные варианты. Это по существу, уже третий случай — вариант партнерства, которое усиливается, если процесс проектирования строится с учетом того, что проектировщик-пользователь знает, какие задачи необходимо решать, а ЭВМ знает, как эти задачи решаются. ЭВМ запрашивает у пользователя необходимые ей исходные данные, анализирует их, составляет план решения задачи и сообщает о результатах. Возможным

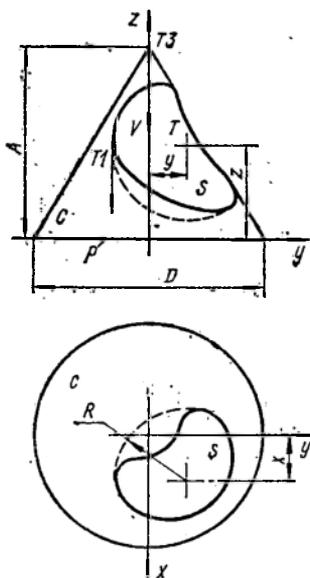


Рис. 13. Пример пространственной фигуры, моделируемой операторами языка ФАП-КФ.

управляющих программ к станкам с ЧПУ; в задачах раскроя материала на фигурные заготовки; для кодирования деталей конструкций, заданных машиностроительным чертежом; в других задачах, которые могут быть решены путем геометрического моделирования.

С точки зрения пользователя ФАП-КФ представляет собой расширение возможностей языка ФОРТРАН-IV с помощью геометрических переменных (линии и поверхности первого и второго порядка, а также геометрические объекты, составленные из их частей) и операций. Пакет содержит свыше 200 геометрических операторов для построения геометрических объектов и выполнения различных действий над ними — переноса, вращения, объединения нескольких объектов под одним именем, вычисления площадей, моментов инерции, построения эквидистант, пересечения и объединения областей, лекальных кривых, линий пересечения поверхностей и т. д. Пакет включает также средства для анализа геометрических объектов и их взаимного расположения и вывода графической информации на устройства графического отображения.

Язык пакета прост. В основном, пользователю приходится иметь дело с именами объектов, а не с их координатами. Размещение информации о геометрических объектах в памяти ЭВМ осуществляется пакетом программ без участия пользователя. Геометрические операторы и операторы языка ФОРТРАН могут произвольно чередоваться друг с другом. Параметрами функций и подпрограмм могут быть как геометрические, так и арифметические переменные. Геометрические переменные могут быть объединены в массивы.

Пакет реализован на языке ФОРТРАН-IV для ЕС ЭВМ и состоит из 760 модулей. В пакете имеются развитые средства диагностики оши-

графической информации в программах автоматизированного проектирования и разработки приемлемых средств для манипулирования этой информацией. Кроме того, при автоматизированном проектировании основными затратами ручного труда приходится на кодирование и последующий контроль графической информации.

Пакет программ ФАП-КФ предназначен для автоматизации геометрического моделирования и инженерно-графических работ при создании систем автоматизированного проектирования в машиностроении и может быть использован: для автоматизации инженерно-графических работ; в качестве языка программирования при разработке геометрических модулей в системах автоматизации конструирования и технологической подготовки производства; для моделирования кинематики механизмов; для программирования алгоритмов формирования траекторий движения инструмента при автоматической подготовке

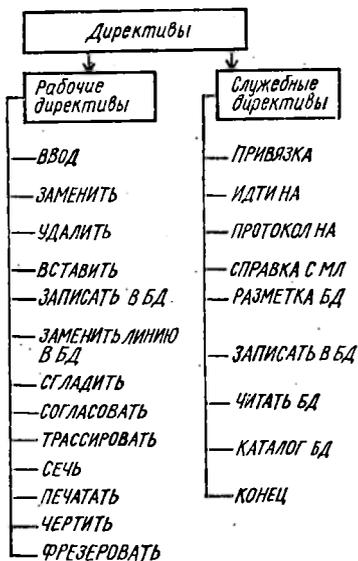


Рис. 16. Классификация директив САПР ГЕОМЕТРИЯ.

Наконец, кусочно-аналитическая модель объекта определяется оператором

$$D = DKUS(U_1, U_2)$$

На рис. 14—15 показаны возможности языка ФАП-КФ для моделирования кинематики механизма, построения эквидистанты плоской фигуры [19].

● Язык ПОЯД — проблемно-ориентированный язык директив [66]. Он используется для управления процессами ввода графических данных, формирования цифровой модели изображения и вывода ее на внешние устройства. Особенность языков этого типа состоит в том, что они не являются простым расширением обычных языков программирования, а используют их в качестве средства своей реализации. При этом они освобождают конструктора от необходимости программировать каждый раз свои действия.

Рассмотрим формальную грамматику языка директив САПР ГЕОМЕТРИЯ, заданную множеством (3.1).

Директивы языка условно разделяют на две группы: рабочие и служебные.

Рабочие директивы предназначены для переноса теоретического чертежа в память ЭВМ, создания модели проектируемого объекта в базе данных, его анализа и оперативного отображения в алфавитно-цифровом и графическом виде. Служебные — используют для организации работы внешних устройств систем, получения справок о состоянии проекта в базе данных, подготовки базы данных к работе, транспортировки ее на внешние носители и т. д. На рис. 16 представлена схема классификации директив.

Описание директивы выполним металингвистическими формулами, которые заканчиваются символом \diamond . Директива представляется в следующем виде:

$$\langle \text{директива} \rangle = \langle \text{код директивы} \rangle \diamond$$

$$\langle \text{код директивы} \rangle$$

$$\langle \text{информационная часть} \rangle \diamond$$

$$\langle \text{код директивы} \rangle = \text{ВВОД} \mid \text{ЗАМЕНИТЬ} \mid \text{УДАЛИТЬ} \mid \text{ВСТАВИТЬ} \mid \text{ЗАПИСАТЬ В БД} \mid \text{ЗАМЕНИТЬ ЛИНИЮ В БД} \mid \text{СГЛАДИТЬ} \mid \text{СОГЛАСОВАТЬ} \mid$$

$$\text{ТРАССИРОВАТЬ} \mid$$

$$\text{СЕЧЬ} \mid \text{ПЕЧАТАТЬ} \mid \text{ЧЕРТИТЬ} \mid$$

$$\text{ФРЕЗЕРОВАТЬ} \mid$$

$$\text{ПРИВЯЗКА} \mid \text{ИДТИ НА} \mid \text{ПРОТОКОЛ}$$

$$\text{НА} \mid$$

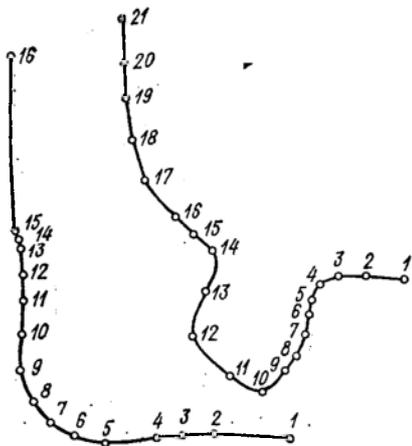


Рис. 17. Линии, определяемые директивой ВВОД.

На рис. 17 показаны модели линий, полученные после выполнения директивы ВВОД. Директиве ВВОД предшествует директива ПРИВЯЗКА (системе координат).

Директива ПРИВЯЗКА предназначена для преобразования координат рабочего поля ПАСГИ в координаты теоретического чертежа. Ее формат:

$\langle \text{ПРИВЯЗКА} \rangle \langle N : M \rangle$

$\langle A1 \sqcup A2 \rangle \diamond$

где $N : M$ — масштаб, в котором выполнен теоретический чертеж;

$A1, A2$ — координаты двух точек оси абсцисс теоретического чертежа.

Директивы ЗАМЕНИТЬ, УДАЛИТЬ, ВСТАВИТЬ предназначены

для модификации формы линии с помощью редактирования ее базисных точек.

Формат директивы следующий:

$\langle \text{ААААА} \rangle \langle \text{ИМЯ} \rangle \langle \text{место редактирования} \rangle \langle \text{координаты редактируемых точек} \rangle \diamond \langle \text{место редактирования} \rangle : = \langle \text{номер гладкого участка линии} \rangle \langle \text{номер базисной точки на нем} \rangle$

Директива СГЛАДИТЬ предназначена для уточнения формы теоретической линии, полученной с помощью директив ВВОД, ЗАМЕНИТЬ, ВСТАВИТЬ, УДАЛИТЬ.

Изменяется форма линии вводом значений кривизны с алфавитно-цифровой клавиатуры или рабочего поля устройства ввода. Переменная кривизна описывается следующей формулой:

$\langle \text{кривизна} \rangle : = \langle \text{число} \rangle$

Для контроля величины отклонения от исходной теоретической линии используется переменная отклонения от линии:

$\langle \text{отклонение от линии} \rangle : = \langle \text{отклонение} \rangle \langle \text{отклонение от линии} \rangle \langle \text{уточненное отклонение от линии} \rangle$

$\langle \text{отклонение} \rangle : = \langle \text{число} \rangle$

Директива СГЛАДИТЬ имеет следующие форматы:

$\langle \text{СГЛАДИТЬ} \rangle \langle \text{ИМЯ} \rangle \langle \text{отклонение от линии} \rangle$

$\langle \text{место сглаживания} \rangle$

$\langle \text{кривизна} \rangle \diamond$

$\langle \text{СГЛАДИТЬ} \rangle \langle \text{отклонение от линии} \rangle$

$\langle \text{место сглаживания} \rangle$

$\langle \text{кривизна} \rangle$

Директива СЕЧЬ предназначена для формирования в рабочей области системы и базе данных линий сечений, получаемых при сечении поверхности семейством параллельных плоскостей. В частном случае можно сечь одну линию, получая в результате точки в рабочей области системы. Директива имеет следующие форматы:

$\langle \text{СЕЧЬ} \rangle \langle \text{семейство плоскостей} \rangle \diamond$

| КАБИНЕТНАЯ | ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ |
 <ПАРАМЕТРЫ ПРОЕКЦИИ>:: = ПАРАМЕТРЫ
 АКСОНОМЕТРИИ | ПАРАМЕТРЫ ПЕРСПЕКТИВЫ |
 <ПАРАМЕТРЫ АКСОНОМЕТРИИ>:: = УГЛЫ НАКЛОНА
 ОСЕЙ | ПОКАЗАТЕЛИ ИСКАЖЕНИЯ |
 <ПАРАМЕТРЫ ПЕРСПЕКТИВЫ>:: = РАССТОЯНИЕ ДО
 ОБЪЕКТА | ЦЕНТРАЛЬНАЯ ТОЧКА СХОДА |

На рис. 20 показан каркас корпуса судна, спроектированный с помощью директивы

<ЧЕРТИТЬ><КАРКАС><ИТЕКАН—З><АКСОНОМЕТРИЯ
 ЗЕРКАЛО> ◇

Кроме языков ФАП-КФ и ПОЯД для кодирования и преобразования графической информации широко применяются языки ЯГТИ (в АРМах первого поколения) и ЯСЧЕР (в АРМах второго поколения).

● *Язык СПАРС* — язык схемотехнического проектирования аналоговых радиоэлектронных схем [47, 50]. Язык СПАРС позволяет пользователю представить любую часть объекта исследования (диод, транзистор, трансформатор, микросхема, повторяющийся фрагмент схемы и т. п.) в виде многополюсника и описывать его отдельно. При этом язык описания СПАРС обеспечивает возможность раздельного (наряду с совмещенным) описания структуры, значений элементов и параметров многополюсных компонентов в виде символических моделей и списков параметров. Это делает входной язык инвариантным в отношении схем замещения и позволяет задавать информацию о многополюсниках (приборах) в удобном и общепринятом виде, каким являются наборы параметров конкретных схем замещения или макромодулей. Количество уровней вложенности моделей в языке СПАРС не ограничивается.

Прежде чем приступить к описанию объекта исследования схемы на входном языке ППП СПАРС, пользователь присваивает всем узлам и элементам схемы некоторые имена, формируемые из числа букв латинского и русского алфавитов, а также десятичных цифр. В трансляторе СПАРС для идентификации используются первые восемь символов имени, а остальные игнорируются. Пользователем также задаются положительные направления токов всех элементов объекта исследования и выбираются модели используемых многополюсников. Описание объекта исследования должно состоять только из операторов языка описания, а задание на обработку — из директив языка управления заданиями. Помещенные во входной поток данных, они образуют, соответственно, файл описания и файл задания, закрываемые символом*. Тип файла определяется первым предложением: оператор — файл задания; директива — файл задания. Первым символом каждой из директив является угловая открывающая скобка «<».

Во входном языке СПАРС функциональные зависимости могут быть заданы набором стандартных функций или с помощью таблиц. Функционально заданный элемент исходного объекта исследования на входном языке СПАРС представляется следующим образом:

<ИЭ>, <НУ> — <КУ> = F <НФ> (<СП> {;} <СА>),

где ИЭ — имя элемента, первый символ которого определяет тип элемента (E, J, R, C, L, G); НУ — начальный узел подключения эле-

мента; КУ — конечный узел подключения элемента; НФ — номер функции в стандартном наборе функций; СП — список параметров описываемой функции; СА — список аргументов функции.

Таблично заданные элементы описываются следующим образом:

$$\langle \text{НЭ} \rangle, \langle \text{НУ} \rangle - \langle \text{КУ} \rangle = \langle \text{ИТ} \rangle (\langle \text{ИА} \rangle),$$

где дополнительными параметрами служат: ИТ — имя таблицы и ИА — имя аргумента.

Пользователь может вводить свои произвольные функциональные зависимости, необходимые для описания новых моделей и макромоделей. При этом описание новых функций производится на языке ФОРТРАН-IV с помощью специальной подпрограммы USEREX.

Входной язык СПАРС предназначен для описания объектов исследования, в которых численные значения параметров сопровождаются масштабными коэффициентами (например, $T-10^{12}$, $N-10^9$, $ME-10^{-6}$, $K-10^3$), но допускается использование чисел без указания коэффициентов. В первом случае число умножается транслятором на соответствующие коэффициенты, а во втором — воспринимаются без преобразований.

Вид исследования определяется с помощью специальных директив вида задания: $\langle \text{TR} \rangle$ — анализ реакций схемы во временной области; $\langle \text{AC} \rangle$ — анализ частотных характеристик схемы; $\langle \text{SA} \rangle$ — анализ параметрической чувствительности; $\langle \text{SOF} \rangle$ — получение символьно-операторных выражений передаточных функций; $\langle \text{STA} \rangle$ — статистический анализ; $\langle \text{WC} \rangle$ — расчет худшего случая; $\langle \text{OPTIM} \rangle$ — параметрическая оптимизация; $\langle \text{DC} \rangle$ — анализ статического режима.

Выходные переменные определяются с помощью директив выдачи результатов: $\langle \text{PRINT} \rangle$ — печать таблиц текущих значений; $\langle \text{PLOT} \rangle$ — выдача построения чертежей графиков; $\langle \text{PPLOT} \rangle$ — построение чертежей с предварительной печатью значений переменных, выводимых на чертеж в виде таблиц; $\langle \text{LPLOT} \rangle$ и $\langle \text{LPLOT} \rangle$ — то же, что и $\langle \text{PLOT} \rangle$ и $\langle \text{PPLOT} \rangle$, но с логарифмическим масштабом изменения аргумента.

Во входном языке СПАРС имеются средства автоматического определения параметров частотных и временных характеристик, оказывающие существенное влияние на степень удобства практического использования пакета. Они имеют директивы $\langle \text{FFIX} \rangle$ — для фиксации значений аргументов; $\langle \text{FINT} \rangle$ — для определения интервалов; $\langle \text{FMAX} \rangle$ и $\langle \text{FMIN} \rangle$ — для определения максимального или минимального значения и т. д. Например, с помощью директив $\langle \text{FINT} \rangle$ и $\langle \text{FFIX} \rangle$ можно автоматически определять длительность импульсов, фронтов импульсов, полосы пропускания.

На характер расчета (время, сходимость, точность и др.) сильно влияют значения программных переменных, доступ к которым осуществляется с помощью директивы $\langle \text{RUN} \rangle$. Пользователь может настраивать исполнительные программы для каждой конкретной задачи с целью достижения лучших результатов счета. Особенно это важно в задачах нелинейной оптимизации, когда резко возрастают затраты машинного времени из-за итеративного характера вычислительного процесса.

$$L_1 = 0,1; L_2 = 1,14 \cdot 10^{-5}; L_3 = 1,14 \cdot 10^{-5}; E_2 = 1iC;$$

$$J_1 = 9,57 \cdot 10^{-4} u_{E1}, J_2 = 40u_{C3}; J_3 = 40u_{J2} \text{ и } J_4 = 1u_{g3},$$

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

* * * * *

- 1 МОДЕЛЬ ЗОЛОТНИК
- 2 ЭЛЕМЕНТЫ:
- 3 E1, 1 — 10 = ТАБ1(ВРЕМЯ);
- 4 C1, 1 — 10 = 1;
- 5 C2, 5 — 10 = 1,7E — 3;
- 6 C3, 8 — 10 = 2,1E — 2;
- 7 C4, 9 — 10 = 1; ,
- 8 C5, 2 — 10 = 2,0E — 4;
- 9 G1, 2 — 10 = 0,01;
- 10 G2, 3 — 10 = 4,97E3;
- 11 G3, 8 — 10 = 0,06;
- 12 R1, 3 — 4 = 0,8E — 3;
- 13 R2, 6 — 7 = 0,8E — 3;
- 14 L1, 2 — 10 = 0,1;
- 15 L2, 4 — 5 = 1,14E — 5;
- 16 L3, 5 — 6 = 1,14E — 5;
- 17 E2, 2 — 10 = FL (1./IC1);
- 18 J1, 10 — 3 = FL (9,57E4/UE1);
- 19 J2, 7 — 10 = FL (40./UC3);
- 20 J3, 10 — 8 = FL (40./UJ2);
- 21 J4, 10 — 9 = FL (1./UG3);
- 22 ФУНКЦИИ:
- 23 ТАБ1 = 0., 0., 0.1,0.5,0.3,0.5,0.4,0.5,0.44,—0.2,0.6,—0.2,
0.64,0.0

НЕТ НЕВЕРНЫХ ОПЕРАТОРОВ В ЭТОМ ОПИСАНИИ

ЗАДАНИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЕ

* * * * *

- 1 <TR;
- 2 <AC;
- 3 *ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ;
- 4 <FUNC, KU = UC4/UE1;
- 5 <PLOT, MA, KU, PH, KU;
- 6 <PLOT, DB. KU, PH, KU;
- 7 <RUN, TMAX = 1;
- 8 <RUN, FMIN = 1, FMAX = 10;

Смысл большинства предложений этого описания очевиден. Для удобства изложения операторы языка СПАРС пронумерованы последовательно. Оператор модели 1 определяет начало описания и содержит имя модели. Операторы элементов 3...21 предназначены для отображения двухполюсных элементов. Зависимые источники описываются с помощью линейной функции FL (операторы 18...21), входящей в системную библиотеку, при этом в числе аргументов функции указывается имя управляющей переменной.

ОПИСАНИЕ:

Э1: ИНЕ (2) ТА1 — Э2#
Э2: ИНЕ (3) ТА2 — Э1; Э3; Э5#
Э3: ИНЕ (3) ТА2 — Э4; Э6, 2,3
Э4: ИНЕ (2) ТА1 — Э3; Э1#
Э5: ИНЕ (3) ТА2 — Э6,1; Э7; J1, K3#
Э6: ИНЕ (3) ТА3 — ,1 Э5; Э4, 2#
Э7 : JK — ТРИГГЕР (3,2) — (Q, ТА1) (H_Q, ТА2)#
Э10 : Г (0; IM; F) — Э2; Э5; Э7 R#
Э9 : Г (I; IM (IM2M) F) — Э2; Э3; Э7; C#

КОНЕЦ

Как видно из примера, описание логической схемы образуется из описания составляющих ее компонентов. Признаком начала описания схемы является ключевое слово ОПИСАНИЕ, а признаком конца — ключевое слово КОНЕЦ. При описании сигналов генератора (Э9 и Э10), кроме типа логической переменной 0 и 1, указано время в миллисекундах M и признак повторяемости F.

Таблицы, вошедшие в описание, имеют вид

ТАБ (K, T301, T310) 15, 30, 40*,

где K — нагрузка на входе компонента; T301 и T310 — задержки сигнала на выходе компонента при его переключении из 0 в 1 и наоборот.

В языке управления вычислительным процессом КОМОЛ используются директивы АМД (асинхронное моделирование), ВВД (вывод временных диаграмм), ТСС (построить таблицу состояния), РЭЦ (расчитать задержки) и др., с помощью которых задаются интервал модельного времени, на котором необходимо построить временные диаграммы и проанализировать результаты моделирования. Например задание

* АМД 4000*

* ВВД 500, 2000—4000 = Q, H_Q, Э7;

Э2; Э3; Э4;

* ТСС 2000—4000 = Q, Э7; Э6*

применительно к схеме рис. 22 требует выполнить процедуру асинхронного моделирования на интервале модельного времени 4000, вывести временные диаграммы на выходах Q и H_Q элемента Э7, на выходах элементов Э2, Э3 и Э4; на заданном временном интервале построить таблицу состояний в контрольных точках Q элемента Э7 на выходе элемента Э6.

На примере языков СПАРС и КОМОЛ показаны возможности большой группы подобных языков, применяемых при моделировании функционально логических и электрических схем, таких как языки РАПИРА, МАЭС, СПРОС, ПА-4М, ЛОГИКА, МОДИС, МОЛК, ФОРЭС и др.

поэтому при программной реализации он обеспечивает проектирование значительно более сложных объектов, чем программы, основанные на прямых методах.

Программный поиск в пространстве решений, сопровождающийся генерацией гипотез, базируется на специальных эвристических методах поиска рациональных технических решений [39, 6].

Эвристические методы поиска новых решений существенно отличаются друг от друга как сложностью, так и эффективностью процесса поиска, структурой и особенностью применения. Однако все они обладают определенной общностью, состоящей в подразделении процесса решения задачи на ряд частей (этапов) и применении этих этапов в некоторой последовательности. Несмотря на то что в некоторых методах те или иные этапы формально отсутствуют, они частично выполняются за счет расширения функций других этапов.

К основным этапам относят: точную формулировку задачи; расчленение решения на составные части, определяющие функционирование объекта; поиск альтернативных способов решения каждой части; составление альтернативных решений для каждой части или уровня; определение сущности противоречий между имеющимися решениями и требованиями технического задания (ТЗ); выбор приемов или способов преобразования неудовлетворительного решения; выработку единого критерия отбора сопоставимых альтернативных решений; выбор перспективных решений.

Формализация решения основных задач на начальных стадиях проектирования позволяет создать автоматизированную систему поиска и выбора технических решений, в состав которой входят следующие блоки [56].

Подсистема поиска аналогов. Под аналогом объекта проектирования понимается такой реально существующий объект техники или известное техническое решение (ТР), показатели качества и некоторые признаки которого удовлетворяют техническим требованиям, содержащимся в ТЗ.

Подсистема поиска аналогов позволяет выбирать варианты: 1) изделий, показатели качества которых удовлетворяют неравенствам

$$a_n \geq a_{тз} \text{ или } a_n \leq a_{тз},$$

где a_n — значения показателей качества найденных вариантов изделий; $a_{тз}$ — значения технических требований, содержащихся в ТЗ; 2) изделий, которые содержат требуемые функциональные, конструктивные или технологические признаки; 3) изделий, удовлетворяющих условиям, содержащимся в пп. 1 и 2; 4) узлов изделий, удовлетворяющих условиям, содержащимся в пп. 1...3.

Подсистема имеет следующие информационные массивы: перечень наименований или номеров изделий, список показателей качества по данному классу объектов и список классификационных признаков. В перечень изделий включаются лишь те, на которые имеется техническая документация.

Список показателей качества и классификационных признаков состоит из показателей и признаков, относящихся к изделию в целом; показателей и признаков, относящихся к элементам изделия.

ряда чисел в позиционной системе счисления с различным числом возможных цифр в каждом разряде. Число разрядов при этом равно числу фрагментов, а число цифр в каждом разряде равно числу вариантов решения для каждого фрагмента.

В реальных объектах допустимы не любые сочетания параметров. Запреты на конкретные виды сочетаний специфичны для каждой предметной области и хорошо известны специалисту.

Продолжая детализацию задачи проектирования, любое решение можно представить в виде древовидного графа (графа фрагментов объекта и их признаков), получаемого декомпозицией объекта на блоки (фрагменты) вплоть до неделимых с учетом альтернатив их реализации. При этом вершинами (типа И или ИЛИ) графа являются фрагменты технического решения и их признаки, а ребра графа показывают соподчиненность между фрагментами и их признаками. Максимальное количество признаков фрагментов технического решения содержится на конечных вершинах графа.

Каждому варианту решения задачи соответствует частный случай выборки из такого графа альтернатив решения отдельных блоков и самих блоков, т. е. частный путь на графе от конечной вершины к корневой. Из множества возможных решений не все являются независимыми друг от друга. Наблюдается иерархия выбора, когда выбор, сделанный на некоторой стадии объекта, существенно снижает свободу выбора на следующей за ней стадии.

Подсистема состоит из следующих информационных массивов: дерева технических решений, списка технических требований и классификационных признаков.

Дерево ТР строится на базе любой информации о технических решениях выбранного класса. Сюда же может включаться информация о некоторых ТР из информационных массивов подсистем поиска аналогов. Список требований и классификационных признаков такой же, как и в подсистеме поиска аналога.

Моделью подсистемы синтеза ТР является матрица соответствий между фрагментами и их признаками, с одной стороны, и техническими требованиями с другой.

Подсистема обеспечивает пользователя следующей информацией: описанием допустимых вариантов ТР на естественном языке; ссылками на аналоги по отдельным элементам ТР, содержащимся в каталоге графической информации; списком технических требований и классификационных признаков, которым соответствуют полученные варианты ТР; списком технических требований, которые не могут быть удовлетворены.

Примером работы этой подсистемы может являться поиск технических устройств на ферритовых сердечниках [6]. Здесь на первом уровне разбиения выделялись следующие блоки: сами ферритовые сердечники, проводники прошивки, основание запоминающей матрицы, контактные элементы, элементы защиты от воздействия внешней сферы, элементы связи между конструктивными элементами. Для них по данным [116] наиболее интересных технических решений, взятых из патентных фондов, строились древовидные графы альтернатив решений. При этом учитывались тенденции развития проектных объектов и возможности

При постановке задачи синтеза физической схемы ТС указываются наименования входов и выходов ТС, их значения, формулируются факторы окружающей среды, оговариваются недопустимые ТС и их воздействия на окружающую среду, к. п. д., быстродействие ТС и др.

По результатам решения задачи пользователю выдается информация о допустимых вариантах физических схем в виде цепочек взаимосвязанных ФЭ. При этом указываются номера или названия ФЭ, наименования воздействий и эффектов по каждому из них, названия физических объектов, на которых проявляются эти ФЭ, физико-технические характеристики физических объектов. Описание физической сущности ФЭ, его модели, а также ссылки на литературу по его практическому применению пользователь может найти в каталоге ФЭ, который входит в состав документации на подсистему.

Для наглядности и сопоставимости вариантов схем информация о них выводится на дисплей или графопостроитель, для чего используется специальная подсистема графики.

Результаты решения задач этой подсистемой являются промежуточными, поскольку они дают лишь общее представление о структуре проектирования объекта. Эта информация затем преобразуется в варианты конструктивных решений.

Подсистема синтеза ТР-2. Подсистема обеспечивает решение следующих задач: выбор конструктивных вариантов структурных элементов объекта; синтез конструктивной схемы объекта; преобразование конструктивной схемы в ТР.

При решении этих задач используются следующие информационные массивы: набор геометрических форм объектов и правила их преобразования; набор конструктивных схем по каждому ФЭ; модели ФЭ; список технических требований; база данных по свойствам веществ и материалов.

Набор геометрических форм объектов и правил их преобразования предназначен для генерирования вариантов исполнения физических объектов, на которых проявляются ФЭ. Это позволяет синтезировать различные варианты структуры объекта проектирования. Правила преобразования одной геометрической формы в другую существенно сокращают этот информационный массив, так как получение промежуточных геометрических форм, например, при переходе от цилиндра к конусу или от многоугольника к окружности осуществляется изменением одного из параметров описывающих их моделей.

Набор конструктивных схем позволяет описывать все возможные варианты конструктивных взаимосвязей между воздействием и результатом воздействия ФЭ. Для выбора рационального варианта ТР используются модели описания ФЭ и база данных по свойствам веществ и материалов.

Информация по допустимым вариантам ТР выдается в виде текстового описания и (или) графического изображения. Полученные описания ТР подлежат дальнейшей обработке (выбор способа изготовления каждого элемента, обработка их на технологичность).

Выходная информация подсистемы обрабатывается с помощью подсистемы поиска аналога для выделения структурных элементов среди известных изделий.

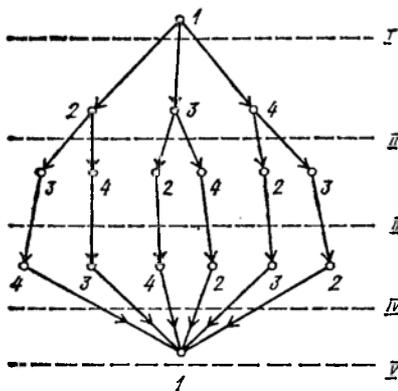


Рис. 23. Древоидный граф решений для задачи о кратчайшем замкнутом маршруте.

производства это, как правило, нежелательно. Рассмотрим наиболее эффективные методы выбора рациональных вариантов проектных решений.

Последовательный анализ. Отсеивание бесперспективных вариантов в процессе их последовательной генерации выполняется методом последовательного анализа, основанным на правиле доминирования [41]. При этом i -й вариант решения предпочтительней j -го, если взвешенная сумма показателей i -го варианта больше соответствующей суммы показателей j -го. В результате бесперспективным оказывается построение новых вариантов решения на основе показателей j -го варианта.

Схема решения такова. Пусть на $(k - 1)$ -м шаге поиска решений определено множество перспективных вариантов $\hat{X}_{k-1} = \{x_1^{(k-1)}, x_2^{(k-1)}, \dots, x_l^{(k-1)}\}$, каждый из которых характеризуется k -параметрами. На очередном k -м шаге поиска каждый из полученных ранее перспективных вариантов $x_i^{(k-1)}$ используется для построения новых вариантов решения, число которых составит $n - k$ (где n — число вершин древоидного графа). Построение выполняется добавлением к $x_i^{(k-1)}$ одного из еще не вошедших в этот вариант номеров вершин, при этом новые варианты характеризуются $(k + 1)$ -ми параметрами. В результате получаем расширенное множество вариантов

$$x_k = \{x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_{l(n-k)}^{(k)}\}.$$

Сгруппируем варианты из X_k , заканчивающиеся одним и тем же номером вершины древоидного графа и с одинаковым множеством входящих в последовательность номеров. Используя правило доминирования, выделим в каждой такой группе по одному наиболее предпочтительному варианту. Выбранные варианты образуют множество \hat{X}_k перспективных вариантов после k -го шага поиска. В дальнейшем процедура повторяется до тех пор, пока на n -м шаге из множества вариантов \hat{X}_n не будет выделен единственный оптимальный.

Использование метода последовательного анализа показано на примере ярусного графа (рис. 23), что соответствует выбору кратчайшего замкнутого маршрута от первой вершины к этой же вершине. Для параметров ветвей перехода выбираем значения:

$$\begin{aligned} c_{12} = c_{21} = 9; & \quad c_{13} = c_{31} = 10; & \quad c_{14} = c_{41} = 4; \\ c_{23} = c_{32} = 6; & \quad c_{24} = c_{42} = 8; & \quad c_{34} = c_{43} = 7. \end{aligned}$$

Применяя метод последовательного анализа после 2-го шага поиска, когда три начальных варианта решения принимаются перспективными, получаем решение задачи, сведенное в табл. 10. Данные табли-

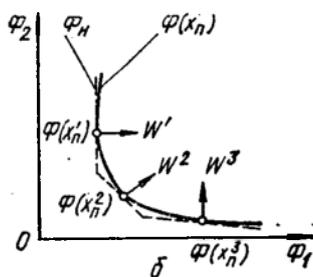
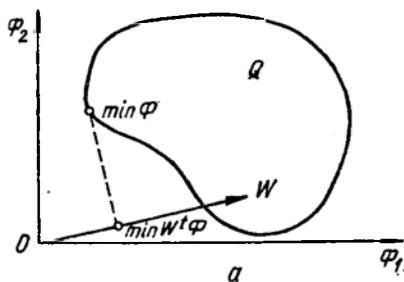


Рис. 24. Выбор точки множества Парето (а) и построение аппроксимирующей поверхности (б).

и минимизировать ее в программе для получения точек множества Парето $x_n \in X$.

Задачу минимизации (4.2) можно также сформулировать как задачу минимизации функционала

$$\pi = W^t \Phi \quad (4.3)$$

в пространстве частных критериев $\Phi \in Q$, где Q — область допустимых или реализуемых решений. При этом определяется точка $\Phi \in Q$ так, что ее проекция на W является наименьшей среди всех $\Phi \in Q$. В этом случае $\Phi(x_n)$ лежит на границе Q и функционал π определяет плоскость, касательную в точке Парето x_n и поддерживающую область Q (рис. 24, а).

Предположим, что минимизацией функционала π при использовании различных векторов весов W^1, \dots, W^m получены m точек множества Парето $x^i \in x_n, i = 1, \dots, m$. Тогда это множество весов и точек образует выпуклую кусочно-линейную аппроксимацию $\Phi_H(x_n)$ для области $\Phi(x_n)$ (рис. 24, б).

Таким образом, область Парето может быть представлена выпуклой лицевой оболочкой Φ_H , образуемой ограничивающими ее гиперплоскостями, заданными внешними нормальными. Нормаль W^* к такой поверхности получают формированием матрицы

$$\Phi = \{\Phi(x_n^{i_1}), \dots, \Phi(x_n^{i_m})\}$$

и решением уравнения

$$\Phi^t W^* = e, \quad (4.4)$$

где $e = (1, 1, \dots, 1)^t$.

Таким образом, лицевая сторона оболочки Φ_H задается точками $\Phi(x_n^{ij}), j = 1, \dots, m$, такими, что $\Phi^t W^* = 1$. Отсюда можно найти новые точки Парето $x_n^{m+1}, x_n^{m+2}, \dots$. Начальное опорное множество точек Парето $x_n^i, i = 1, \dots, m$ получают минимизацией каждого из частных критериев Φ_i в предположении, что множество весов W^t соответствует вектору, все компоненты которого равны нулю за исключением $W_i = 1$.

Следующий шаг предполагает определение весов $W^{(m+k)}$, которые в соответствии с принципом Парето обеспечивают компромисс между частными критериями Φ_i . Поскольку компромиссная поверх-

ность Порето проходит через m экстремальных точек, соответствующих $\Phi_{i\min}$ и образующих лицевую сторону аппроксимации $\Phi_{\text{н}}$, согласно (4.4) запишем:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{1\min} \\ \Phi_{2\min} \\ \vdots \\ \Phi_{m\min} \end{bmatrix} W = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Найденный вектор весов W , представляющий собой нормаль к поверхности Порето, используется при последующей минимизации всего аддитивного критерия (4.2) для получения дополнительной $(m+1)$ -й точки Порето $\Phi_{(m+1)}$. Если это решение неудовлетворительно,

Таблица 11. Определение вектора весов для аддитивного критерия качества

Номер итерации	Вес			Частные критерии			Варьируемые параметры		
	W_1	W_2	W_3	Φ_1	Φ_2	Φ_3	x_1	x_2	x_3
1	1	0	0	56,2	2500	0,7	15,46	226,74	-1
2	0	1	0	110	1277	0,7	7,896	115,8	-1
3	0	0	1	110	2500	0,35	7,82	236,28	-1
4	0,0036	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,5651	79,9	1999	0,557	9,84	184,42	-1
5	0,0047	$8,94 \cdot 10^{-5}$	0,731	78,5	2500	0,5	11	232,3	-1

например из-за большого j -го слагаемого, то производится замена $\Phi_{j\min}$ на $\Phi_{(m+1)}$ и процедура нахождения нормали W^* по уравнению (4.4) повторяется. Минимизация аддитивного критерия (4.2) с новым вектором весом W^* обеспечивает уменьшение компоненты реализуемой аддитивной целевой функции, соответствующей новой точке Порето $\Phi_{(m+2)}$. По усмотрению проектировщика процедура уточнения вектора W может итеративно повторяться путем использования вновь получаемых точек Порето $\Phi_{(m+k)}$ вместо исходных $\Phi_{k\min}$.

Рассмотрим пример оптимизации объекта (логической схемы И—НЕ) с тремя частными критериями Φ_1, Φ_2, Φ_3 , соответствующими времени переключения, площади, занимаемой транзисторами, и напряжению логического нуля. Варьируемых параметров также три: x_1, x_2 (геометрические размеры транзисторов) и x_3 (напряжение пенторного участка характеристики МОП-транзистора). При этом на параметры x_i и частные критерии Φ_i наложены ограничения. Результаты первых трех процедур минимизации каждого частного критерия Φ_i приведены в табл. 11. На четвертом этапе решается задача нахождения весов W_k через нормаль к компромиссной поверхности и минимизации аддитивной функции

$$W_1\Phi_1 + W_2\Phi_2 + W_3\Phi_3.$$

Результаты этого этапа оптимизации представлены в табл. 11 и определяют решение, соответствующее разумному компромиссу между всеми критериями проектирования. Далее с целью снижения критерия Φ_1 (времени переключения) определяется новая нормаль к поверхнос-

ратор перехода от первичной экспертной информации к весовым коэффициентам W_k , представительным множествам Φ и т. д.).

Одним из вопросов, возникающих в начальной стадии, является отбор рабочей группы экспертов. Наименее действенный подход к формированию экспертной группы (ЭГ) основан на известном принципе «снежного кома». В начале (нулевой тур) составляется список специалистов, каждый из которых является бесспорным кандидатом в ЭГ. Далее (первый тур) каждый из них выдвигает по своему усмотрению кандидатов в эксперты. Из числа последних отбираются специалисты, которым, в свою очередь, в следующем туре предлагается назвать своих кандидатов. Количество туров — не более 3...4.

В качестве процедуры работы экспертов рекомендован метод Дельфи (авторы О. Халмер и Т. Гордон). Принцип дельфийской техники заключается в том, что эксперты заполняют анонимные анкеты, а организаторы экспертизы стремятся получить общее мнение экспертов с минимальным разбросом их оценок, т. е. по возможности получить полностью согласованное мнение. Последнее достигается благодаря осуществлению ряда итераций (туров), в процессе которых позиции экспертов, как правило, сближаются. В каждом последующем туре ими принимается к сведению интегральная информация предыдущего тура и вносятся коррективы в свои оценки. Допустимо (после проведения первых двух туров в полном соответствии с дельфийской техникой) третий и все последующие туры заменить обычной дискуссией. В результате применение этого метода позволяет сохранить принцип анонимности на начальной стадии (1 и 2 туры), а на заключительной — реализовать преимущества, присущие дискуссиям (немедленная обратная связь, быстрое достижение экспертами взаимопонимания, возможность выступать большое число раз и уточнить или изменить свою точку зрения с учетом информации, полученной от коллег).

Данная методика использовалась для решения ряда вопросов многокритериальной оптимизации, возникших в основном при решении задач автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

Метод ветвей и границ. При решении многих задач с перебором вариантов эффективен метод ветвей и границ. Сокращению перебора соответствует отсечение ветвей дерева: чем ближе к корневой вершине дерева отсекается ветвь, тем эффективнее уменьшается число просматриваемых вариантов.

Метод заключается в следующем. Вначале произвольно выбирается какой-либо вариант, соответствующий полному пути на древовидном графе решений от корневой до висячей вершины. При этом оценивается соответствующая ему совокупность параметров (например, длина пути в графе решений).

Проиллюстрируем это на графе решений, представленном ранее на рис. 23, выбрав начальный базовый вариант, соответствующий маршруту {1, 3, 2, 4, 1} с весом $c_{13} + c_{32} + c_{24} + c_{41} = 28$ единиц.

Начальный участок маршрута, соответствующего выбранному базовому варианту решения, имеет вершины 1, 3.

Далее рассмотрим возможность использования других начальных участков маршрута, содержащих две вершины (в данном случае это

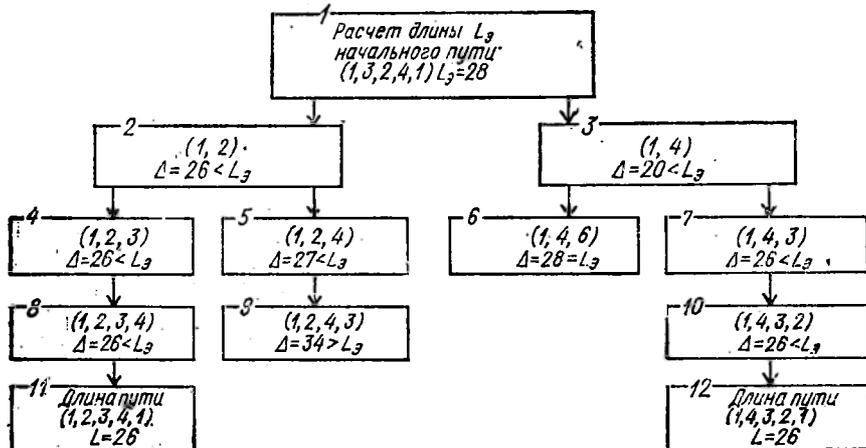


Рис. 25. Последовательность работы алгоритма ветвей и границ для рассматриваемого примера.

Если в качестве начального выбран участок (1, 2), то в соответствии с процедурой оптимистической оценки маршрута получаем

	1	2	3	4	$\min c_{ij}$
1	-	-	-	-	0
2	9	-	6	9	6
3	10	-	0	7	7
4	4	-	7	0	4

	1	2	3	4
1	-	-	-	-
2	3	-	0	2
3	3	-	0	0
4	0	-	0	0
$\min c_{ij}$	0	-	0	0

в результате чего

$$\Delta = c_{12} + \sum_{i=1}^4 \min_i c_{ij} + \sum_{i=1}^4 \min_i c_{ij} = 9 + 6 + 7 + 4 = 26.$$

По аналогии можно показать, что при выборе в качестве начального участка маршрута нового варианта решения участка (1, 4), получаем

$$\Delta = c_{14} + \sum_{i=1}^4 \min_i c_{ij} + \sum_{i=1}^4 \min_i c_{ij} = 4 + 6 + 6 + 4 = 20.$$

Последовательность дальнейшей работы алгоритма метода ветвей и границ для частного случая графа рис. 23 приведена на рис. 25, из которого видно, как происходит процесс отсекаания бесперспективных ветвей исходного графа решений. Заметим, что два полученных решения совпадают с точностью до направления обхода маршрута.

Для сокращения переборных вариантов решения применяют также различные приближенные формально-эвристические методы или на основании личного опыта проектировщик задает значения параметров объекта на некоторых ярусах графа решений, тем самым принудительно сокращая область поиска. Очевидно, что чем выше квалификация проектировщика, тем большее значение параметров он может выбрать

сладии), осуществляющей построение системы иерархических моделей разнородных объектов проектирования. В этой системе любой объект — конструкция изделия или оснастки, технологический процесс или процесс проектирования — моделируется одинаковыми математическими методами и средствами [48].

Во всех математических моделях различают данные трех типов: об элементах самого объекта моделирования, о свойствах и отношениях между элементами и свойствами объекта. При моделировании объекта абстрагирование происходит по двум направлениям: по глубине структурирования и по степени детализации описания элементов и свойств объектов, а также отношений между ними.

По глубине структурирования сложный объект A можно рассматривать как неконструированный, представляющий собой единое целое, как систему взаимосвязанных элементов одного уровня, или как многоуровневую иерархическую систему. По степени абстрагирования объект моделируется на уровнях структурных (методами теории множеств и теории графов), логических (методами математической логики) и количественных свойств и отношений (методами функционального анализа, теории дифференциальных уравнений, математической статистики с непрерывным или дискретным изменением аргументов).

На каждом из этих основных уровней возможны описания объекта с различной степенью полноты и обобщения, соответствующие разным уровням абстрагирования структурных, логических и количественных свойств и отношений.

Модели структурного уровня. На структурном уровне моделируется состав элементов объекта на низшем уровне структурирования в виде множества $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$, свойства и параметры которого представлены описаниями $E(v_i)$ наряду с описанием объекта $E(V) = (E_1, E_2, \dots, E_m)$, а также структурными отношениями между элементами и описаниями. К структурным относятся бинарные отношения иерархической подчиненности, отношения порядка, смежности, сопряженности, функциональной связи и т. д.

Например, на структурном уровне моделируются ранние этапы проектирования объекта, когда топологической моделью объекта служит орграф (ориентированный граф) $G(V, E)$, составление которого базируется на содержательном описании состава (множество вершин V) и способа действия объекта (множество ребер E). Вершинами орграфа v_i (элементами объекта) являются, как правило, законченные функционально блоки (части) объекта, а ребрами e_j — информационные связи между ними. При описании объекта и его частей часто используются вероятностные характеристики функционирования, а основой используемого математического аппарата при моделировании служит теория динамических систем, теория массового обслуживания и др. Проектирование на структурном уровне представляет собой процесс направленного перебора формализованных описаний структуры объекта и алгоритмов его функционирования методами моделирования на ЭВМ. Рассмотренная модель полностью раскрывает внутреннюю структуру объекта, анализ которой позволяет решить следующие задачи, возникающие на раннем этапе проектирования: установить нечеткость структуры, определить степень нагруженности и значимость отдельных

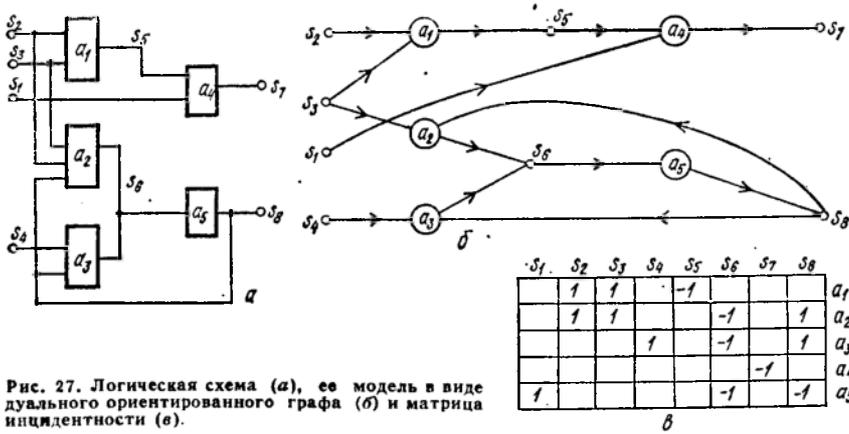


Рис. 27. Логическая схема (а), ее модель в виде двудольного ориентированного графа (б) и матрица инцидентности (в).

сигналам (логическим переменным) [51, 78]. Ребра такого графа хорошо отражают причинно-следственные связи между указанными подмножествами вершин, соответствующих статическому (подмножество V_1) и динамическому (подмножество V_2) описанию объекта. Различие между входами и выходами элементов устанавливается с помощью направлений, приписываемых ребрам: выходной сигнал логического элемента исходит из соответствующей вершины, а входной сигнал направлен к вершине (рис. 27, а, б, в). Каждый биорграф можно описать матрицей B , определяющей отношение инцидентности элементов и сигналов,

$$B = [A \times S],$$

число строк которой равно числу элементов и число столбцов — числу сигналов, а b_{ij} элемент которой равен 1, если сигнал s_j является входным сигналом элемента a_i , и равен -1, если s_j — выходной сигнал элемента a_i .

На основании двудольных графов цифровых устройств (ЦУ) составляется система уравнений вида

$$\begin{aligned} W(n) &= F[X(n), Y(n)]; \\ Y'(n) &= G[X(n), Y(n)]; \\ Y(n) &= P[Y'(n-1)], \end{aligned} \tag{5.1}$$

где $W(n) = \{w_1(n), w_2(n), \dots, w_k(n)\}$ — множество выходных переменных двоичного типа, относящихся к n -му дискретному моменту времени (n -му такту работы схемы); $X(n) = \{x_1(n), x_2(n), \dots, x_l(n)\}$ — множество входных переменных двоичного типа, относящихся к n -му такту работы схемы; $Y(n) = \{y_1(n), y_2(n), \dots, y_m(n)\}$ — множество внутренних переменных двоичного типа, определяющих состояние схемы на n -м такте; $Y'(n) = \{y'_1(n), y'_2(n), \dots, y'_q(n)\}$ — множество внутренних переменных двоичного типа, используемых для возбуждения элементов памяти на n -м такте; $Y(n-1)$ — множество внутренних переменных, относящихся к $(n-1)$ -му такту работы схемы; F, G, P — множество логических функций.

жек и изменения формы сигнала задерживает переменные состояния y_1, y_2, \dots, y_m на время $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$. Задержка распространения сигнала τ_j зависит от внешних факторов $\lambda_j = \{K_j, N, T^0, U_{\text{пит}}, C_{nj}\}$, к которым относятся: коэффициент разветвления по каждому выходу K_j , коэффициент объединения по входу N , изменение температуры окружающей среды T^0 и напряжения источников питания $U_{\text{пит}}$, емкость нагрузки по каждому выходу C_{nj} .

Для повышения точности воспроизведения переходных процессов необходимо раздельное описание задержек распространения:

$$\tau_j^{01} = \tau_{зj}^{01} + \tau_{фj}^{01}; \quad \tau_j^{10} = \tau_{зj}^{10} + \tau_{фj}^{10},$$

где τ_j^{01} и τ_j^{10} — задержки распространения сигнала при переключении логического элемента в состояние 1 (включение) и в состояние 0 (выключение); $\tau_{зj}^{01}$ и $\tau_{зj}^{10}$ — задержки срабатывания логического элемента при включении и выключении; $\tau_{фj}^{01}$ и $\tau_{фj}^{10}$ — длительность фронта выходного сигнала при включении и выключении логического элемента, причем длительность фронта зависит от внешних дестабилизирующих факторов:

$$\tau_{фj}^{01} = \varphi(\lambda_j); \quad \tau_{фj}^{10} = \psi(\lambda_j).$$

Метод анализа ЦУ основан на решении (5.2), описывающих модели ФЭ и ЛЭ в масштабе модельного времени. Последнее (t_m) изменяется для каждого такта работы схемы: $t_m = 0 \dots t_{\text{уст}}$, где $t_{\text{уст}}$ — время установления переходного процесса для n -го такта.

Применение метода асинхронного событийного моделирования с переменным шагом позволяет сократить количество уравнений, решаемых на каждом шаге модельного времени, так как за время такта T работы схемы решаются лишь те уравнения схемы (5.2), в которых изменилось значение хотя бы одной переменной в правой части (изменилось значение хотя бы одного сигнала на входе логического элемента). Порядок решения уравнений схемы определяется последовательностью событий в схеме, поэтому исключается их предварительное ранжирование.

Метод изменения модельного времени с переменным шагом позволил сократить число временных шагов на каждом такте работы схемы ЦУ.

В моделях ФЭ и ЛЭ используется троичная алгебра, где для представления значений величин сигналов используется множество состояний $S = \{0, 1, X\}$. Значение X обозначает неопределенное состояние элемента. Применение троичной алгебры не требует использования специальных алгоритмов начальной установки, которые устанавливают элементы схемы в состояние, определяемое структурой схемы и функцией, реализуемой данным элементом.

Модели количественного уровня. На количественном уровне моделирования каждому элементу множества булевой матрицы или логической переменной, а логические отношения переходят в количественные: уравнения, неравенства и т. п. Если на предыдущих уровнях моделирования учитывались структурные и причинно-следственные связи

внешние реакции объекта, на основании которых строится структура макромоделей. Параметрами ее являются входное и выходное сопротивление, задержки, коэффициенты передач и другие величины, характеризующие свойства объекта на внешних зажимах. При этом внутренняя структура макромоделей не совпадает с действительной. Для формирования такой модели необходимо выполнить большой объем исследований характеристик объекта.

3. Формирование табличных массивов. Результаты всестороннего исследования объекта оформляются в виде многомерного массива табличных данных, содержащих информацию о входных и выходных переменных объекта для различных режимов функционирования. Возможно сокращение объема вычислений, так как решение сложных нелинейных уравнений заменяется процедурой выбора нужных данных из табличного массива с необходимой интерполяцией.

С увеличением точности описания такой массив табличных данных быстро растет. Процедура формирования табличных массивов поддается автоматизации.

4. Использование математических выражений и уравнений. В данном случае стремятся получить аналитические выражения связи входных и выходных переменных объекта. Эти выражения включают полиномиальные (для зависимых источников с задержками и нелинейных компонентов) и логические функции И и ИЛИ при сшивании отдельных формул, а также функции распределения вероятности для описания вариаций времен задержек и уровней переменных.

От разработчика требуется высокая квалификация, поскольку процедуру вывода таких выражений автоматизировать затруднительно.

5. Использование математических методов редукции. В отличие от первого подхода, базирующегося на удалении отдельных компонент, сокращению подвергается исходная математическая модель объекта. Матричными преобразованиями, переупорядочением, Гауссовым исключением, анализом собственных значений и др. формально понижают порядок описываемой системы уравнений. Процесс понижения порядка систем уравнений можно автоматизировать.

6. Комбинированные подходы. При разработке макромоделей действительных объектов и их элементов используются в различном сочетании перечисленные методы, а при моделировании сложных объектов — макромоделей различных типов.

Модели компонентов, основой которых является отражение внутренних взаимосвязей моделируемого объекта с точностью до минимальных элементов структуры, называются *микромоделями*. Под минимальными элементами понимаются элементы, не имеющие структурного описания и находящиеся на самом нижнем уровне структурирования объекта. Моделирование на качественном уровне с использованием микромоделей называется *детальным моделированием*.

Выбор способа описания компонента проектируемого объекта сложная задача, однако, в каждой предметной области разработаны определенные рекомендации по предпочтительному выбору моделей. В случаях, когда возможны различные подходы к модели, критерием выбора являются конкретные требования. При этом критерием оценки качества и адекватности построенной модели служит точность ответа

ти, проходящей через вторую, третью и четвертую точки Парето. Результат дополнительной минимизации многокритериальной целевой функции, действительно, приводит к снижению Φ_1 , однако, как следует из табл. 11, возрастает значение критерия Φ_2 (площади транзистора).

Векторный критерий качества в виде выражения (4.2) широко применяется для многокритериальных оценок проектных решений и в тех случаях, когда весовые коэффициенты W_k подбираются экспериментально или методом экспертных оценок, а частные критерии Φ_k не могут быть оптимизированы по одним и тем же параметрам объекта x_j . Обычно при этом в аддитивный комплексный показатель

$$W(\Phi) = \sum_{k=1}^m W_k \Phi'_k, \quad W_k > 1, \quad \sum_{k=1}^m W_k = 1 \quad (4.5)$$

вводится нормированный показатель Φ'_k , определяемый выражением

$$\Phi'_k = \frac{\Phi_{k\max} - \Phi_k}{\Phi_{k\max} - \Phi_{k\min}} \quad (4.6)$$

или

$$\Phi'_k = \frac{\Phi_k - \Phi_{k\min}}{\Phi_{k\max} - \Phi_{k\min}}. \quad (4.7)$$

Здесь подразумевается такое определение частных критериев Φ_k , когда они все в процессе выбора рационального варианта минимизируются ($\Phi_k \rightarrow \min$) или, наоборот, максимизируются ($\Phi_k \rightarrow \max$).

С целью устранения возможности компенсации снижения качества по одному частному критерию повышением качества по другому для сравнения вариантов решения удобно использовать следующий комплексный критерий

$$W(\Phi) = \begin{cases} \sqrt{\sum_{k=1}^m W_k^2 \left(\frac{\Phi_k}{\Phi_{k\min}} - 1 \right)^2}, & \text{если } \Phi_k \rightarrow \min; \\ \sqrt{\sum_{k=1}^m W_k^2 \left(\frac{\Phi_{k\max}}{\Phi_k} - 1 \right)^2}, & \text{если } \Phi_k \rightarrow \max. \end{cases} \quad (4.8)$$

Применение (4.8) обеспечивает предпочтительный выбор таких вариантов решения технической задачи, при которых значения частных критериев располагаются ближе к некоторому идеальному вектору $(\Phi_{1\min}, \dots, \Phi_{k\min})$ в случае $\Phi_k \rightarrow \min$ или вектору $(\Phi_{1\max}, \dots, \Phi_{k\max})$ при $\Phi_k \rightarrow \max$. При этом отклонение от идеального решения определяется как относительное и взвешенное.

Таким образом, всякий проект, процесс, техническую систему или устройство с точки зрения принятия решения можно в принципе описать достаточно адекватно набором некоторых величин Φ_k , совокупность $\Phi = \{\Phi_k\}$ которых образует векторный критерий эффективности.

Значения весовых коэффициентов частных критериев W_k определяются, как правило, экспертизой на основе использования коллективного опыта. Рассмотрим некоторые результаты, полученные в процессе практического решения трех основных вопросов: подбора экспертов, процедуры их работы, обработки высказанных мнений (т. е. опе-

участки графа 1, 2 и 1,4 соответственно). Для каждого участка последовательно вычисляется оптимистическая оценка нижней границы маршрута или веса соответствующего варианта. Если значение получаемой оценки для очередного участка больше маршрута базового варианта, рассматриваемый участок считается бесперспективным и все продолжающие его ветви графа решений отсекаются. Далее переходят к рассмотрению очередного участка. Если же значение получаемой оценки маршрута для очередного участка меньше базового маршрута, то из конечной вершины этого участка осуществляется ветвление с последующим перебором участков, содержащих теперь уже три вершины графа. Процесс продолжается до получения маршрута с полной последовательностью вершин. Если длина полученного маршрута (варианта решения) меньше, чем для выбранного вначале, то новый вариант следует принять в качестве базового. Последний полученный итеративно базовый вариант будет оптимальным.

Эффективность метода ветвей и границ во многом зависит от способа получения оптимистических оценок маршрута. Одна из подобных процедур при выборе начального участка $X_1 = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_k^{(1)}\}$ сводится к следующему. Из матрицы отношений

$$C_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ N \end{matrix} & \begin{matrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{N1} & c_{N2} & \dots & c_{NN} \end{matrix} \end{matrix},$$

характеризующей граф решений, вычеркиваются строки с номерами $\{1, 2, \dots, k-1\}$ и столбцы с номерами $\{2, 3, \dots, k\}$, определяемыми номерами ветвей, образующих рассматриваемый участок нового маршрута. В оставшейся части матрицы C_{ij} на первом этапе оценки в каждой строке матрицы C_{ij} отыскивается минимальный элемент $\min c_{ij}$, который запоминается. Затем, вычитая минимальные элементы из остальных ненулевых элементов соответствующих строк, получаем новую матрицу C_{ij}'' . На втором этапе — в каждом столбце матрицы C_{ij}'' отыскивается минимальный элемент $\min_i c_{ij}''$, который также запоминается и затем вычитается из всех ненулевых элементов соответствующих столбцов.

При этом оптимистическая оценка длины маршрута определяется

$$\Delta = L_{(1,2,\dots,k)} + \sum_{i=1}^N \min_j c'_{ij} + \sum_{j=1}^N \min_i c''_{ij}. \quad (4.9)$$

Для графа решений, изображенного на рис. 12, матрица отношений имеет вид

	1	2	3	4
1		9	10	4
2	9		6	8
3	10	6		7
4	4	8	7	

и тем меньше времени потребуется для просмотра возможных вариантов решения. В случае, когда заданы все параметры, задача сводится к оценке выбранного варианта по совокупности частных критериев качества.

5 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

5.1. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

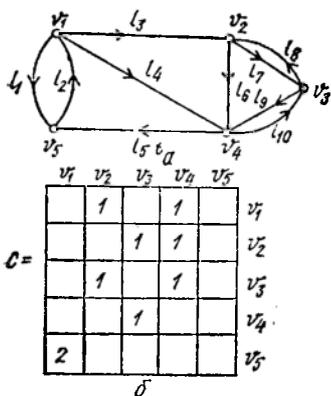
После выбора рациональных вариантов решения технической задачи и соответствующих значений основных параметров проектируемого объекта возникает задача его детализации, проектирования структурных элементов и связей между ними. Этот этап называется внутренним проектированием.

Процесс детализации проекта объекта соответствует переходу от одного уровня внутреннего проектирования к другому. На каждом из этих уровней интенсивно применяются методы математического моделирования, выступающие как средство определения характеристик, свойств и состояния проектируемого объекта (или его фрагмента) решением с помощью ЭВМ некоторых уравнений, называемых *математическими моделями*.

Используемые математические модели определяются предметной областью проектирования. В свою очередь, предметная область соответствует возможно более полному физическому и математическому описанию законов и условий функционирования проектируемого объекта, среды и способов взаимодействия объекта с ней, состава объекта, элементной базы, способов организации структуры объекта, изменяемых и настраиваемых параметров. Предметная область пополняется и уточняется в процессе проектирования.

На каждом уровне внутреннего проектирования преобладают различные виды проектно-конструкторских работ, которым соответствуют свои математические модели, зависимости между входом и выходом объекта, его фрагментов или элементов с учетом граничных условий. На этих уровнях данные об одних и тех же свойствах объекта многократно используются для решения различных задач; при этом уровень знаний и полнота представления данных об отдельных свойствах различны. На разных уровнях и этапах проектирования требуются математические модели различной степени детализации. В связи с этим представляется целесообразным создание в САПР единой иерархической системы математических моделей проектируемых объектов, при этом на различных уровнях иерархии модель, соответствующая проектируемому уровню, реализуется объединением моделей уровня иерархии на единицу меньше рассматриваемого.

В связи с этим предпринята попытка создания единой системы математического моделирования ИСТРА (иерархическая система тран-



$A =$

	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	l_9	l_{10}	
v_1	-1	-1	1	1							
v_2						1	1	-1			
v_3									-1	1	-1
v_4					-1	1	-1			-1	1
v_5	1	1			-1						

B

Рис. 26. Орграф (а), матрица смежности (б) и матрица инцидентности (в), используемые для описания структурных отношений.

элементов в процессе функционирования, а также оценить последствия возможных отказов элементов объекта.

Структурные отношения между элементами множества V описываются матрицей смежности

$$[c_{ij}]_V = [n \times n],$$

строки и столбцы которой соответствуют вершинам орграфа структурной модели (рис. 26, а), а ее c_{ij} элемент равен числу ребер, направленных от вершины v_i к вершине v_j (рис. 26, б).

Отношения между элементами множеств V и E , т. е. между вершинами и ребрами орграфа, описываются в виде булевых матриц инцидентности

$$[a_{ij}]_{V,E} = [n \times m],$$

строки которой соответствуют вершинам, а столбцы — ребрам орграфа, при этом a_{ij} -элемент равен 1, если v_i — начальная вершина ребра e_j , и равен -1, если v_i — конечная вершина ребра e_j (рис. 26, в).

С помощью подобных матриц можно выразить и другие бинарные отношения, например между описаниями элементов и объекта в целом.

На структурном этапе моделируются связи, обусловленные отношениями принадлежности объектов, их элементов и свойств к определенным множествам, отношениями иерархической подчиненности, а также отношениями инцидентности, смежности и порядка.

Модели логического уровня. На логическом уровне моделирования каждому множеству, булевой матрице бинарных отношений или структурному графу соответствуют наборы логических отношений между входящими в них элементами, представленными в виде логических переменных. Множествам V и E (V) также соответствуют определенные логические отношения, отражающие причинно-следственные связи. Последние описывают последовательности изменения состояний объекта с учетом состояния других объектов.

Например, при логическом проектировании моделью цифровых устройств служат двудольные графы, или биорграфы, с двумя непересекающимися подмножествами вершин: подмножеством V_1 , образованным элементами (на более глубоком, чем раньше, уровне структурирования) и их межсоединениями, и подмножеством V_2 , соответствующим

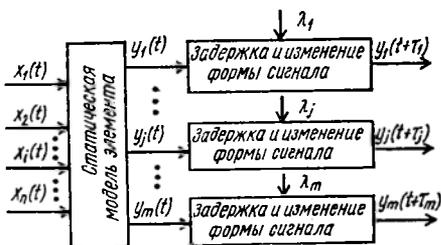


Рис. 28. Динамическая модель функционального элемента ЦУ.

изменения сигналов на входах и внутренних узлах схемы происходят не одновременно. Определение этого переходного процесса составляет задачу динамического анализа цифровых схем. Динамический анализ выполняется на основе асинхронного моделирования, использующего динамическую модель ЦУ. В динамической модели учитывается неодновременность срабатывания элементов схемы и разброс величин динамических параметров (временных задержек) функциональных и логических элементов.

Динамической моделью для анализа переходных процессов является система временных логических уравнений, полученная из (5.1):

$$\begin{aligned}
 \omega_i(t) &= f_i[x_1(t), x_2(t), \dots, x_l(t); y_1(t - \tau_1), \\
 &\quad y_2(t - \tau_2), \dots, y_m(t - \tau_m)]; \\
 y'_j(t) &= g_j[x_1(t), x_2(t), \dots, x_l(t); y_1(t - \tau_1), \\
 &\quad y_2(t - \tau_2), \dots, y_m(t - \tau_m)]; \\
 y_k(t) &= p_k[y'_1(t - \tau'_1 - T), y'_2(t - \tau'_2 - T), \dots, y'_q(t - \tau'_q - T)],
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

где $\omega_i(t)$ — выходная переменная i -го выхода схемы для текущего момента времени t ; $y'_j(t)$ — внутренняя переменная схемы, возбуждающая элемент памяти; $y_k(t)$ — внутренняя переменная состояния схемы в момент времени t ; $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ — задержки срабатывания логических элементов схемы; $\tau'_1, \tau'_2, \dots, \tau'_m$ — задержки срабатывания элементов памяти; T — длительность такта.

В этой модели изменение переменных ω_i, y'_j, y_k происходит с запаздыванием по отношению к переменным, вызвавшим эти изменения. Такая модель позволяет исследовать схемы, в которых динамические свойства логических элементов представлены задержкой выходного сигнала относительно входного воздействия.

Поскольку процесс распространения событий в модели (5.2) имеет асинхронный характер, то такая модель является асинхронной моделью ЦУ. Точность переходных процессов, воспроизводимых с помощью асинхронной модели, во многом зависит от точности описания задержек в моделях элементов схемы [1].

Структура динамической модели элемента ЦУ приведена на рис. 28, при этом статическая модель элемента реализует логические функции элемента по значениям входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n . Блок задер-

Модель ЦУ, описываемая (5.1), является статической моделью, в которой все функциональные и логические элементы, определяющие множество переменных $W(n), Y(n), Y'(n)$, считаются безынерционными, задержки элементов памяти одинаковы и равны такту работы схемы. На практике все элементы ЦУ инерционны. В результате

в объекте при абстрагировании от природы действующих факторов, то моделирование на данном уровне характеризует функциональные, вещественные, энергетические и пространственные связи.

Функциональные связи определяют взаимосвязь между элементами и свойствами объекта; вещественные связи обусловлены физическими и химическими свойствами и отношениями между ними; энергетические связи характеризуют энергетическую сторону функционирования объекта. Эти виды связей обычно описываются пространственно-временными соотношениями и выражаются через обыкновенные дифференциальные и дифференциальные уравнения в частных производных. Одним из методов упрощения модели является представление объекта в виде системы таких элементов на глубоких уровнях структурирования, связь между которыми с достаточной точностью охарактеризуется функциями одной переменной (времени), т. е. выполняется переход от модели с распределенными параметрами к более простой модели с сосредоточенными параметрами.

При количественном моделировании важным фактором является состав и полнота описания выделяемых элементов объекта, которым в орграфе соответствуют отдельные ребра. Количественные соотношения, определяющие связь между переменными элементами (компонентами) проектируемого объекта, называются компонентными уравнениями. Вид и способ получения таких уравнений во многом зависит от глубины структурирования объекта. Полученные модели элементов условно делят на два класса — макромоделей и микромоделей.

Если при создании модели не рассматривается внутренняя структура моделируемых элементов объекта и закономерности, определяющие их функционирование, а целью моделирования является обеспечение возможности адекватно предсказать реакцию компонента по реакции его модели, такие модели называются *макромоделями*, или аппроксимирующими. Они, по-существу, адекватно аппроксимируют поведение компонента и объекта, реализуя другие законы функционирования. Моделирование на количественном уровне с использованием макромоделей называется *адекватным моделированием*.

Поскольку применение макромоделей гарантирует возможность моделирования современных сложных технических объектов, рассмотрим основные подходы к их получению.

1. Огрубление микромоделей объекта (элемента). В этом случае из исходной модели последовательно отключаются отдельные компоненты (закорачиваются или размыкаются) до тех пор, пока входные и выходные характеристики объекта не будут отличаться от начальных значений на заданную величину. Избежать перебора можно, воспользовавшись анализом чувствительности (п. 6.2) характеристик микромоделей к вариациям параметров компонентов на отдельных участках рабочего режима объекта.

Число оставшихся компонентов, характеризующихся наибольшей чувствительностью и образующих макромоделей, зависит от ее заданной точности. При точности 80...85 % существенного упрощения исходной микромоделей достигнуть не удастся, хотя процедуру получения макромоделей можно автоматизировать.

2. Аппроксимация внешних характеристик объекта. Исследуются

на вопрос о соответствии характеристик, получаемых с помощью модели, характеристиками реального компонента или объекта.

Если структура модели компонента (объекта) известна, то в дальнейшем экспериментально определяются (идентифицируются) параметры модели, характеризующие поведение моделируемого объекта. Паспортных данных, приводимых в справочной литературе, как правило, недостаточно для определения параметров машинных моделей компонентов. Поэтому с помощью специальных технических средств измеряются внешние характеристики и параметры с дальнейшей обработкой результатов (расчетом и оптимизацией значений параметров моделей). Идентификация линейных и квазилинейных объектов с помощью частотных характеристик является наиболее простым методом. Идентификация переходной характеристики и затем передаточной функции осуществляется обработкой реакций объекта на ступенчатое воздействие. Метод корреляционных функций позволяет определить импульсную характеристику испытуемого компонента, которая при воздействии на входе белого шума совпадает со взаимной корреляционной характеристикой для входных и выходных переменных объекта.

Значения коэффициентов регрессионных моделей типа

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \dots$$

определяются по критерию минимума квадратичного отклонения реальных данных и данных факторного эксперимента, при котором входные величины x_i ($i = 1, n$) принимают значения, соответствующие всем вершинам или части вершин некоторого n -мерного гиперкуба, построенного в окрестности базовой точки пространства факторов-входов.

Коэффициенты аппроксимирующих степенных полиномов и других нелинейных функций находят из системы уравнений, специально построенных для режимов компонента, в которых проводятся измерения. Например, для определения коэффициентов степенного полинома третьего порядка, аппроксимирующего зависимость $y = f(x)$,

$$y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3$$

используются координаты четырех измеренных точек $x_i y_i$, $i = 1, \dots, 4$ (по числу неизвестных коэффициентов). При этом

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 \\ 1 & x_4 & x_4^2 & x_4^3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}.$$

Подробнее вопросы параметрической идентификации изложены в книге [21]. Применение конкретного метода зависит от выбранной структуры модели, а также априорной и измерительной информации об объектах идентификации. Рассчитанные начальные значения параметров обычно уточняются методами оптимизации (гл. 7) с целью

К количественному уровню моделирования относятся также этап технического проектирования, учитывающий пространственные связи элементов объекта. Одна из форм пространственных связей — размерная связь между элементами объекта и порождающей среды. Связи между элементами объекта называются конструктивными, а между элементами объекта и объектами порождающей среды технологическими осянками, инструмента, оборудования — технологическими.

Этому этапу моделирования соответствуют модели в виде графов и гиперграфов. Например, для распространенных плоских конструкций, т. е. конструкций, в которых элементы и соединения располагаются в ограниченном числе параллельных плоскостей (интегральные схемы, многослойные печатные платы, различного рода техническая документация и др.), целесообразно процесс проектирования разбить на два последовательно выполняемых этапа. На первом — строится предварительный вариант размещения элементов и соединений, удовлетворяющий топологическим ограничениям (например, запрещение расположения трасс в заданных областях монтажного пространства и пересечения различных соединений). На втором — полученный вариант преобразуется в реализуемую конструкцию, т. е. удовлетворяющую не только топологическим, но и метрическим ограничениям (например, фиксированные размеры элементов, минимальные допустимые расстояния между различными элементами конструкции).

● Описанный подход к техническому проектированию называется *топологическим* и включает основные этапы: 1) построение математической модели плоского объекта; 2) формирование плоской укладки модели объекта (топологический анализ); 3) планаризацию модели; 4) построение предварительного варианта размещения элементов и соединений; 5) построение окончательного варианта размещения элементов и соединений.

На первом этапе строится математическая модель объекта. На втором — выделяется максимальная часть модели, которая может быть уложена на плоскости без нарушения топологических ограничений. Если выделенная часть имеет не все элементы модели, то выполняется третий этап, на котором исходная модель преобразуется в планарную, с учетом особенностей технологии. Четвертый этап предназначен для автоматической прорисовки предварительного варианта конструкции, окончательно обрабатываемой на пятом этапе.

Существуют три вида топологических моделей плоских объектов — *граф*, *гиперграф* и *многоместный граф* [38, 53]. Модель объекта в виде графа можно строить на описании двух различных отображений. При первом — элементы объекта соответствуют вершинам графа, при втором — прообразами вершин являются контакты. Если между некоторыми контактами запрещены соединения, то вершины, соответствующие таким контактам, соединяются структурными ребрами. Уточненное представление модели плоского объекта в виде графа (модель M1) предполагает отображение элементов и их соединений в вершины графа, причем граф превращается в двудольный граф, а отношения инцидентности в объекте превращаются в отношения смежности.

Представление модели объекта в виде гиперграфа предполагает однозначное соответствие элементов вершинам, а соединений — ребрам

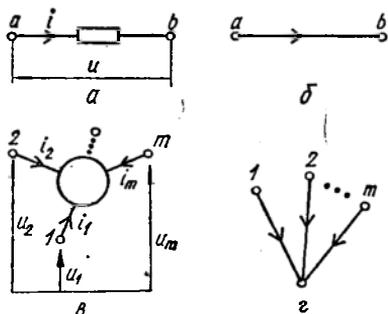


Рис. 30. Обобщенный двухполюсник (а) и его полюсный граф (б); многополюсный компонент (в) и его полюсный граф (г).

1. Сумма потоковых переменных у каждой вершины графа модели (или в любом его сечении) равна нулю.

2. Сумма разностных переменных по любому замкнутому контуру графа модели равна нулю.

По аналогии с теорией электрических цепей эти законы называют обобщенными законами Кирхгофа и интерпретируют в зависимости от физической природы объекта в виде уравнений баланса токов и напряжений (радиоэлектронные цепи), расходов и баланса падения давления (пневмогидравлические цепи), балан-

сов сил и скоростей (механические устройства), тепловых потоков и разности температур (теплотехнические цепи) и др. [8, 10]. В табл. 13 приведены физические значения потоковых и разностных переменных для объектов различной физической природы.

Положим для общности, что объект состоит из двухполюсных и многополюсных компонентов (рис. 30, а, б, в, г) с потоковыми перемен-

Таблица 13. Значения переменных для различных цепей

Переменная	Символы	Тип цепи			
		механическая		электрическая	гидравлическая
		поступательная	вращательная		
Потоковая величина	i	Сила	Момент	Ток	Объемный расход
Разностная величина	u	Скорость	Угловая скорость	Напряжение	
Интегральная потоковая величина	q	Импульс	Импульс момента	Заряд	Давление
Интегральная разностная величина	ϕ	Перемещение	Угол поворота	Магнитный поток	Объем
					Отсутствует

ными i и разностными u переменными, которые описываются соответствующими полюсными графами.

Тогда обобщенные законы Кирхгофа в матричной форме имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \Pi i &= 0, \\ P u &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

где Π , P — матрицы независимых сечений и контуров соответственно. Независимым является такой контур, который отличается от предыдущих хотя бы одним новым ребром.

или

$$[1\rho] \begin{bmatrix} u_N \\ u_T \end{bmatrix} = P u = 0,$$

если преобразовать формы матрицы контуров к виду $[\rho 1]$, где ρ — матрица контуров для ребер дерева размером $[l - v + 1] \times [v - 1]$.

Каждому ребру графа приписывается направление, соответствующее направлению потоковой переменной i_j . Поэтому сечения и контуры также имеют направления, определяемые направлениями инцидентных ребер дерева или хорд соответственно.

Решать задачу о выборе дерева возможно двумя способами. При первом — дерево строится на множестве вершин графа без учета структуры последнего. В таком случае дерево представляет собой самостоятельный граф (например, совокупность узловых величин v), совмещенный с графом объекта в его вершинах (рис. 31, а). Базовые уравнения законов равновесия преобразуются к виду:

$$\left. \begin{aligned} A i &= 0, \\ u &= A' v, \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

где A — матрица инцидентий, отображающая взаимоотношение вершин и ребер графа и имеет такую же размерность, как матрица сечений Π . По существу, матрица A и есть матрица сечений (канонических), выбранных так, что каждое сечение охватывает отдельную вершину графа, которой инцидентно только одно ребро дерева — соответствующая узловая величина (рис. 31, б).

При втором случае в качестве ребер графа выбирают ребра самого графа (рис. 31, в). Выбор дерева и формирование топологического описания графа в виде уравнений законов равновесия составляет отдельную процедуру, целью которой является получение одной из топологических матриц π или ρ (они связаны зависимостью $\rho = -\pi^t$).

Искомые топологические матрицы преобразованием исходной матрицы инцидентий графа A , используя алгоритм Гаусса, приводят к виду $[1\pi]$. Ребра, определяющие столбцы преобразованной матрицы, которые относятся к единичной матрице размера $[v - 1] \times [v - 1]$, являются ребрами дерева графа, а остальные — хордами. Более экономно формировать матрицы π и ρ непосредственно на множестве ребер и вершин графа объекта, используя только логические операции [7]. Топологические уравнения в любой форме (5.3)...(5.6), отражающие структурные связи в проектируемом объекте, всегда линейны.

Помимо топологических уравнений при количественном моделировании объектов большое значение имеют также компонентные уравнения, характеризующие взаимосвязи потоковых и разностных переменных ребер графа:

$$K(u, i) = 0. \quad (5.7)$$

В отличие от топологических компонентные уравнения нелинейны. В процессе вычислений на ЭВМ уравнение (5.7) в пределах временного шага линеаризуется в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial u} (u^{(l)} - u^{(l-1)}) + \frac{\partial K}{\partial i} (i^{(l)} - i^{(l-1)}) &= 0, \\ \frac{\partial K}{\partial u} u^{(l)} + \frac{\partial K}{\partial i} i^{(l)} &= \frac{\partial K}{\partial u} u^{(l-1)} + \frac{\partial K}{\partial i} i^{(l-1)} \end{aligned}$$

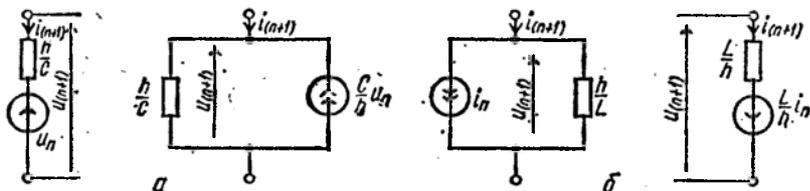


Рис. 32. Схема замещения инерционного компонента с уравнением $i = C \frac{du}{dt}$ (а) и уравнением $u = L \frac{di}{dt}$ (б).

Выражениям (5.10) соответствуют дискретные схемы замещения, справедливые для рассматриваемого интервала времени $t_n < t < t_{n+1}$ (рис. 32, а).

Аналогично для второго уравнения системы (5.9) на основе неявного метода Эйлера находим выражения:

$$\left. \begin{aligned} i_{L(n+1)} &= i_{L(n)} + \frac{h}{L} u_{L(n+1)}, \\ u_{L(n+1)} &= \frac{L}{h} i_{L(n+1)} - \frac{L}{h} i_{L(n)}, \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

которым соответствуют дискретные схемы замещения, показанные на рис. 32, б. Таким образом, инерционность элемента объекта учитывается введением в его схему замещения дополнительных независимых источников, характеризующих состояние переменных элемента в предыдущий момент времени. На каждом новом временном шаге параметры компонентов такой схемы замещения обновляются. Этот принцип сохраняется и в том случае, когда вместо метода Эйлера используются другие более сложные методы численного интегрирования.

Сложность исходных компонентных уравнений (5.7) зависит от того, используются ли микромоделли или макромоделли для элементов объекта. При переходе к макромоделлям упрощается структура модели объекта, а следовательно, его топологические уравнения, но, как правило, существенно усложняются компонентные уравнения.

Различные типы математических моделей объекта получают различным сочетанием уравнений равновесия и компонентных уравнений.

Например, уравнения однородной модели объекта по методу сечений OM_1 строятся только на основании первого уравнения сечений системы (5.3), в которые вводятся компонентные соотношения

$$i = K(u) = K(u_T, u_N) = K(u_T, -\rho u_T) = K^*(u_T),$$

предварительное преобразование на основе соотношения (5.5).

Уравнения имеют вид:

$$\left[\Pi \frac{\partial K^*}{\partial u_T} \right] u_T = bf$$

или

$$\left[\Pi \frac{\partial K}{\partial u} \Pi^t \right] u_T = bf, \quad (5.12)$$

Примером является известный алгоритм логического заполнения матрицы модели OM_{10} , или матрицы проводимости [72]. Если для упрощения записи в (5.12) обозначить вектор частных производных компонентных уравнений $Y_b = \frac{\partial K}{\partial u}$, то из (5.12) видно, что диагональный элемент матрицы равен

$$y_{kk} = [\pi_{k1}, \pi_{k2}, \dots, \pi_{ki}] [Y_b] [\pi_{k1}, \pi_{k2}, \dots, \pi_{ki}]^t = \sum_{i=1}^l \pi_{ki}^2 y_{bi}, \quad (5.16)$$

а недиагональный элемент, расположенный на пересечении k -й строки и s -го столбца, определяется как

$$y_{ks} = [\pi_{k1}, \pi_{k2}, \dots, \pi_{ki}] [Y_b] [\pi_{s1}, \pi_{s2}, \dots, \pi_{si}]^t = \sum_{i=1}^l \pi_{ki} \pi_{si} y_{bi}. \quad (5.17)$$

При $\pi_{ki} = \pm 1$ находим, что диагональный элемент y_{kk} равен сумме проводимостей ребер, пересекаемых k -м сечением, а элемент y_{ks} равен сумме проводимостей ребер, общих для k -го и s -го сечений. Общие проводимости суммируются со знаком «+», если сечения по отношению к данному ребру направлены одинаково, и со знаком «-», если сечения направлены противоположно. Аналогично k -я компонента вектора b в правой части выражения (5.12) обозначает совокупность принадлежащих k -му сечению ребер, определяющих задающие источники, с учетом их направления относительно сечения.

Таким образом, элементы матриц $Y = [PY_b P^t]$ и b уравнений (5.12) записываются непосредственно из графа объекта без каких-либо операций над матрицами и векторами, например поочередным рассмотрением независимых сечений и их комбинаций.

Сформулированные правила логического заполнения элементов матриц уравнений модели объекта применяют и для других типов моделей. Например, для таблично-узловой модели GM_{10} , определяемой (5.15), матрица коэффициентов уравнений имеет структуру

$$\begin{bmatrix} Y & N \\ M & Z \end{bmatrix}^* \quad (5.18)$$

в которой ее верхняя часть соответствует независимым сечениям графа объекта с учетом инцидентности этим сечениям вводимых потоковых переменных i_2 Z -компонентов, причем субматрица Y формируется аналогично матрице проводимости. Нижняя часть матрицы уравнений соответствует компонентным уравнениям Z -компонент.

Рассмотрим последовательность логических процедур получения модели GM_{10} на примере объекта в виде электрической схемы (рис. 31, а). В схему входят два зависимых источника: тока I_D , управляемого током индуктивности i_L , и напряжения U_D , управляемого напряжением емкости u_C . С учетом операций линеаризации и алгебраизации компонентные уравнения схемы можно записать в виде

$$i_C = \alpha C u_C + J_C,$$

$$u_L = \alpha L i_L + E_L,$$

Тогда система уравнений принимает вид

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} y_{11}^1 & & & y_{12}^1 & & u_{n1}^1 \\ & y_{11}^2 & & y_{12}^2 & & u_{n1}^2 \\ & & \ddots & & & \vdots \\ & & & y_{12}^m & & u_{n1}^m \\ \hline y_{21}^1 & y_{21}^2 & & y_{21}^m & y_{22}^m & u_{n2} \end{array} \right] = b. \quad (5.27)$$

Аналогичные результаты получают и для других координатных базисов, в частности, для таблично-узловой модели при разрыве k ветвей с токами i_k :

$$\left[\begin{array}{ccc|c} y_{11}^1 & & & u_{11}^1 \\ & y_{11}^2 & & u_{11}^2 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & u_{11}^m \\ \hline -A_{11}^t & & & Z_{11} \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} u_{11}^1 \\ u_{11}^2 \\ \vdots \\ u_{11}^m \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ E \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Физическое введение переменных связи в систему. Для объединения различных подсистем вводят следующие переменные связи: токи короткозамкнутых ветвей I_S , объединяющих расчлененные узлы; напряжения разомкнутых ветвей U_0 , связывающих базисные узлы отдельных подсистем; зависимые источники U_D и I_D , управляемые переменными смежных подсистем [71].

Объединяя уравнения отдельных подсистем, сформированные в различных системах координат с учетом воздействия переменных связи

$$x_c = \{I_S, U_0\}^t \text{ или } x_c = \{U_D, I_D\}^t,$$

получают уравнения в виде (5.26).

Предварительное разбиение на кластеры. Граф системы разбивается на ряд слабосвязанных между собой подграфов (кластеров), имеющих сильную связь между внутренними вершинами этих подграфов. Алгоритм выделения кластеров заключается в построении специальной таблицы, состоящей из трех столбцов: рассматриваемых узлов IS ; смежных узлов AS ; мощности множества AS , т. е. $|AS| = CN$. При разделении узлов системы на подмножества n_1^i и n_2 при ограничении размера n_1^i выполняется следующее: 1) выбирают начальный узел в массиве $IS(i)$, записывают в $AS(i)$ номера узлов, связанных с выбранным, а их число — в массив $CN(i)$;

2) определяют следующий начальный номер из $AS(i)$ и, помещая его в $IS(i+1)$, строят $AS(i+1)$ из $AS(i)$ методом исключения узла $n_{(i+1)}$ и добавления множества узлов, связанных с $n_{(i+1)}$ и не содержащихся в $AS(i)$;

3) записывают $CN(i+1) = |AS(i+1)|$. Если $CN(i+1) = 0$, то происходит останов процедуры. При использовании разрешенных n_1^i -шагов минимальные значения чисел в $CN(i)$ определяют узлы оптимального разбиения на подсистемы.

Пример работы алгоритма приведен в книге [50].

Развертывание плотных матриц. В противоположность процедуре Гаусса вводят операцию развертывания матрицы, заключающуюся

Столбцы матрицы A^* и b^* в (5.32) набираются процедурой

$$\left. \begin{aligned} A^* &= [Dx^1, Dx^2, \dots, Dx^n] = [x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}]; \\ b^* &= Dx^0 = x^0. \end{aligned} \right\} \quad (5.36)$$

В результате решения (5.32) находят переменные всех подсистем:

$$x_i = b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{1,ij} x_j - \sum_{r=1}^m a_{3,ir} x_{cr}, \quad i = 1, 2, \dots, n - m, \quad (5.37)$$

где $a_{1,ij}$ и $a_{3,ir}$ — элементы матриц A_1 и A_3 из выражения (5.26).

Рассмотрим метод решения на примере системы уравнений следующего вида:

1					2
	2				1
	2	2			
1			1		
1	3			2	
		4	2		

x_1	2
x_2	1
x_3	3
x_4	
x_5	
x_6	1

 $=$

откуда

1					
	2				
	2	2			
1			1		
1	3			2	
		4	2		1

 $f =$

2
1

 $;$
 $c =$

Решая дважды систему уравнений, аналогичную (5.35), с разными правыми частями, получаем следующие результаты:

$$x_1^0 = 2; \quad x_2^0 = 1/2; \quad x_3^0 = \frac{3 - 2x_1^0}{2} = 1; \quad x_4^0 = -x_1^0 = -2;$$

$$x_5^0 = \frac{-x_1^0 - 3x_2^0}{2} = -7/4; \quad x_6^0 = 1 - 4x_3^0 - 2x_4^0 = 1;$$

$$x_1^1 = 2; \quad x_2^1 = 1/2; \quad x_3^1 = -1/2; \quad x_4^1 = -2; \quad x_5^1 = -7/4; \quad x_6^1 = 6.$$

Используя вспомогательную матрицу $D = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$, формируем уравнения (5.32) с помощью соотношений (5.26):

$$6x_6 = 1,$$

откуда $x_6 = 1/6$.

В соответствии с (5.37) для остальных переменных находим следующие значения:

$$x_1 = 2 - 2x_6 = 5/3; \quad x_2 = \frac{1 - x_6}{2} = \frac{5}{12}; \quad x_3 = \frac{3 - 2x_2}{2} = \frac{13}{12};$$

$$x_4 = -x_1 = -5/3; \quad x_5 = \frac{-x_1 - 3x_2}{2} = -\frac{35}{24}.$$

или

1	2								x_1	2
	1							2	x_6	1
		1	3			1			x_5	0
			2					2	x_2	3
				1		1			x_9	0
				2	4				x_3	1
-1							1		x_{c1}	
			-1					1	x_{c2}	
						-1		1	x_{c3}	

В частности в вектор переменных связи x_c войдут $\{x_1, x_2, x_3\}$.
При этом

$$W_1^{(1)} = [A_1^{(1)}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ & 1 \end{bmatrix}; \quad W_1^{(2)} = [A_1^{(2)}]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,5 & -0,75 \\ & 0,5 \end{bmatrix}; \quad W_1^{(3)} = [A_1^{(3)}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \\ -0,5 & 0,25 \end{bmatrix}$$

После подстановки в (5.41) и (5.42) соответствующих подматриц определяем

$$A_c^* = \begin{bmatrix} 1 & -4 & \\ & 1 & 1 \\ -0,5 & & 1 \end{bmatrix}; \quad b_c^* = \begin{bmatrix} 0 & 3/2 & 1/4 \end{bmatrix}^t.$$

В результате переменные связи

$$x_c = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = [A_c^*]^{-1} b_c^* = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 4 & -4 \\ -1/2 & 1 & -1 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 3/2 \\ 1/4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5/3 \\ 5/12 \\ 13/12 \end{bmatrix}.$$

Находим подвекторы переменных

$$x_1^{(1)} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_6 \end{bmatrix} = W_1^{(1)} (b_1^{(1)} - a_3^{(1)} x_c) = \begin{bmatrix} 5/3 \\ 1/6 \end{bmatrix};$$

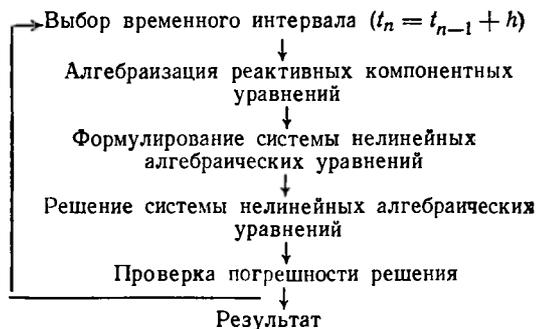
$$x_1^{(2)} = \begin{bmatrix} x_5 \\ x_2 \end{bmatrix} = W_1^{(2)} (b_1^{(2)} - a_3^{(2)} x_c) = \begin{bmatrix} -35/24 \\ 5/12 \end{bmatrix};$$

$$x_1^{(3)} = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_3 \end{bmatrix} = W_1^{(3)} (b_1^{(3)} - a_3^{(3)} x_c) = \begin{bmatrix} -5/3 \\ 13/12 \end{bmatrix}.$$

Нетрудно убедиться в идентичности результатов для рассматриваемой системы уравнений.

Очевидным представляется использование параллельной вычислительной системы (ПВС) для одновременной реализации вычислений по выражениям (5.35), (5.36), (5.37) или (5.40), (5.41), (5.42), а также

определения динамического режима объекта сводится к многократной процедуре нахождения его квазистатических состояний для каждого интервала времени, на которых проводится алгебраизация инерционных компонентных соотношений:



Нелинейное алгебраическое уравнение типа (6.3) или (6.2) решается итерационно, например с помощью метода Ньютона — Рафсона [37, 50], при этом

$$x_{n+1}^{(m+1)} = x_{n+1}^{(m)} - \frac{F(x_{n+1}^{(m)}, t_{n+1})}{F'(x_{n+1}^{(m)}, t_{n+1})}, \quad (6.4)$$

где $F'(x_{n+1}^{(m)}, t_{n+1}) = \frac{\partial F}{\partial x_{n+1}^{(m)}}$ — матрица Якоби;

m — номер текущей итерации ($m = 0$ соответствует некоторое начальное значение x_{n+1}^0).

Матрица Якоби, определяемая при линейризации компонентных зависимостей членами с первыми производными ряда Тейлора, аналогична выражению (5.8)

$$F'(x_{n+1}^{(m)}, t_{n+1}) = A(x_{n+1}^{(m)}) \quad (6.5)$$

и совпадает по форме с матрицами математических моделей объекта, рассмотренных в п. 5.2.

Подставляя (6.5) и (6.4), находим

$$A(x_{n+1}^{(m)}) \cdot x_{n+1}^{(m+1)} = b(x_{n+1}^{(m)}) \quad (6.6)$$

где

$$b(x_{n+1}^{(m)}) = A(x_{n+1}^{(m)}) x_{n+1}^{(m)} - F(x_{n+1}^{(m)}, t_{n+1}).$$

Таким образом, система линейных уравнений (6.6) итеративно решается до тех пор, пока максимальная погрешность составляющих вектора переменных x становится меньше заданной, т. е.

$$E_{\max} = \max_i \left| \frac{x_{i(n+1)} - x_{i(n)}^{(m)}}{x_{\max_i}} \right| < \varepsilon, \quad i = 1, \dots, n. \quad (6.7)$$

Для повышения сходимости и точности применяются также итерационные методы Ньютона, в соответствии с которыми

$$\hat{x}_i^{(m+1)} = x_i^{(m)} + \Delta x_1^{(m)} + \Delta x_2^{(m)} + \Delta x_3^{(m)} + \dots, \quad (6.10)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta x_1^{(m)} &= -\frac{F(x_1^{(m)})}{F'(x_1^{(m)})}; & x_1^{(m)} &= x_i^{(m)}; \\ \Delta x_2^{(m)} &= -\frac{F(x_2^{(m)})}{F'(x_2^{(m)})}; & x_2^{(m)} &= x_i^{(m)} + \Delta x_1^{(m)}; \\ \Delta x_3^{(m)} &= -\frac{F(x_3^{(m)})}{F'(x_3^{(m)})}; & x_3^{(m)} &= x_i^{(m)} + \Delta x_1^{(m)} + \Delta x_2^{(m)}. \end{aligned}$$

Если полученная по методу Ньютона последовательность результатов не сходится к решению за заданное максимальное число итераций, то целесообразно перейти к одной из разновидностей метода продолжения решения по параметру [71]. Например, можно постепенно переводить объект из априорно известного начального состояния в искомый статический режим введением специального параметра τ , изменяемого в пределах $0 \leq \tau \leq 1$. При $\tau = 0$ решение уравнений модели схемы известно, конечное значение $\tau = 1$ соответствует рассчитываемому режиму. Для каждого из фиксированных значений параметра $\Delta\tau$ решается частная задача статики, и поскольку метод Ньютона обладает локальной сходимостью, можно для достаточно малых значений приращений $\Delta\tau$ гарантировать сходимость задачи нахождения статического режима, если система уравнений исследуемого объекта непрерывно дифференцируема на всем интервале изменения τ . Выбор приращений $\Delta\tau$ целесообразно осуществлять по процедуре, принятой для оценки локальной погрешности метода численного интегрирования (п. 6.2).

Решение линейных систем. Для решения базовой линейной системы уравнений вида (6.6)

$$Ax = b \quad (6.11)$$

наиболее часто используется метод последовательного исключения Гаусса или одна из его модификаций [42]. Если правая часть в (6.11) меняется многократно, то рекомендуется применять метод LU -преобразования, в соответствии с которым матрица A решаемой системы уравнений представляется произведением нижней треугольной матрицы с единичной диагональной L и верхней треугольной матрицы U :

$$A = LU. \quad (6.12)$$

При этом элементы матриц L и U определяются с помощью следующей рекуррентной процедуры:

$$\left. \begin{aligned} u_{sj} &= a_{sj} - \sum_{k=1}^{s-1} l_{sk}u_{kj}, & j &= s, s+1, \dots, n, \\ l_{is} &= \left(a_{is} - \sum_{k=1}^{s-1} l_{ik}u_{ks} \right) / u_{ss}, & i &= s+1, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad s = 1, \dots, n, \quad (6.13)$$

к форме, максимально приближающейся к нижней треугольной матрице. Сходимость итерационного процесса можно также улучшить повышением симметричности метода Гаусса — Зейделя, если от однонаправленного процесса вычислений перейти к двунаправленному. В первом случае одна из каждой пары смежных итераций выполняется в обычном направлении, использующем нижнюю треугольную матрицу L , а вторая — в противоположном с использованием верхней треугольной матрицы U . Тогда вместо (6.15) поочередно применяют выражения:

$$x_i^m = D_{ii}^{-1} (b_i - L_i \hat{x}^m - U_i x^{m-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (6.16)$$

$$x_j^{m+1} = D_{jj}^{-1} (b_j - L_j x^m - U_j \tilde{x}^{m+1}), \quad j = n, n-1, \dots, 1, \quad (6.17)$$

где

$$\hat{x}^m = (x_1^m, \dots, x_i^m, x_{i+1}^{m-1}, \dots, x_n^{m-1})^t,$$

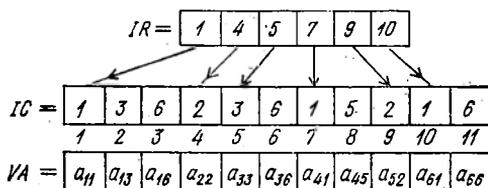
$$\tilde{x}^{m+1} = (x_1^m, \dots, x_{j-1}^m, x_j^{m+1}, \dots, x_n^{m+1})^t.$$

Во многих случаях решаемые системы линейных уравнений являются разреженными (п. 5.2). Поэтому при их решении основное внимание уделяется вопросам целесообразного хранения информации о решаемой системе уравнений, поддержанию наибольшей степени ее разреженности на всех этапах вычислительного процесса и разработке специальных методов оптимальной организации вычислений в процессе решения разреженных систем [42, 50].

Разреженная матрица кодируется тремя списочными массивами: элементов VA , содержащим значения ненулевых элементов матрицы; столбцов IC , содержащим порядковые индексы столбцов ненулевых элементов; строк IR , содержащее ячеек которого указывает номер ячейки массива IC , с которой начинается информация о ненулевых элементах данной строки, причем разница содержимого соседних ячеек $\{IR(i+1) - IR(i)\}$ соответствует числу ненулевых элементов в i -й строке. Например для матрицы

a_{11}		a_{13}			a_{16}
	a_{22}				
		a_{33}			a_{36}
a_{41}				a_{45}	
	a_{52}				
a_{61}					a_{66}

кодирующие списки имеют вид



зования достигается предварительным упорядочением решаемой системы уравнений [42, 45].

Существует большое количество стратегий упорядочения, представляющих собой n -шаговую процедуру, каждый шаг которой включает: выбор среди элементов матрицы A текущего главного элемента, удовлетворяющего критерию упорядочения и условиям вычислительной устойчивости; перестановку строк и столбцов матрицы A так, чтобы выбранные главные элементы лежали на главной диагонали; анализ полученной ненулевой структуры для определения позиций ННЭ и проведение соответствующей коррекции информационных массивов.

Перестановка строк и столбцов может выполняться и многократно после определения главных элементов, причем на каждом шаге упорядочения новые номера строк и столбцов запоминаются в специальных векторах перестановок.

Одним из наиболее пространственных критериев упорядочения разреженных систем уравнений является критерий Марковица, в соответствии с которым главный элемент выбирается на пересечении тех строк и столбцов матрицы, среди которых главный элемент еще не был выбран, и которому соответствует минимальный вес ω_{ij} :

$$\omega_{ij} = \min_{ij} [(c_i - 1)(r_j - 1)], \quad (6.18)$$

где r_j , c_i — число ненулевых элементов в j -й строке и i -м столбце, расположенных в непреобразованной части упорядочиваемой матрицы A . Вес ω_{ij} соответствует максимальному числу ННЭ, которые могут появиться, если в качестве главного будет выбран элемент a_{ij} .

При упорядочении уравнений модели объекта трудно обеспечить выполнение условий вычислительной устойчивости, связанных с выбором для каждого шага LU -преобразования в качестве главного элемента наибольшего по абсолютному значению элемента некоторого столбца (строки) из непреобразованной еще части матрицы A . Это объясняется, с одной стороны, противоречивостью требований сохранения разреженности матрицы A и условий вычислительной устойчивости и, с другой стороны, сложностью предварительной оценки величин, изменяющихся в процессе вычислений элементов матрицы. Поэтому на практике ограничиваются контролем величины главных элементов упорядочиваемой системы уравнений, стремясь обеспечить, чтобы все выбранные в качестве главных элементы были больше некоторого минимально допустимого для них значения. При этом на каждом шаге упорядочения выделяемый по критерию (6.18) элемент проверяется по величине. Если величина элемента больше допустимого минимального значения, то он выбирается в качестве главного, в противном случае поиск продолжается.

При упорядочении уравнений модели объекта учитываются их особенности. Например, уравнения модели OM_{10} по методу узловых величин, частично GM_{10} (таблично-узловой модели), характеризуются тем, что элементы главной диагонали матриц их коэффициентов доминируют по величине в своих строках. Поэтому в процессе упорядочения при выборе главных элементов даже при равных весах ω_{ij} предпочтительней диагональные элементы матриц.

истинное решение определяется выражением

$$x = x' - \left(\frac{x'_k}{z_k - 1/g_k} \right) z, \quad (6.19)$$

где x, z — решения систем уравнений $A'x' = b$ и $A'z = e_k$ соответственно, а x'_k, z_k — их k -е составляющие.

Точность решения линейной системы (6.11) зависит от степени обусловленности матрицы A уравнений модели объекта, под которой понимают величину

$$\text{cond}(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| = \frac{|\lambda_{\max}|}{|\lambda_{\min}|}, \quad (6.20)$$

где λ_{\max}^2 и λ_{\min}^2 — соответственно максимальное и минимальное по величине собственные значения эрмитовой матрицы $A^t A$.

Например, если вектор правой части системы (6.11) задан с погрешностью δb , то погрешность при нахождении вектора переменных x определяется выражением

$$\frac{\|\delta x\|}{\|x\|} \leq \text{cond}(A) \cdot \frac{\|\delta b\|}{\|b\|}, \quad (6.21)$$

где $\|\cdot\|$ означает норму вектора, в частности, евклидовскую

$$\|x\| = \sqrt{x^t x} = \sqrt{|x_1|^2 + |x_2|^2 + \dots + |x_n|^2}.$$

Если с погрешностью задана матрица уравнений $(A + \delta A)$, то вызываемая погрешность при определении вектора переменных оценивается в соответствии с

$$\frac{\|\delta x\|}{\|x - \delta x\|} \leq \text{cond}(A) \cdot \frac{\|\delta A\|}{\|A\|}. \quad (6.22)$$

При решении жестких систем уравнений, т. е. уравнений, характеризующихся большим разбросом собственных значений λ_i , могут возникнуть существенные вычислительные затруднения.

Проектировщику, моделирующему инженерный объект на САПР, следует учитывать вышеизложенное и по возможности стремиться к снижению величины $\text{cond}(A)$ то ли правильным выбором модели из имеющихся вариантов (п. 5.2), существенно отличающихся этой величиной, то ли использованием процедуры, аналогичной методу диагональной модификации, то ли согласованным выбором параметров компонентов и их округления.

Рассмотренные методы решения линейных систем уравнений применимы к случаю частотного анализа линейного объекта, когда уравнение (6.11) с учетом операторных компонентных выражений преобразуется к виду

$$(\text{Re } A + j \text{Im } A)(\text{Re } x + j \text{Im } x) = \text{Re } b + j \text{Im } b,$$

в результате чего при частотном анализе решается система уравнений удвоенной размерности

$$\begin{bmatrix} \text{Re } A & -\text{Im } A \\ \text{Im } A & \text{Re } A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re } x \\ \text{Im } x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re } b \\ \text{Im } b \end{bmatrix}. \quad (6.23)$$

Решение для (6.25) эквивалентно решению m систем линейных уравнений типа

$$[A] \begin{bmatrix} i'_j \\ u_j \end{bmatrix} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6.26)$$

где $i'_j = \frac{\partial i}{\partial \xi_j}$, $u'_j = \frac{\partial u}{\partial \xi_j}$,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\partial\varphi_1/\partial u \\ -\partial\varphi_2/\partial i & 1 \end{bmatrix}, \quad b_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial\varphi_1}{\partial \xi_j} \\ \frac{\partial\varphi_2}{\partial \xi_j} \end{bmatrix}^t.$$

Исходная модель объекта (6.24) при решении также подвергается линеаризации и алгебраизации, в результате чего получаем математическую модель:

$$\left. \begin{aligned} i - \frac{\partial\varphi_1}{\partial u} \cdot u &= W_1, \\ u - \frac{\partial\varphi_2}{\partial i} \cdot i &= W_2, \end{aligned} \right\} \quad (6.27)$$

где W_i — векторы задающих источников, учитывающие вклады процедур линеаризации и алгебраизации, или

$$[A] \begin{bmatrix} i \\ u \end{bmatrix} = W. \quad (6.28)$$

Сравнение выражений (6.28) и (6.26) показывает, что модель чувствительности (МЧ) для объекта характеризует другой объект, топологически эквивалентный исходному, переменные которого (потокосные разностные) соответствуют производным переменным исходного объекта по варьируемому параметру ξ_i . При этом устраняются, все задающие источники, воздействующие на исходную модель объекта; нелинейные компоненты исходного объекта заменяются линейными эквивалентами; компоненты объекта, характеристики которых зависят от ξ_j , дополняются параллельно включенными источниками $\partial\varphi_1/\partial \xi_j$ (если это Y -компонент) или последовательно включенным источникам $\partial\varphi_2/\partial \xi_i$ (если это Z -компонент).

Математические модели исходного объекта (6.27) и модели чувствительности (6.25) представляют собой системы линейных алгебраических уравнений (для каждой временной точки), в которых различаются только векторы правых частей.

В соответствии с процедурой МЧ для определения динамики изменения n выходных характеристик объекта (типа потоковых или разностных переменных) по m варьируемым параметрам на рассматриваемом интервале времени $[t_0, t_k]$ необходимо решить $(m+1)$ систему уравнений: нелинейную систему алгебро-дифференциальных уравнений исходного объекта и m линейных алгебро-дифференциальных систем уравнений соответствующих моделей чувствительности. По существу анализируется одна модель чувствительности с различными входными источниками $\hat{I}_k = \frac{\partial\varphi_{1k}}{\partial \xi_j}$, $\hat{E}_k = \frac{\partial\varphi_{2k}}{\partial \xi_j}$, значения которых определяются на основании анализа исходного объекта.

а $y_k^t = [i_k \ u_k]$ — решения уравнения (6.28), поскольку вектор B из (6.26) соответствует совокупности значений переменных, полученных при анализе уравнений исходного объекта.

В соответствии с процедурой присоединенных объектов для определения функций чувствительности n выходных характеристик объекта по m варьируемым параметрам в некоторый момент времени $t = t_i$ необходимо кроме расчета реакций исходного объекта на участке $[t_0, t_i]$, где t_0 — нижняя граница рассматриваемого интервала времени, проинтегрировать в обратном масштабе времени в диапазоне $[t_i, t_0]$ уравнения присоединенных объектов. При этом уравнения каждого из присоединенных объектов линейны (величины их отдельных компонентов определяются значениями в соответствующий момент времени составляющих вектора переменных исходного объекта) и отличаются между собой лишь векторами правых частей. По существу, анализируется один присоединенный объект с различными входными источниками сигнала единичной величины.

Уравнения присоединенного объекта (6.30) строят непосредственно по уравнениям исходного объекта (6.27).

Если в модели исходного объекта используется гибридная матрица (п. 5.2)

$$A = \begin{bmatrix} Y & N \\ M & Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ 0 & U_{22} \end{bmatrix}, \quad (6.34)$$

то матрица модели присоединенного объекта равна [71]:

$$A^t = \begin{bmatrix} Y^t & -M^t \\ -N^t & Z^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11}^t & 0 \\ -U_{12}^t & U_{22}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{11}^t & -L_{21}^t \\ 0 & L_{22}^t \end{bmatrix}. \quad (6.35)$$

Для однородных моделей объекта (п. 5.2) это преобразование существенно упрощается, при этом

$$A = Y \quad \text{и} \quad A^t = Y^t.$$

Метод присоединенного объекта является, по существу, разновидностью вариационного метода, использующего сопряженные уравнения, решаемые в обратном масштабе времени [42].

6.2. ВЫБОР МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Методы численного интегрирования при анализе динамических свойств объектов могут применяться непосредственно к уравнениям переменных состояния, сформированными для всего объекта, т. е. к модели ПС (п. 5.2), а также для алгебраизации реактивных компонентных уравнений при формировании моделей объекта типа (6.1) и (6.2).

Существует большое количество различных методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями вида

$$\frac{dx}{dt} = \varphi(x, t), \quad x_0 = x(0), \quad (6.36)$$

в котором

$$\alpha_j = (-1)^j \int_{-q}^p \binom{-s}{j} ds.$$

Раскрывая разности высоких порядков (6.39), можно представить в виде

$$x_{k+p} = x_{k-q} + h \sum_{j=0}^r \beta_j \varphi_{k-j}, \quad (6.40)$$

где

$$\beta_j = (-1)^j \left[\binom{j}{j} \alpha_j + \binom{j+1}{j} \alpha_{j+1} + \dots + \binom{r}{j} \alpha_r \right].$$

Различные конкретные формулы численного интегрирования получают на основании выражения (6.40), выбирая значения для p и q ($p \geq 0, q \geq 0$). Например, при $p = 1$ и $q = 0$ реализуется известный экстраполяционный явный метод численного интегрирования Адамса — Башфорта

$$x_{k+1} = x_k + h [\beta_0 \varphi_k + \beta_1 \varphi_{k-1} + \dots + \beta_r \varphi_{k-r}], \quad (6.41)$$

а при $p = 0$ и $q = 1$ реализуется интерполяционный неявный метод Адамса — Мултона в виде

$$x_k = x_{k-1} + h [\beta_0^* \varphi_k(x_k) + \beta_1^* \varphi_{k-1} + \dots + \beta_r^* \varphi_{k-r}], \quad (6.42)$$

который для последующего сравнения с (6.41) удобней переписать следующим образом:

$$x_{k+1} = x_k + h [\beta_0^* \varphi_{k+1} + \beta_1^* \varphi_k + \dots + \beta_r^* \varphi_{k+1-r}]. \quad (6.43)$$

При выборе $r = 0$ в (6.41) и (6.43) реализуется соответственно явный и неявный методы Эйлера

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + h \varphi_k = x_k + h \dot{x}_k, \\ x_{k+1} &= x_k + h \varphi_{k+1} = x_k + h \dot{x}_{k+1}. \end{aligned}$$

Может показаться, что явный многошаговый метод является наиболее простым методом с точки зрения вычислений. Однако использование явных методов ограничивается из-за низкой устойчивости вычислений, характеризующей накопление погрешности от шага к шагу. Для заданного числа r неявный метод (6.43) является в принципе более точным, чем явный метод (6.41). Кроме того, в явных методах значение шага h должно быть гораздо меньше, чем в неявных методах (вследствие абсолютной устойчивости последних).

Рассмотрим процесс реализации неявных методов. На основании (6.43) и (6.36) можно получить нелинейное алгебраическое уравнение, которое необходимо решить для определения x_{k+1} :

$$\varepsilon = x_{k+1} - h \beta_0^* \varphi(x_{k+1}, t_{k+1}) - \sum_{l=1}^r \beta_l^* \varphi_{k+1-l} = 0. \quad (6.44)$$

Если воспользоваться методом Ньютона, то

$$x_{k+1}^{m+1} = x_{k+1}^{(m)} - (P_{k+1}^{-1}) \varepsilon(x_{k+1}^{(m)}), \quad (6.45)$$

где

$$\gamma_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{k+1} \left(\frac{t_n - t_{n-j}}{t_{n-i} - t_{n-j}} \right), \quad i = 1, \dots, k+1.$$

Формула дифференцирования назад (ФДН) отличается от (6.50) и (6.51) использованием обратных разностей первого порядка

$$\Delta x_{n-i} = x_{n+1-i} - x_{n-i}, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

При этом получаем

$$\dot{x}_{n+1} = -\frac{1}{h} \sum_{i=0}^{k-1} \hat{\alpha}_i \Delta x_{n-i}; \quad (6.52)$$

$$x_{n+1}^{(0)} = x_n + \sum_{i=1}^k \hat{\gamma}_i \Delta x_{n-i}, \quad (6.53)$$

где

$$\hat{\alpha}_i = \sum_{j=0}^i \alpha_j^*, \quad \hat{\gamma}_i = -1 + \sum_{j=1}^i \gamma_j.$$

В пакете программ СПАРС [50, 47] использован неявный метод численного интегрирования жестких систем дифференциальных уравнений, основанный на применении разностей высших порядков. В соответствии с этим методом прогнозируемое значение вектора неизвестных математической модели объекта x_{n+1} определяется с помощью интерполяционного полинома Ньютона для неравных промежутков:

$$x_{n+1}^{(0)} = \sum_{i=1}^k \rho_i \nabla_n^i x_n^i, \quad (6.54)$$

где

$$\nabla_n^{(0)} = 1, \quad \rho_0 = 1, \\ \rho_i = \rho_{i-1} \frac{t_{n+1} - t_{n+1-i}}{t_n - t_{n-i}}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad \nabla_{n+1}^i = \rho_i \nabla_n^i.$$

Для алгебраизации производной по времени используется формула

$$h \dot{x}_{n+1} = c_0 x_{n+1} - \sum_{i=0}^{k-1} c_i \nabla_n^i x_n, \quad (6.55)$$

где

$$c_i = \rho_i \sum_{j=1}^{k-1} \frac{h}{t_{n+1} - t_{n-j}};$$

$\nabla_n^i x_n$ — разделенные разности, вычисленные в предыдущий момент времени t_n :

$$\nabla_n^i x_n = \nabla_n^{i-1} x_n - \rho_{i-1} \nabla_{n-1}^{i-1} x_{n-1}, \quad i = 1, \dots, k+2,$$

порядков $k \leq 6$ при относительном изменении шага вычислений $q = h_j/h_{j-1}$.

Для интегрирования уравнений слабодемпфированных резонансных цепей, полюсы которых практически расположены на мнимой оси комплексной плоскости, удобен следующий неявный A -устойчивый метод Рунге второго порядка:

$$\sum_{k=0}^2 a_k x_{n-k} + h_n \sum_{k=0}^2 b_k \dot{x}_{n-k} = 0, \quad (6.57)$$

где

$$\left. \begin{aligned} h_n &= t_n - t_{n-1}, \\ a_0 &= 1 - q(1 - \nu)/(1 + q), \\ a_1 &= -1 + q(1 - \nu), \\ a_2 &= -q^2(1 - \nu)/(1 + q), \\ q &= h_n/h_{n-1}, \\ b_0 &= \frac{(2 - \nu)(\nu q + 1)}{2(1 + q)}, \\ b_1 &= \frac{\nu}{2}(\nu q - q + 1), \\ b_2 &= \frac{q(1 - \nu)(\nu q + 2)}{2(1 + q)}, \\ \nu &= \frac{(3 - q)V_1 - 2(1 - q)}{(1 - q)V_1 + 2q}. \end{aligned} \right\} \quad (6.58)$$

Исследования показали, что при $V_1 \geq 0,667$ решение уравнений резонансных цепей методом (6.57) обеспечивает значительно меньшие амплитудные искажения (демпфирование) колебательных реакций цепи, чем остальные неявные методы второго порядка, включая метод трапеций, соответствующий случаю $V_1 = 1$ в (6.57) и (6.58) и метод Шихмана (6.56).

Оценка локальной погрешности. Каждый из методов численного интегрирования характеризуется локальной погрешностью, или погрешностью на данном шаге вычислений. Для k -шагового метода, в котором приближение x_{n+1} к точным значениям $x(t_{n+1})$ вычисляется через ранее вычисленные приближенные значения $x_{n-k}, x_{n-k+1}, \dots, x_{n-1}$, обобщенную формулу вычислений записывают в виде

$$\sum_{i=0}^k \alpha_i x_{n-i}/h - \psi(x_{n+1}, \dots, x_{n-k}) = 0. \quad (6.59)$$

Раскладывая функцию в (6.59) в ряд Тейлора в окрестности точки x_{n+1} , получают оценку для локальной погрешности дискретизации как оценку отсечения [75]. Если метод имеет k -й порядок, то приближенно

$$\varepsilon_T \approx [C_{k+1} x^{(k+1)}(\tau) h^{k+1} + O(h^{k+2})], \quad (6.60)$$

где $x^{(k+1)}(\tau)$ — $(k+1)$ -я производная от решения $x(t)$ в промежуточной точке $t_n < \tau < t_{n+1}$; $O(h^{k+2})$ — члены отсечения, содержащие

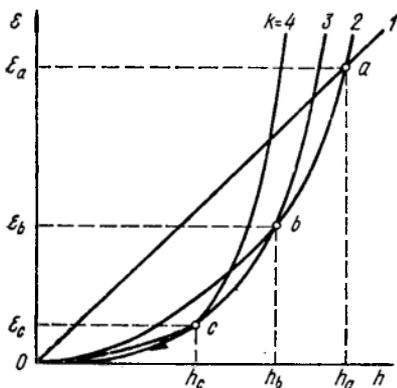


Рис. 34. Кривые зависимости допустимой погрешности на единичном шаге вычислений от изменений порядка К-алгоритмов.

которая представлена на рис. 34 для $k = 1, 2, 3$ и 4 . Из рисунка следует, что при $\varepsilon > \varepsilon_a$ — алгоритм первого порядка (неявный метод Эйлера) обеспечивает наибольший допустимый шаг вычислений; при $\varepsilon_b < \varepsilon < \varepsilon_a$ — алгоритм второго порядка (метод Шихмана); при $\varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_b$ — алгоритм третьего порядка и, наконец, при $\varepsilon < \varepsilon_a$ — алгоритм четвертого и более высоких порядков. Поскольку положение кривых, приведенных на рис. 34, зависит от текущих значений C_{k+1} и $x^{(k+1)}(t_{n+1})$, даже при выбранном постоянном ε оптимальные порядок k алгоритма и шаг вычислений h могут изменяться от одного временного шага к другому. Из рис. 34 следует, что любое увеличение допустимой погрешности ε не приводит к увеличению порядка формулы для максимизации шага вычислений и любое уменьшение ε не может привести к уменьшению оптимального порядка k используемого метода. Для достижения максимальной вычислительной эффективности в процессе интегрирования целесообразно одновременно изменять порядок алгоритмов и шаг, пользуясь многошаговыми алгоритмами.

Изменение порядка алгоритма эквивалентно смене набора коэффициентов, определяющих многошаговую формулу. Увеличение порядка k алгоритма требует увеличения числа коэффициентов в наборе, которое сопровождается повышением загрузки памяти ЭВМ для хранения предыдущих значений вектора переменных. Изменение шага связано со значительными вычислительными затратами, поскольку хранимые значения вектора переменных, соответствующие шагу h_{j-1} , часто необходимо интерполировать на новом шаге вычислений h_j . Процедура интерполяции упрощается, если предыдущие значения хранить в виде вектора обратных разностей

$$z_n = [x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-k}, h\dot{x}_n, \nabla^1(h\dot{x}_n), \nabla^2(h\dot{x}_n), \dots, \nabla^n(h\dot{x}_n)]^t$$

или в виде вектора Нордсика

$$y_n = \left[x_n, h\dot{x}_n, \frac{h^2 x_n''}{2}, \frac{h^3 x_n'''}{3!}, \dots, \frac{h^{2k+1} x_n^{(2k+1)}}{(2k+1)!} \right]^t,$$

старые и новые значения которых связаны матрицей, ненулевые элементы которой зависят только от коэффициента $q = h_j/h_{j-1}$ [71].

В настоящее время успешно используются разные стратегии изменения порядка и шага методов интегрирования. В соответствии с одной из них выбор шага осуществляют по формуле

$$h = \left[\frac{E_{\max}}{TC_{k+1} x^{(k+1)}(t_n)} \right]^{1/k}, \quad (6.67)$$

получаемой на основании (6.66) и (6.65).

δ — допустимая относительная погрешность; i — номер компоненты вектора x .

Величина изменения шага ограничивается, как и раньше, коэффициентом $q = h_i/h_{i-1} \leq \sqrt[k+1]{4}$.

Описанная схема изменения порядка метода интегрирования и временного шага может выполняться каждый раз при изменении временного интервала. В ней, благодаря использованию разностей высших порядков, уменьшаются вычислительные ошибки и сокращаются затраты при определении коэффициентов формул прогноза (6.54) и алгебраизации (6.55). Кроме того, достигается высокая гибкость программ при изменении порядка алгоритма интегрирования. Благодаря легкости оценки локальных погрешностей алгоритмов интегрирования различных порядков данная стратегия позволяет свободно изменять порядок в пределах от 1-го до $(k + 1)$ -го на каждом временном шаге (а не через $(k + 1)$ шагов в пределах от $(k - 1)$ -го до $(k + 1)$ -го), что обеспечивает ее высокую экономичность по вычислительным затратам.

Для каждой предметной области ее конкретным задачам соответствуют оптимальные методы численного интегрирования, которые должны быть реализованы в соответствующей подсистеме инженерного анализа. Если решаемые задачи жесткие и нелинейные, что характерно для большинства случаев, то выбирать метод желательно среди рассмотренных в данном параграфе.

Особого внимания заслуживает новый релаксационный метод решения уравнений (6.36) большой размерности, позволяющий подобно методу Гаусса — Зейделя (6.15) осуществить декомпозицию решаемой системы нелинейных дифференциальных уравнений. В результате этого каждое уравнение системы решается индивидуально во временном интервале от $t = 0$ до $t = T$ [85].

Исходная система уравнений

$$\dot{x} = f(x, t), \quad x(0) = x_0$$

разделяется на отдельные уравнения ($i = 1, 2, \dots, n$):

$$\dot{x}_i = f_i(x_1^{m+1}, \dots, x_{i-1}^{m+1}, x_i^{m+1}, x_{i+1}^m, \dots, x_n^m, t), \quad (6.71)$$

в которых содержится по одной неизвестной переменной x_i^{m+1} , поскольку остальные к текущей итерации уже найдены.

Благодаря разреженности системы (6.36) для решения каждого уравнения требуется лишь небольшое число предварительно вычисленных переменных, значения которых хранятся в памяти машины. Уравнения (6.71) решаются различными методами с разными временными шагами, определяемыми свойствами этих уравнений (жесткие или нежесткие, описывают активные или неактивные логические фрагменты объекта), что способствует значительному повышению эффективности процесса решения.

Обычно при решении (6.71) итерации продолжают до тех пор, пока разность полученных значений переменных на двух последующих итерациях не станет меньше заданной, т. е.

$$\varepsilon^{m+1} = \max_i \max_{\varphi} \|x^{m+1}(t) - x^m(t)\| \leq \varepsilon_{\text{доп}}$$

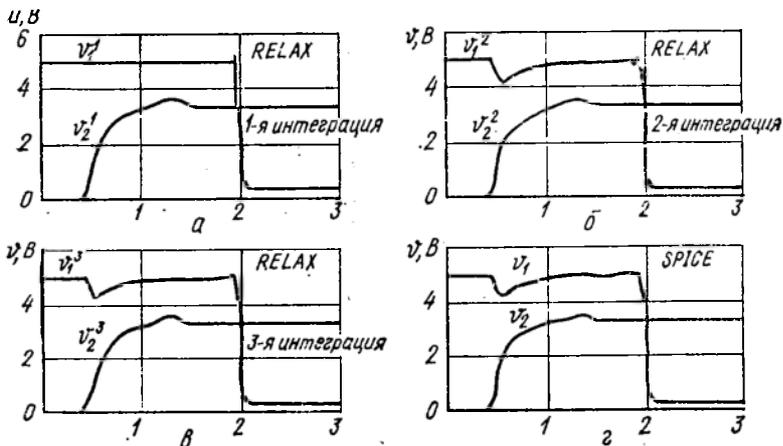


Рис. 36. Графики переходного процесса в сдвиговом регистре (a — после первой итерации; b — после второй, $в$ — после третьей, $г$ — выход программы SPICE).

N_1 , N_2 , N_3 с учетом дополнительных компонентов, имитирующих их взаимные нагрузки.

Таким образом, метод подсхем получил эффективную математическую формулировку, обеспечивающую его автоматическое применение без участия пользователя в отличие от его вариантов, сводящихся к промежуточному нахождению уравнений переменных связи подсхем (п. 5.2).

Рассматриваемый метод успешно реализован в программе RELAX для моделирования цифровых СБИС [85], выполненных по МОП-технологии. Анализ сходимости метода показал, что в данном случае сходимость гарантируется, если в каждом узле схемы имеется емкость, подключенная к общей шине. На рис. 36, a , b , $в$ приведены эпюры узловых напряжений электронной схемы, полученные на различных итерациях программой RELAX, и для сравнения решения той же задачи с помощью программы SPICE-2 (рис. 36, $г$), возможности которой подобны отечественной программе СПАРС.

Об эффективности релаксационного метода можно судить, исходя из следующего. Для временного анализа МОП-схемы с 131 транзисторами программе SPICE-2 требуется 818 с машинного времени VAX 11/780, программе RELAX — только 11,42 с, а для МОП-схемы с 263 транзисторами программе SPICE-2 необходимо 1334 с машинного времени, программе RELAX только 22 с при выполнении 4 итераций.

Знание особенностей и возможностей численных методов, используемых при моделировании, необходимы проектировщику для оптимального выбора параметров настройки исполнительных программ на решаемую задачу. Несмотря на то что обычно в моделирующем комплексе управляющие параметры программы настроены на наихудший случай, когда считаются практически все тестовые задачи, при исследовании объектов со сложной реакцией и с нетипичными сочетаниями переменных возможны случаи замедления процесса определения результатов, а в некоторых случаях и получение неправильных результатов. Опыт

7 ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

7.1. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Методы параметрической оптимизации имеют важное значение в процессе проектирования инженерных объектов, отвечающим заданным техническим требованиям. Степень соответствия реальной характеристики проектируемого объекта заданной определяется скалярной мерой ошибки, называемой целевой функцией (ЦФ). При этом оптимальным считается такое решение технической задачи, которое соответствует минимальному значению данной функции. В общем случае для описания объекта удобно использовать пространство его параметров R^n , где вектору параметров проектирования $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^t$ соответствует изображающая точка, и пространство его реакций или характеристик R^m , в котором вектор реакций $y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}^t$ отображает пространство параметров на пространство реакций, т. е. $y_i R^n \rightarrow R^m$. Процесс уменьшения скалярной целевой функции

$$\Phi \{y(x)\} = \Phi(x),$$

характеризующей эффективность проектирования от начального значения до минимума, называется оптимизацией. При этом может достигаться локальный минимум, если изображающая точка является лучшей среди соседних точек параметрического пространства, или глобальный оптимум, когда изображающая точка является действительно наилучшей среди широкого множества рассмотренных точек. В зависимости от задачи и типа модели объекта целевую функцию можно задавать по-разному, для чего в САПР предусматривается библиотека целевых функций, которой пользуется проектировщик.

Различают две задачи:

$$\Phi(x^*) = \min_x \Phi(x), \quad (7.1)$$

являющуюся задачей безусловной оптимизации, и

$$\left. \begin{aligned} \Phi(x^*) &= \min_x \Phi(x); \\ B(x, y) &= 0, \quad A(x, y) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

являющуюся задачей условной оптимизации с ограничениями, заданными алгебраическими уравнениями и неравенствами. Здесь A и B — векторные функции от вектора варьируемых параметров x и выходных характеристик y , например $B(x, y) = \{b_1(x, y), \dots, b_N(x, y)\}^t$; $b_i(x, y)$ — скалярная нелинейная функция вектора x , x^* — оптимальное значение вектора x .

Задачи проектирования являются многокритериальными, так как в них используются несколько частных целевых функций $\Phi_j(x)$, $j = 1, \dots, m$. Поскольку точки минимума отдельных ЦФ не совпадают, возможны лишь оптимально-компромиссные решения, или решения по Парето (п. 4.2). Если имеется априорная информация о важности

Если в задаче (7.6) ограничения учитываются с помощью функций штрафов, то условная минимаксная задача преобразуется в задачу безусловного минимакса.

Несмотря на кажущееся различие между двумя основными постановками многокритериальных задач параметрической оптимизации, они имеют много общего. Из сравнения (7.7) и (7.3) следует, что множители λ_j^* , $j = 1, \dots, m$ в (7.7) могут быть интерпретированы как весовые коэффициенты W_j , $j = 1, \dots, m$ для задачи (7.1). Следовательно, независимо от используемого подхода к решению задачи параметрической оптимизации характеристик проектируемого объекта инженер-проектировщик имеет возможность получить одни и те же оптимальные точки.

Однако методы решения задач (7.2) и (7.6) различны. Отыскание точек оптимума минимаксной экстремальной задачи по трудоемкости эквивалентны решению условной задачи оптимизации. Выбор той или иной математической формулировки конкретной задачи параметрической оптимизации проектируемого объекта зависит не только от индивидуальных особенностей самой задачи, опыта и степени информированности инженера-пользователя, но и от имеющихся в его распоряжении машинных процедур решения оптимизационных задач.

Существует большое количество численных методов поиска экстремумов многопараметрических функций, которые можно объединить в две большие группы: методы случайного поиска; регулярные методы.

Методы случайного поиска. Многие методы случайного поиска экстремума сводятся к построению последовательности $\{x^{(k)}\}$, определяемой соотношением

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda^{(k)} \xi^{(k)},$$

где $\lambda^{(k)}$ — некоторая положительная скалярная величина; $\xi^{(k)} = \{\xi_1^{(k)}, \dots, \xi_n^{(k)}\}$ — некоторая реализация n -мерного случайного вектора ξ . В качестве рабочего направления $\xi^{(k)}$ выбирается такое, чтобы выполнялось условие $\Phi(x^{(k+1)}) < \Phi(x^{(k)})$.

Методы случайного поиска возможно разделить на два подмножества: алгоритмы без обучения и алгоритмы с самообучением. К первым относятся методы, в которых область изменения вектора варьируемых параметров x , а также закон распределения случайного вектора ξ не зависят от номера шага поиска. Главным недостатком этих процедур является их неспособность отбирать лучшие, наиболее перспективные направления уменьшения $\Phi(x)$, медленная сходимость и большие затраты на поиск.

Алгоритмы с самообучением используют информацию, полученную на предыдущих шагах поиска, для выбора на текущем шаге наиболее вероятного направления уменьшения $\Phi(x)$. Примерами таких процедур являются алгоритмы покоординатного обучения; повторяющийся случайный поиск; случайный поиск с постоянным радиусом поиска с случайным направлением; случайный поиск с уменьшением интервала поиска. Эти алгоритмы более эффективны, чем методы случайного поиска без обучения, однако и те, и другие из-за фактора случайности при определении направления уменьшения $\Phi(x)$ характеризуются большими затратами на поиск.

мов строится последовательность точек $\{x^{(k)}\}$:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda^{(k)} S^{(k)}, \quad (7.8)$$

где $\lambda^{(k)}$ — некоторые скалярные коэффициенты; $S^{(k)}, k = 1, 2, \dots$ — сопряженные направления, т. е. такие, для которых справедливы соотношения

$$(S_j)^t AS_i = 0, \quad i \neq j;$$

$$(S_j)^t AS_i \geq 0, \quad i = j,$$

где A — некоторая положительно определенная квадратная матрица. Важное свойство сопряженных направлений заключается в возможности отыскания минимума некоторой квадратичной функции от параметров за число шагов, не превышающее n [12, 15, 34, 79]. На использовании свойств сопряженных направлений построены многие процедуры безусловной минимизации, и среди них такие эффективные, как методы сопряженных градиентов и квази-ньютоновские алгоритмы.

Для методов сопряженных направлений, не использующих производные ЦФ, характерно определение текущих направлений поиска $S^{(k)}$ только на основании имеющейся информации о поведении ЦФ. Примерами этой группы методов является алгоритм Пауэлла и алгоритм Розенбрука [12, 79].

Недостаток этих алгоритмов заключается в невозможности отыскания координат минимума «овражных» ЦФ, если овраг не ориентирован в одном из направлений поиска. Кроме этого, необходимость многократного решения задач одномерной минимизации, требующих, как правило, 10...30 оценок ЦФ, а также большая зависимость эффективности оптимизации от точности одномерного поиска, значительно снижает его практическую ценность.

Наиболее простыми методами, использующими производные ЦФ, являются градиентные алгоритмы, примером которых является метод наискорейшего спуска.

В основу этого метода, как и всей группы градиентных методов, положено свойство градиента, заключающееся в том, что направление наибольшего уменьшения ЦФ всегда противоположно направлению ее градиента. Для определения координат точки $x^{(k+1)}$, в которой выполняется условие $\Phi(x^{(k+1)}) < \Phi(x^{(k)})$, используют следующее соотношение:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda^{(k)} \Phi'(x^{(k)}), \quad (7.9)$$

где $\lambda^{(k)}$ — некоторый скалярный коэффициент. Параметр $\lambda^{(k)}$ определяет длину шага вдоль выбранного направления уменьшения $\Phi(x)$, поскольку значение градиента указывает только направление минимизации.

Существует много различных способов оценки величины $\lambda^{(k)}$, которые порождают модификации метода наискорейшего спуска, образующих группу градиентных алгоритмов. Наиболее часто предлагается оценивать значения $\lambda^{(k)}$ с помощью процедур одномерного

медленнее, чем некоторые квазиньютоновские методы, и по сравнению с ними менее надежны.

Квазиньютоновские методы аккумулируют все преимущества градиентных алгоритмов, методов сопряженных градиентов и ньютоновских методов.

Ньютоновские методы, в отличие от ранее описанных, основаны на квадратичной аппроксимации $\Phi(x)$. Так, с помощью метода Ньютона генерируется последовательность точек $\{x^{(k)}\}$, определяемая следующим соотношением:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - [\Phi''(x^{(k)})]^{-1} \Phi'(x^{(k)}),$$

где $\Phi''(x^{(k)})$ — матрица Гессе $\text{ЦФ } \Phi(x)$, вычисления в точке $x^{(k)}$.

Основное достоинство метода Ньютона — квадратичная скорость сходимости для класса сильно выпуклых ЦФ. Алгоритм Ньютона имеет очень узкую область сходимости и гарантирует отыскание точки оптимума $\Phi(x)$ лишь в тех случаях, когда начальная точка поиска $x^{(0)}$ расположена достаточно близко к x^* .

Этот недостаток возможно устранить, используя модифицированный метод Ньютона

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda^{(k)} [\Phi''(x^{(k)})]^{-1} \Phi'(x^{(k)}), \quad (7.10)$$

где

$$\lambda^{(k)} = \underset{\lambda}{\text{argmin}} \{ \Phi [x^{(k)} - \lambda^{(k)} (\Phi''(x^{(k)}))^{-1} \Phi'(x^{(k)})] \}.$$

Последовательность (7.10) так же, как и метод Ньютона, сходится для класса сильно выпуклых функций с квадратичной скоростью сходимости к точке оптимума x^* . Однако в этом случае начальная точка $x^{(0)}$ может быть выбрана независимо от положения x^* [79].

Недостатки ньютоновских методов заключаются в следующем. Основным критерием, гарантирующим сходимость ньютоновских методов поиска, является положительная определенность обратной матрицы Гессе $[\Phi''(x^{(k)})]^{-1}$ на каждом шаге минимизации $\Phi(x)$, т. е. $x^t [\Phi''(x^k)]^{-1} x > 0$ для всех ненулевых векторов x .

Для класса сильно выпуклых функций это выполняется всегда, и поэтому в этих случаях ньютоновские методы функционируют хорошо и сходятся достаточно быстро. Однако для функций общего вида условие положительной определенности $[\Phi''(x^{(k)})]^{-1}$ зачастую не удовлетворяется, что и является основной причиной расхождения ньютоновских методов.

Недостаток ньютоновских методов заключается в необходимости оценки значений вторых производных ЦФ для определения направления убывания $\Phi(x)$. Кроме того, применение (7.10) требует определения обратной матрицы Гессе или ее произведения на градиент ЦФ, что также является достаточно трудоемкой задачей. Необходимо учитывать, что существующие в настоящее время процедуры обращения матриц не гарантируют положительной определенности обратной матрицы, даже если исходная матрица была положительно определенной.

В целом же, как показывают результаты экспериментальных исследований, координаты точки оптимума для задач параметрической оптимизации с помощью ньютоновских методов удается получить лишь

1. Формирование траектории поиска минимума $\Phi(x)$ осуществляется не только на основе оценок $\Phi(x)$ и ее градиента, но также и при использовании сведений о значениях производных $\Phi(x)$ более высокого порядка.

2. Для каждого шага поиска осуществляется выбор оптимального значения порядка используемых производных ЦФ, при котором удастся получить наибольшее уменьшение $\Phi(x)$.

3. Процедура одномерного поиска используется для определения шага вдоль выбранного направления уменьшения $\Phi(x)$ только на некоторых шагах оптимизации. Причем в этих случаях, в зависимости от предыстории поиска, возможно применение двух стратегий одномерного поиска.

4. Порядок сходимости МПП-М определяется текущим значением порядка метода.

5. Вместо высших производных ЦФ (производных 2...4 порядков) используются их аппроксимации.

Рассмотрим основные этапы процедуры МПП-М. Для определения координат новой рабочей точки в МПП-М используется соотношение

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - h_s(\lambda), \quad (7.12)$$

где $h_s(\lambda)$ — векторный полином степени s от скалярной величины λ ; s — максимальный порядок используемых в (7.12) производных ЦФ (порядок метода). Вид полинома $h_s(\lambda)$ зависит от используемого значения порядка метода:

для $s = 1$

$$h_1(\lambda) = \lambda \Phi'(x^{(k)}); \quad (7.13)$$

для $s = 2$

$$\text{где} \quad h_2(\lambda) = \lambda d_2^{(k)}, \quad (7.14)$$

$$d_2^{(k)} = \eta^{(k)} \Phi''(x^{(k)}); \quad (7.15)$$

для $s = 3$

$$h_3(\lambda) = \frac{3}{2} d_2^{(k)} \lambda + (d_3^{(k)} - \frac{1}{2} d_2^{(k)}) \lambda^2, \quad (7.16)$$

где

$$d_3^{(k)} = \frac{1}{2} \eta^{(k)} \Phi'''(x^{(k)}) d_2^{(k)} d_2^{(k)}; \quad (7.17)$$

для $s = 4$

$$h_4(\lambda) = \frac{11}{6} d_2^{(k)} \lambda + (2d_3^{(k)} - d_2^{(k)}) \lambda^2 + (d_4^{(k)} + \frac{1}{6} d_2^{(k)} - d_3^{(k)}) \lambda^3, \quad (7.18)$$

где

$$d_4^{(k)} = \eta^{(k)} \{ \Phi'''(x^{(k)}) d_2^{(k)} d_2^{(k)} - \frac{1}{6} \Phi^{IV}(x^{(k)}) d_2^{(k)} d_2^{(k)} d_2^{(k)} \}. \quad (7.19)$$

Входящая в соотношения (7.15), (7.17) и (7.19) матрица η^k представляет собой аппроксимацию обратной матрицы Гессе ЦФ $[\Phi''(x^{(k)})]^{-1}$, вычисленную по формуле Флетчера [79]:

$$\eta^{(k)} = \left[I - \frac{\Delta x^{(k)} (\Delta g^{(k)})^t}{(\Delta x^{(k)})^t \Delta g^{(k)}} \right] \eta^{(k-1)} \left[I - \frac{\Delta g^{(k)} (\Delta x^{(k)})^t}{(\Delta x^{(k)})^t \Delta g^{(k)}} \right] + \frac{\Delta x^{(k)} (\Delta x^{(k)})^t}{(\Delta x^{(k)})^t \Delta g^{(k)}}, \quad (7.20)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta x^{(k)} &= x^{(k)} - x^{(k-1)}, \\ \Delta g^{(k)} &= \Phi'(x^{(k)}) - \Phi'(x^{(k-1)}). \end{aligned}$$

при

$$\Phi(x^{(k+1)}) \leq \Phi(x^{(k)}). \quad (7.26)$$

Переход к задаче (7.25) означает смещение акцентов при одномерном поиске от желания добиться максимального уменьшения ЦФ к стремлению обеспечить продвижение от точки $x^{(k)}$ до тех пор, пока выполняется условие (7.16).

Рассмотрим случай, когда некоторые составляющие вектора принимают большие значения (порядка $10^5 \dots 10^9$). При этом определенные с помощью процедур одномерного поиска приращения вектора $x^{(k)}$, как правило, не превышают значений $(0,01 \dots 0,001) x^{(k)}$. Поэтому в МПП-М осуществляется контроль текущих значений составляющих вектора $d_2^{(k)}$, и если

$$|\max_i d_{2i}^{(k)}| \geq \beta_{\max}, \quad (7.27)$$

где β_{\max} — максимально допустимые значения элементов вектора $d_2^{(k)}$, то на данном шаге оптимизации одномерный поиск не выполняется, а новые значения вектора варьируемых параметров определяются при помощи следующего выражения:

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - (0,01 - 0,001) x_i^{(k)} \text{SIGN}(d_{2i}^{(k)}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7.28)$$

Если же $s \neq 1$ и $\Phi(x^{(k)}) > \Phi(x^{(k)} - d_2^{(k)})$, то одномерный поиск не выполняется, а оптимальное значение λ полагается равным единице.

Таким образом, процедура одномерного поиска используется в МПП-М лишь на начальных шагах минимизации $\Phi(x)$.

Существенное влияние на эффективность любого алгоритма решения экстремальных задач оказывают используемые критерии контроля процесса локализации точки оптимума [11, 79]. В практической процедуре МПП-М используются следующие критерии окончания поиска оптимальных значений вектора x :

$$\begin{aligned} |\Phi(x^{(k)})| &\leq \varepsilon; \\ |\Phi(x^{(k)}) - \Phi(x^{(k-1)})| &\leq \varepsilon 1; \\ |\Phi_i(x^{(k)})| &\leq \varepsilon 2; \\ |x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}| &\leq \varepsilon 3, \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (7.29)$$

где ε — максимально допустимое значение ЦФ; $\varepsilon 1$ — минимально допустимое изменение ЦФ на каждом шаге; $\varepsilon 2$ — минимально допустимое значение составляющих градиента ЦФ; $\varepsilon 3$ — минимально допустимое изменение составляющих вектора варьируемых параметров.

Прекращение процесса поиска оптимума по условию (7.29) означает, что поставленная оптимизационная задача решена, поскольку получена точка $x^{(k)}$, в которой выбранный критерий качества $\Phi(x)$ меньше максимально допустимого. Останов по условиям (7.30) означает, что найден локальный оптимум ЦФ, хотя в целом задача оптимизации не решена.

Алгоритм МПП-М легко формализуется и позволяет построить высокоэффективную практическую процедуру решения экстремальных задач.

риальных экстремальных задач. Для минимизации функций $P(x, \Phi^{(k)})$ можно использовать любой эффективный метод решения задач нелинейного программирования (например, процедуру метода переменного порядка). Среди недостатков необходимо отметить сложность априорного задания удачного начального значения базисного уровня $\Phi^{(0)}$ (величина $\Phi^{(0)}$ автоматически полагается равной нулю или задается пользователем в файле задания) и невысокую скорость сходимости. На практике для ускорения продвижения к точке минимаксного оптимума при определении текущего значения плавающего базисного уровня вместо соотношения (7.33) используется выражение

$$\Phi^{(k+1)} = \Phi^{(k)} + P(x^{(k)}, \Phi^{(k)}) / \sum_{i=1}^m K_i (\Phi_i(x^{(k)}) - \Phi^{(k)}). \quad (7.35)$$

В этом случае скорость сходимости алгоритма увеличивается, но появляется опасность проскакивания точки экстремума, т. е. возможно появление ситуации, когда на очередном шаге поиска полученное с помощью (7.35) значение $\Phi^{(k)}$ оказывается большим $\Phi(x^*)$, а иногда и $\Phi(x^{(0)})$. Для предотвращения подобных ситуаций в практическом алгоритме выбор текущего значения $\Phi^{(k+1)}$ осуществляется внутри специально выделенного диапазона допустимых значений плавающего базисного уровня. Верхняя граница этого диапазона допустимых значений $\Phi^{(i)}$ выбирается из условия $B_B = \Phi(x^{(0)})$ (например, $B_B = \min\{\Phi(x^{(0)}), \Phi(x^{(1)})\}$), а нижняя граница B_n является плавающей и представляет собой последовательность значений $\Phi^{(k+1)}$, определяемых с помощью соотношения (7.33). Тогда на каждом шаге поиска минимаксного экстремума текущее значение $\Phi^{(k+1)}$ оценивается по (7.33) и (7.35) (обозначим соответствующие значения $\Phi^{(k+1)}$ как M_n и M_B). Если $M_B < B_n$, то $\Phi^{(k+1)}$ полагается равным M_B , а в противном случае $\Phi^{(k+1)} = M_n$. Новое значение B_n принимается равным M_n .

Существенное влияние на эффективность работы данного алгоритма оказывает выбор критериев контроля процесса локализации точки оптимума. Например, решение считается найденным, а поиск минимаксного оптимума законченным, если

$$|\Phi(x^*)| \leq \varepsilon_n, \quad (7.36)$$

где ε_n — константа, характеризующая требуемую точность решения минимаксной задачи. Если условие (7.36) не выполняется, но

$$|P(x^{(k)}, \Phi^{(k)})| < \varepsilon, \quad (7.37)$$

$$(B_B^{(k)} - B_n^{(k)}) / B_B^{(k)} > \varepsilon_2, \quad (7.38)$$

где ε — минимально допустимая величина $P(x, \Phi)$; ε_2 — минимально допустимое значение относительной величины разности между верхней и нижней границами изменения Φ , то ужесточают требования к минимизации функции $P(x, \Phi)$:

$$\varepsilon = \varepsilon/100, \quad \Phi^{(k+1)} = B_n, \quad B_n = \Phi^{(k)}$$

4. Ограничения на варьируемые параметры и выходные характеристики учитываются в каждом из частных критериев качества с помощью соответствующих функций.

Для определения координат новой рабочей точки $x^{(k+1)}$ в АПВАФ используются традиционные соотношения:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}. \quad (7.41)$$

Если множество активных функций определено и выбрана величина желаемого уменьшения $\delta^{(k)}$ функции $\Phi(x^{(k)})$ на k -м шаге поиска оптимума, то, используя линеаризацию активных функций в окрестности точки $x^{(k)}$, можно определить требуемое значение $\Delta x^{(k)}$ как решение системы уравнений:

$$F(x^{(k)}) + J(x^{(k)}) \Delta x^{(k)} = E^{(k)}, \quad (7.42)$$

где $F(x^{(k)})$ — вектор значений активных функций в точке $x^{(k)}$; $J(x^{(k)})$ — матрица Якоби активных функций в точке $x^{(k)}$; $E^{(k)}$ — вектор, размерность которого определяется количеством активных функций, а отдельные составляющие равны $\Phi_i(x^{(k)}) - \delta^{(k)}$.

Поскольку в общем случае количество активных функций не равно числу варьируемых параметров, систему (7.42) преобразуют в систему уравнений

$$J^t(x^{(k)}) J(x^{(k)}) \Delta x^{(k)} = J^t(x^{(k)}) [E^{(k)} - F(x^{(k)})], \quad (7.43)$$

которую в дальнейшем решают относительно $\Delta x^{(k)}$.

Рассмотрим случай, когда множество активных функций на k -м шаге поиска оптимума включает только одну функцию качества, например $\Phi_i(x^{(k)})$. В этих случаях в АПВАФ величина приращения $\Delta x^{(k)}$ оценивается с помощью соотношения

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\delta^{(k)} \Phi_i'(x^{(k)})}{\|\Phi_i'(x^{(k)})\|}. \quad (7.44)$$

Выражение (7.44) получают при условии, если все активные функции на k -м шаге оптимизации заменяются их линейными аппроксимациями:

$$\Phi_i(x^{(k+1)}) = \Phi_i(x^{(k)}) + \Phi_i'(x^{(k)}) \Delta x^{(k)}. \quad (7.45)$$

На практике часты случаи, когда вычисленные с помощью соотношения (7.43) или (7.44) значения составляющих вектора $\Delta x^{(k)}$ значительно превышают составляющие вектора $x^{(k)}$. Это, как правило, приводит к росту числа шагов, на которых не выполняется условие $\Phi(x^{(k+1)}) < \Phi(x^{(k)})$, что значительно увеличивает суммарные вычислительные затраты на оптимизацию. Поэтому в АПВАФ с целью сокращения количества шагов, не приводящих к уменьшению $\Phi(x^{(k)})$, выполняется контроль значений составляющих $\Delta x^{(k)}$, и если не выполняется условие

$$\Delta x_i^{(k)} < 0,75x_i^{(k)}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7.46)$$

то результат отбрасывается, модифицируется величина $\delta^{(k)}$ и шаг повторяется.

$\hat{r}_i(x^{(k)}) > 0$, повторяется описанная ранее последовательность вычислений, в результате которых еще одна из функций $\Phi_i(x^{(k)})$, $i = 1, \dots, s$, $i \notin L$ заключается во множество активных функций $L(x^{(k)})$.

Такие итерации повторяются до тех пор, пока для всех функций $\Phi_i(x^{(k)})$, не включенных во множество активных $L(x^{(k)})$, не будет выполняться условие

$$\hat{r}_i(x^{(k)}) \leq 0, \quad i \notin L(x^{(k)}), \quad i = 1, \dots, s \quad (7.53)$$

или пока число активных функций l не превысит количество варьируемых параметров n . В последнем случае модифицируется величина желаемого уменьшения минимаксной целевой функции:

$$\delta^{(k)} = \xi \delta^{(k-1)}, \quad \xi < 1, \quad (7.54)$$

(на практике используется $\xi = 0,75$), выбранные ранее активные функции удаляются из множества активных, и процесс повторяется сначала.

Эффективность алгоритма минимаксной оптимизации с пошаговым выбором активных функций, успешность и трудоемкость получения оптимальной точки x^* во многом определяется стратегией выбора величины желаемого уменьшения ошибки $\delta^{(k)}$. В АПВАФ значение $\delta^{(k)}$ выбирается на основе сопоставления величины $\delta^{(k-1)}$ и действительного уменьшения минимаксной ошибки $\Delta\Phi^{(k)} = \Phi(x^{(k-1)}) - \Phi(x^{(k)})$. При этом, если $\Delta\Phi^{(k)} > 0$, то значение оценивается следующим образом:

$$\delta^{(k)} = \begin{cases} 0,5\delta^{(k-1)}, & \text{если } \Delta\Phi^{(k)} \leq 0,4\delta^{(k-1)}; \\ 2\delta^{(k-1)}, & \text{если } \Delta\Phi^{(k)} \geq 0,9\delta^{(k-1)}; \\ 3\Delta\Phi^{(k)} - 0,7\delta^{(k)}, & \text{если } 0,4\delta^{(k-1)} < \Delta\Phi^{(k)} < 0,9\delta^{(k-1)}. \end{cases} \quad (7.55)$$

Использование выражений (7.55) при практических расчетах во всех случаях позволяло достаточно точно предсказывать поведение минимаксной функции $\Phi(x)$ и тем самым уменьшить вероятность появления неудачных шагов.

Если же $\Delta\Phi^{(k-1)} < 0$, то шаг считается неудачным и отбрасывается, значение $\delta^{(k)}$ модифицируется согласно (7.47), и шаг повторяется.

Локализация точки оптимума выполняется, как и в предыдущем случае, с помощью критериев, аналогичных критериям (7.30) и (7.39).

7.2. ПОДСИСТЕМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим функционирование подсистемы параметрической оптимизации на примере блока оптимизации системы проектирования аналоговых радиоэлектронных схем СПАРС [47].

Блок оптимизации СПАРС состоит из двух функционально обособленных модулей, предназначенных для решения экстремальных задач в частотной и временной областях. Каждый из них состоит из головной подпрограммы и библиотеки подпрограмм решения экстре-

риальных экстремальных задач. Для минимизации функций $P(x, \Phi^{(k)})$ можно использовать любой эффективный метод решения задач нелинейного программирования (например, процедуру метода переменного порядка). Среди недостатков необходимо отметить сложность априорного задания удачного начального значения базисного уровня $\Phi^{(0)}$ (величина $\Phi^{(0)}$ автоматически полагается равной нулю или задается пользователем в файле задания) и невысокую скорость сходимости. На практике для ускорения продвижения к точке минимаксного оптимума при определении текущего значения плавающего базисного уровня вместо соотношения (7.33) используется выражение

$$\Phi^{(k+1)} = \Phi^{(k)} + P(x^{(k)}, \Phi^{(k)}) / \sum_{i=1}^m K_i (\Phi_i(x^{(k)}) - \Phi^{(k)}). \quad (7.35)$$

В этом случае скорость сходимости алгоритма увеличивается, но появляется опасность проскакивания точки экстремума, т. е. возможно появление ситуации, когда на очередном шаге поиска полученное с помощью (7.35) значение $\Phi^{(k)}$ оказывается большим $\Phi(x^*)$, а иногда и $\Phi(x^{(0)})$. Для предотвращения подобных ситуаций в практическом алгоритме выбор текущего значения $\Phi^{(k+1)}$ осуществляется внутри специально выделенного диапазона допустимых значений плавающего базисного уровня. Верхняя граница этого диапазона допустимых значений $\Phi^{(k)}$ выбирается из условия $B_B = \Phi(x^{(0)})$ (например, $B_B = \min\{\Phi(x^{(0)}), \Phi(x^{(1)})\}$), а нижняя граница B_n является плавающей и представляет собой последовательность значений $\Phi^{(k+1)}$, определяемых с помощью соотношения (7.33). Тогда на каждом шаге поиска минимаксного экстремума текущее значение $\Phi^{(k+1)}$ оценивается по (7.33) и (7.35) (обозначим соответствующие значения $\Phi^{(k+1)}$ как M_n и M_B). Если $M_B < B_B$, то $\Phi^{(k+1)}$ полагается равным M_B , а в противном случае $\Phi^{(k+1)} = M_n$. Новое значение B_n принимается равным M_n .

Существенное влияние на эффективность работы данного алгоритма оказывает выбор критериев контроля процесса локализации точки оптимума. Например, решение считается найденным, а поиск минимаксного оптимума законченным, если

$$|\Phi(x^*)| \leq \varepsilon_n, \quad (7.36)$$

где ε_n — константа, характеризующая требуемую точность решения минимаксной задачи. Если условие (7.36) не выполняется, но

$$|P(x^{(k)}, \Phi^{(k)})| < \varepsilon, \quad (7.37)$$

$$(B_B^{(k)} - B_n^{(k)})/B_B^{(k)} > \varepsilon_2, \quad (7.38)$$

где ε — минимально допустимая величина $P(x, \Phi)$; ε_2 — минимально допустимое значение относительной величины разности между верхней и нижней границами изменения Φ , то ужесточают требования к минимизации функции $P(x, \Phi)$:

$$\varepsilon = \varepsilon/100, \quad \Phi^{(k+1)} = B_n, \quad B_B = \Phi^{(k)}$$

4. Ограничения на варьируемые параметры и выходные характеристики учитываются в каждом из частных критериев качества с помощью соответствующих функций.

Для определения координат новой рабочей точки $x^{(k+1)}$ в АПВАФ используются традиционные соотношения:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}. \quad (7.41)$$

Если множество активных функций определено и выбрана величина желаемого уменьшения $\delta^{(k)}$ функции $\Phi(x^{(k)})$ на k -м шаге поиска оптимума, то, используя линеаризацию активных функций в окрестности точки $x^{(k)}$, можно определить требуемое значение $\Delta x^{(k)}$ как решение системы уравнений:

$$F(x^{(k)}) + J(x^{(k)}) \Delta x^{(k)} = E^{(k)}, \quad (7.42)$$

где $F(x^{(k)})$ — вектор значений активных функций в точке $x^{(k)}$; $J(x^{(k)})$ — матрица Якоби активных функций в точке $x^{(k)}$; $E^{(k)}$ — вектор, размерность которого определяется количеством активных функций, а отдельные составляющие равны $\Phi_i(x^{(k)}) - \delta^{(k)}$.

Поскольку в общем случае количество активных функций не равно числу варьируемых параметров, систему (7.42) преобразуют в систему уравнений

$$J^t(x^{(k)}) J(x^{(k)}) \Delta x^{(k)} = J^t(x^{(k)}) [E^{(k)} - F(x^{(k)})], \quad (7.43)$$

которую в дальнейшем решают относительно $\Delta x^{(k)}$.

Рассмотрим случай, когда множество активных функций на k -м шаге поиска оптимума включает только одну функцию качества, например $\Phi_i(x^{(k)})$. В этих случаях в АПВАФ величина приращения $\Delta x^{(k)}$ оценивается с помощью соотношения

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\delta^{(k)} \Phi'_i(x^{(k)})}{\|\Phi'_i(x^{(k)})\|}. \quad (7.44)$$

Выражение (7.44) получают при условии, если все активные функции на k -м шаге оптимизации заменяются их линейными аппроксимациями:

$$\Phi_i(x^{(k+1)}) = \Phi_i(x^{(k)}) + \Phi'_i(x^{(k)}) \Delta x^{(k)}. \quad (7.45)$$

На практике часты случаи, когда вычисленные с помощью соотношения (7.43) или (7.44) значения составляющих вектора $\Delta x^{(k)}$ значительно превышают составляющие вектора $x^{(k)}$. Это, как правило, приводит к росту числа шагов, на которых не выполняется условие $\Phi(x^{(k+1)}) < \Phi(x^{(k)})$, что значительно увеличивает суммарные вычислительные затраты на оптимизацию. Поэтому в АПВАФ с целью сокращения количества шагов, не приводящих к уменьшению $\Phi(x^{(k)})$, выполняется контроль значений составляющих $\Delta x^{(k)}$, и если не выполняется условие

$$\Delta x_i^{(k)} < 0,75x_i^{(k)}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7.46)$$

то результат отбрасывается, модифицируется величина $\delta^{(k)}$ и шаг повторяется.

$\hat{r}_i(x^{(k)}) > 0$, повторяется описанная ранее последовательность вычислений, в результате которых еще одна из функций $\Phi_i(x^{(k)})$, $i = 1, \dots, s$, $i \notin L$ заключается во множество активных функций $L(x^{(k)})$.

Такие итерации повторяются до тех пор, пока для всех функций $\Phi_i(x^{(k)})$, не включенных во множество активных $L(x^{(k)})$, не будет выполняться условие

$$\hat{r}_i(x^{(k)}) \leq 0, \quad i \notin L(x^{(k)}), \quad i = 1, \dots, s \quad (7.53)$$

или пока число активных функций l не превысит количество варьируемых параметров n . В последнем случае модифицируется величина желаемого уменьшения минимаксной целевой функции:

$$\delta^{(k)} = \xi \delta^{(k-1)}, \quad \xi < 1, \quad (7.54)$$

(на практике используется $\xi = 0,75$), выбранные ранее активные функции удаляются из множества активных, и процесс повторяется сначала.

Эффективность алгоритма минимаксной оптимизации с пошаговым выбором активных функций, успешность и трудоемкость получения оптимальной точки x^* во многом определяется стратегией выбора величины желаемого уменьшения ошибки $\delta^{(k)}$. В АПВАФ значение $\delta^{(k)}$ выбирается на основе сопоставления величины $\delta^{(k-1)}$ и действительного уменьшения минимаксной ошибки $\Delta\Phi^{(k)} = \Phi(x^{(k-1)}) - \Phi(x^{(k)})$. При этом, если $\Delta\Phi^{(k)} > 0$, то значение оценивается следующим образом:

$$\delta^{(k)} = \begin{cases} 0,5\delta^{(k-1)}, & \text{если } \Delta\Phi^{(k)} \leq 0,4\delta^{(k-1)}; \\ 2\delta^{(k-1)}, & \text{если } \Delta\Phi^{(k)} \geq 0,9\delta^{(k-1)}; \\ 3\Delta\Phi^{(k)} - 0,7\delta^{(k)}, & \text{если } 0,4\delta^{(k-1)} < \Delta\Phi^{(k)} < 0,9\delta^{(k-1)}. \end{cases} \quad (7.55)$$

Использование выражений (7.55) при практических расчетах во всех случаях позволяло достаточно точно предсказывать поведение минимаксной функции $\Phi(x)$ и тем самым уменьшить вероятность появления неудачных шагов.

Если же $\Delta\Phi^{(k-1)} < 0$, то шаг считается неудачным и отбрасывается, значение $\delta^{(k)}$ модифицируется согласно (7.47), и шаг повторяется.

Локализация точки оптимума выполняется, как и в предыдущем случае, с помощью критериев, аналогичных критериям (7.30) и (7.39).

7.2. ПОДСИСТЕМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим функционирование подсистемы параметрической оптимизации на примере блока оптимизации системы проектирования аналоговых радиоэлектронных схем СПАРС [47].

Блок оптимизации СПАРС состоит из двух функционально обособленных модулей, предназначенных для решения экстремальных задач в частотной и временной областях. Каждый из них состоит из головной подпрограммы и библиотеки подпрограмм решения экстре-

присущий процедуре МПП-М объем вычислительных затрат практически не зависит от точности одномерного поиска.

Понижение точности одномерного поиска ($\epsilon_0 \geq 0,1$) приводит чаще всего к некоторому уменьшению требуемого количества оценок ЦФ, хотя количество шагов поиска при этом возрастает. Однако в некоторых случаях при малой точности одномерного поиска может происходить как резкое увеличение количества шагов оптимизации, так и числа оценок ЦФ на них. Увеличение точности одномерного поиска ($\epsilon_0 \leq 10^{-5}$) несущественно сказывается на количестве шагов поиска, но число оценок $\Phi(x)$ на каждом из них несколько возрастает.

В настоящее время предложено большое количество постановок задач оптимизации электронных схем. Поскольку создать программные средства, позволяющие решать любые экстремальные задачи, практически невозможно, блок оптимизации СПАРС ориентирован на более типичные и часто встречающиеся виды экстремальных задач.

С помощью существующих в настоящее время версий СПАРС можно решать детерминированные одно- и многокритериальные задачи параметрической оптимизации, в которых не требуется учет статистических свойств выходных характеристик объектов проектирования и их варьируемых параметров, причем критерий оптимальности представляется в виде некоторой функциональной зависимости (целевой функции).

При решении задач оптимизации технических объектов разной физической природы с помощью СПАРС в качестве оптимизируемых могут выступать различные характеристики линейных и нелинейных объектов: в статическом режиме — разностная переменная в узлах структурной схемы объекта, потоковые и разностные переменные на отдельных элементах объекта, а также их произведения (мощности), в частотной области — АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и другие характеристики требуемой передаточной функции, а также их параметры, определяемые с помощью директив $\langle FFI\bar{X}$ и $\langle FINT$ (полоса пропускания, резонансная частота, максимум и минимум коэффициента передачи и т. д.), во временной области — различные параметры характеристик объектов (потоковых и разностных переменных, мощностей, узловых переменных), задаваемые с помощью директив $\langle FFI\bar{X}$, $\langle FINT$ (крутизна фронта, длительность импульсов, время задержки, максимум или минимум и т. д.). На допустимые значения варьируемых параметров могут накладываться двусторонние ограничения следующего вида:

$$x_{ni} \leq x_i \leq x_{vi}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где x_{ni} и x_{vi} — нижние и верхние границы изменения варьируемых параметров. Такие ограничения, как правило, всегда наблюдаются при решении той или иной задачи оптимизации и выбираются либо на основе знаний о допустимых (желаемых) пределах изменения варьируемых элементов, либо на основе информации об особенностях функционирования проектируемой схемы. Учет этих ограничений в блоке оптимизации СПАРС производится с помощью функций вида:

$$\Phi_{шт} = \sum_{i=1}^n (x_{vi} - x_i)^2 \gamma_i + \sum_{i=1}^n \beta_i (x_i - x_{ni})^2,$$

3. Функцию контроля близости реальных и требуемых характеристик схемы:

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_i \psi_j (y_{ji}(x) - y_{ji}^*(x)). \quad (7.58)$$

4. Функцию контроля попадания значений выходных характеристик в зону допустимых величин:

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_i \psi_j [K(D_{ij}) (ABS(y_{ji}(x) - y_{ji}^*(x) - D_{ij}))]^2, \quad (7.59)$$

где D_{ij} — допуск на j -ю выходную характеристику в i -й точке оптимизации; $K(D_{ij})$ — штрафная функция, определяемая следующим образом:

$$K(D_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{если } ABS(y_{ji}(x) - y_{ji}^*(x)) > D_{ij}, \\ 0, & \text{если } ABS(y_{ji}(x) - y_{ji}^*(x)) < D_{ij}. \end{cases} \quad (7.60)$$

5. Минимаксную целевую функцию:

$$\Phi(x) = \max ABS(y_i(x) - y_i^*(x)). \quad (7.61)$$

Выбор вида функции качества определяется особенностями решаемой задачи оптимизации и, как правило, не является однозначным. Например, при решении задачи обеспечения заданного вида АЧХ можно использовать одну из целевых функций вида (7.56) ... (7.60).

Конкретный вид целевой функции накладывает определенные ограничения на возможность использования для решения задачи методов оптимизации. Например, применение методов типа наименьших квадратов возможно только в случае, когда целевая функция имеет вид (7.56), а применение целевой функции типа (7.61) целесообразно только при наличии минимаксных методов оптимизации. Естественно, что существующий базовый набор целевых функций нельзя рассматривать как законченный. Поскольку СПАРС ориентирована на проектирование разнообразных технических объектов, пополнение библиотеки целевых функций пользователь выполняет самостоятельно. При этом используется формальная методика пополнения библиотек целевых функций, предусматривающая три этапа:

1. Правильное описание целевой функции на языке управления заданиями СПАРС (указание номера целевой функции и взаимного расположения параметров и аргументов).

2. Занесение необходимой информации о новой целевой функции в подпрограммы обработки целевых функций пользователя (USEFUN или USFUNT) на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV.

3. Занесение информации о производных целевой функции по варьируемым параметрам в подпрограмму вычисления градиента целевой функции пользователя (USEDX) на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV.

Последняя задача решается при оптимизации частотных характеристик объекта и только в том случае, когда возможна точная оценка составляющих градиента целевой функции по предварительно построенному символично-операторному выражению коэффициента передачи.

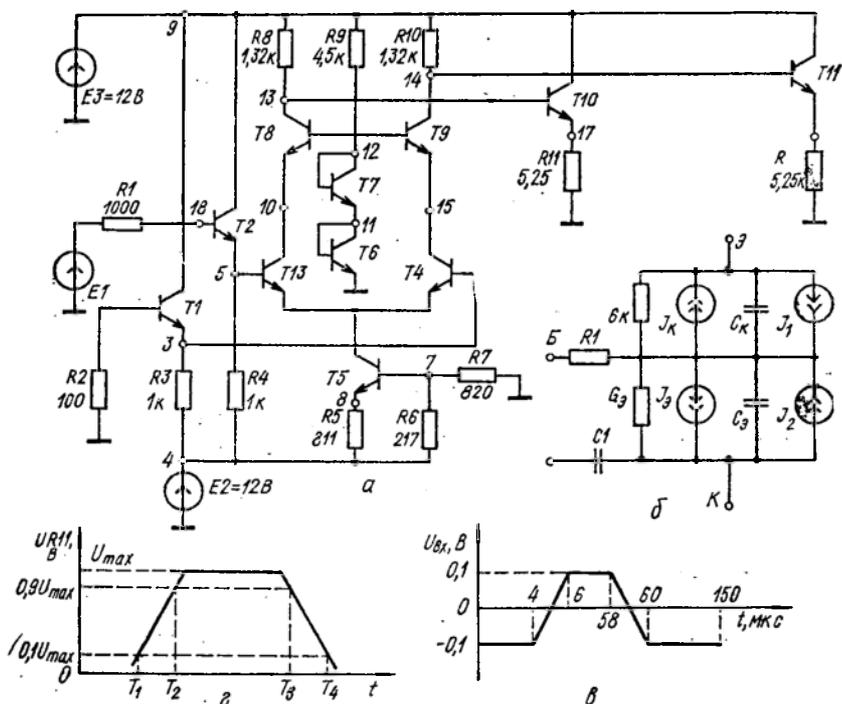


Рис. 37. Схема операционного усилителя (а), схема замещения транзистора (б), элюмы входного (в) и выходного (г) сигналов усилителя.

ный анализ с построением символично-операторных выражений требуемых передаточных функций.

Режим работы блока оптимизации СПАРС, выбор конкретной процедуры решения экстремальных задач, настройка пакета программ при введении новых целевых функций, задание продолжительности моделирования и диапазона исследуемых частот, точности отыскания оптимума и другие характеристики определяются значениями соответствующих программных переменных, доступ к которым обеспечивается через директиву `<RUN` языка управления заданиями. Возможность управления программными переменными позволяет наилучшим образом адаптировать программные ресурсы к решению конкретных задач.

Рассмотрим использование входного языка СПАРС для составления заданий на оптимизационные процедуры. Для операционного усилителя (рис. 37, а) с учетом схемы замещения транзисторов (рис. 37, б), в которой

$$J_k = 10^{-11} (e^{40U_{Jk}} - 1), \quad J_9 = 1,1 \cdot 10^{-11} (e^{40U_{J9}} - 1),$$

$$C_9 = 2,2 \cdot 10^{-9} e^{40U_{C9}} + 1,5; \quad C_k = 4 \cdot 10^{-11} e^{40U_{Ck}} + 0,9; \quad G_k = G_9 = 0,$$

требуется получить заданные длительности переднего ДЛПЕРФ = = 25,34 мкс и заднего ДЛЗОДФ = 21,55 мкс фронтов импульса напряжения на сопротивлении R_{11} . При этом амплитуда должна составлять 10 В при воздействии на схему операционного усилителя трапе-

8 ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В САПР

8.1. ФУНКЦИИ И СТРУКТУРА СИСТЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Одной из важных сфер применения вычислительной техники для автоматизации проектно-конструкторских работ в машино- и приборостроении является решение задач, связанных с определением формы и положения деталей и узлов машины в пространстве. Это направление называют геометрическим моделированием с помощью ЭВМ.

Геометрические задачи — наиболее значительная часть проектных работ. Например, моделирование сборочных операций часто сводится к решению позиционных задач начертательной геометрии. Другой класс задач проектирования сопровождается вычислениями метрических характеристик объектов — площадей, объемов, моментов инерции, центров тяжести и т. д., т. е. тех характеристик, которые определяются формой объектов.

Геометрическая информация связана с технологической подготовкой производства, включающей проектирование технологических процессов, оснастки и подготовку заданий для оборудования с программным управлением. В частности, при разработке программ для роботов существенную роль играет геометрическая информация и методы геометрического моделирования рабочего пространства робота.

Для создания развитой системы геометрического моделирования на базе ЭВМ необходимо решить сложные задачи. Среди них — выбор адекватных математических моделей, способов задания исходных данных, разработка внутреннего представления геометрической информации в памяти ЭВМ с минимизацией объемно-временных характеристик ЭВМ.

Особую роль в системе играют алгоритмы, языки и процедуры графического отображения объектов с помощью средств машинной графики.

Теоретической основой использования ЭВМ для геометрического моделирования является существование изоморфизма между алгеброй, оперирующей числами, и геометрией, объектами которой являются точки. Аппарат алгебры используют для моделирования геометрических построений на основе реализации модели движения точки в пространстве как простейшей операции геометрии с установлением взаимнооднозначного соответствия между предыдущими и последующими положениями.

Операция движения точки положена в основу не только алгоритмов выполнения геометрических построений в числовой форме в памяти ЭВМ. Эта же операция лежит в основе функционирования разнообразных средств машинной графики, в которых специальные устройства по указанию человека либо по программе ЭВМ осуществляют движение изображающей точки в рабочей плоскости, фиксируя при этом требу-

Эти поверхности являются наиболее трудоемкими для проектирования, поскольку требуют предварительного задания геометрической информации в форме каркаса, затем построения математической модели и отработки качества формы для наиболее полного удовлетворения физическим условиям функционирования изделия.

Применительно к созданию систем геометрического моделирования для каждого из этих классов объектов существует большое количество специфических задач геометрического, вычислительного и информационного характера. Отметим некоторые из них, имеющие общий характер:

1. Выбор адекватной математической модели или ограниченного набора моделей для представления основных свойств данного класса геометрических объектов, причем важно соответствие двум требованиям: модель должна быть способной генерировать любую форму объекта из заданного класса или подкласса, т. е. обладать свойством универсальности; допускать преобразования внутри ЭВМ для обеспечения эффективности обработки геометрических данных на различных этапах процесса проектирования в САПР, включая этап ввода геометрических данных, решения геометрических задач и преобразования результатов в графическую форму с помощью соответствующих внешних устройств ЭВМ.

2. Выбор метода и средств внутреннего представления моделей геометрических объектов в памяти ЭВМ. Класс моделей, который здесь используется, называется информационным. Эти модели ориентированы на удобство формирования, хранения, поиска и выдачи информации об объекте по запросам прикладных программ, внешних устройств и конструктора. Одну и ту же модель проектируемого объекта можно представлять в форме различных информационных структур.

3. Разработка специализированных языков, ориентированных на задачи геометрического моделирования и пользователя САПР, не являющегося профессионалом в области программирования. Поэтому такой язык должен предоставлять конструктору возможность выразить то, что должна сделать ЭВМ по его замыслу, нежели требовать от него детального описания того, как это ей делать.

4. Создание системы геометрических расчетов, инвариантной относительно внешних математических моделей геометрических объектов. Такая система должна базироваться на едином унифицированном пространственном описании геометрии объектов внутри системы и, следовательно, иметь средства преобразования многообразия геометрических моделей к единой внутренней модели. Структура данных такой модели должна обеспечивать эффективное функционирование прикладных программ, имеющих дело с геометрическими построениями и расчетами вплоть до вывода информации на станки с ЧПУ.

ЭВМ может служить средством прямого отображения проектируемого объекта как в форме чертежей и спецификаций, так и в форме описания его как физического трехмерного тела. Таким образом, процесс проектирования стал целенаправленным — в памяти ЭВМ должна быть построена цифровая модель проектируемого геометрического объекта, удовлетворяющего условиям задачи проектирования, с возможностью последующего отображения его в различных проек-

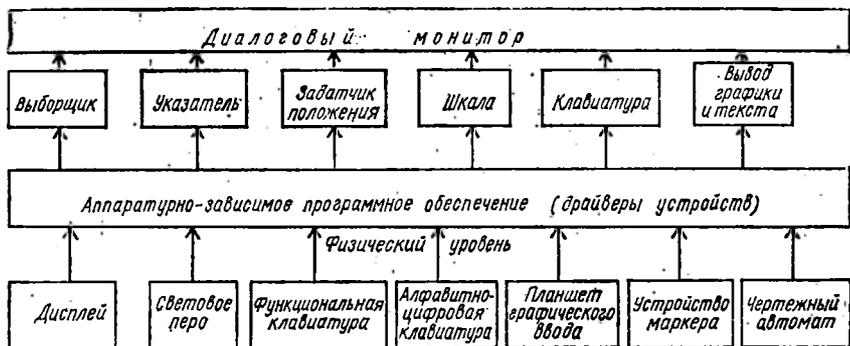


Рис. 39. Структура диалоговой системы с графическими устройствами различного типа.

дартную форму, практически независимую от конкретных типов используемых технических средств. Это достигается разделением программного обеспечения на два уровня: физический, содержащий аппаратурно-зависимое программное обеспечение, и логический, программы которого оперируют с обобщенными, так называемыми логическими устройствами. Выделено шесть типовых логических устройств, с помощью которых конструктор вводит данные и команды, а также одно устройство ввода сообщений системы (рис. 39).

- *Выборщик* преобразует сообщение конструктора в имя выбранного из заданного множества элемента. Это логическое устройство реализуется физически в форме различного вида функциональных кнопок на экране, планшете или клавиатуре.
- *Указатель* преобразует действие конструктора в адрес указанного фрагмента цифровой модели изображения в памяти ЭВМ. Это действие обычно производится на экране дисплея с помощью маркера, светового пера или планшета.
- *Задатчик положения* осуществляет ввод в прикладную программу координат указанной точки. Для этого обычно используется планшет ввода графических данных.
- *Шкала* позволяет какой-либо переменной в прикладной программе присвоить величину реального типа.
- *Клавиатура* воспринимает и передает монитору последовательность вводимых символов (строку), содержащую команду или данные для диалоговой прикладной программы.
- *Вывод графики и текста*. Функция этого типа логического устройства состоит в выводе информации, описывающей цифровую модель изображения, на заданное физическое выводное устройство.

Логические устройства ввода могут быть реализованы с помощью различных физических устройств. Аналогично функции, выполняемые логическим устройством, могут выполняться другими типами логических устройств, что обеспечивает гибкость аппаратуры автоматизированного рабочего места конструктора. В табл. 16 показаны возможные способы реализации элементарных сообщений конструктора во время диалога с помощью различных логических устройств.

Выделение функций управления диалогом и реализация их в виде единого диалогового монитора как общесистемного средства позволяет

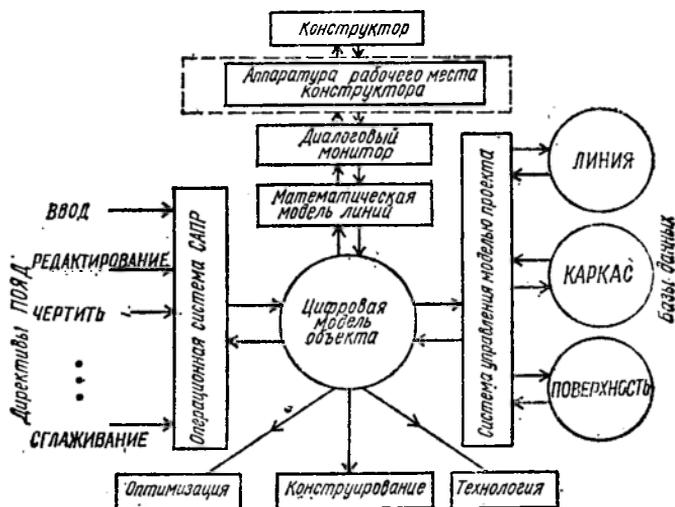


Рис. 40. Структурная схема САПР ГЕОМЕТРИЯ.

(ИТЕКАН-β); графический дисплей на ЭЛТ с регенерацией; чертежные автоматы ИТЕКАН-2 и ИТЕКАН-3.

Рабочий процесс в системе, структурная схема которой приведена на рис. 40, начинается с кодирования и ввода в рабочую область системы теоретических линий с теоретического чертежа, эскиза и др. В результате ввода в базе данных (БД) ЛИНИЯ создаются модели теоретических линий. Дальнейшее проектирование является, по существу, процессом преобразования базы данных ЛИНИЯ в базу данных КАРКАС (БД для согласованных теоретических линий), а затем — в базу данных ПОВЕРХНОСТЬ, в которой хранится модель сечения поверхности плоскостями.

Преобразование моделей объекта (баз данных) осуществляется с помощью директив, вводимых пользователем. Язык директив (п. 3.2) является, во-первых, проблемно-ориентированным языком и, во-вторых, — процедурно-ориентированным языком высокого уровня. Высокий уровень языка позволяет обходиться небольшим числом директив, каждая из которых обеспечивается программными средствами.

Основные функции операционной системы САПР ГЕОМЕТРИЯ следующие: управление процессом проектирования; контроль исходной информации и распределение памяти; взаимодействие пользователя с системой.

Операционная система САПР состоит из набора сервисных программ базовых массивов и управляющих программ, рассчитанных на конфигурацию системы, показанной на рис. 40.

Операционная система САПР представляет собой систему двухуровневого управления. Первый уровень предназначен для выполнения директив по получению запрограммированных проектных решений. Второй уровень организует вычислительный процесс, соответствующий введенной директиве, и предназначен для решения частной задачи.

Управление процессом проектирования во время функционирования системы осуществляется с помощью директив. Характерным для

8.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Объектами в системах геометрического моделирования являются точки, линии, поверхности и объемные тела. Представление этих объектов в форме тех или иных математических моделей позволяет решать в САПР следующие задачи:

с помощью ЭВМ синтезировать аналитические геометрические объекты с наперед заданными свойствами;

использовать весь арсенал численных методов для проведения математических экспериментов по выявлению и изучению многих свойств проектируемых объектов с помощью средств вычислительной техники еще до того, как они будут изготовлены в виде материальных объектов.

В автоматизированном проектировании применяется большое количество различных типов моделей. Выбор конкретной модели определяется теми проектными задачами, которые наиболее эффективно решаются с помощью данной модели. Однако с точки зрения разработчика системы геометрического моделирования в САПР важными являются такие формы проявления моделей геометрических объектов:

1. Внешняя форма (*A*-модель). Она представляет собой явную аналитическую запись уравнений и сопровождающих их условий или ограничений, которые позволяют составить четкий расчетный алгоритм определения произвольной точки данного объекта или элемента конкретного процесса математического или физического формообразования.

2. Языковая форма (*L*-модель). С помощью специальных языковых средств, ориентированных на данную модель, или группу родственных моделей, конструктор имеет возможность ввести в ЭВМ графические и семантические данные, которые будут интерпретированы машиной как описание геометрического объекта, соответствующего своей модели. Обычно с помощью этого же языка имеется возможность изменить форму и структуру моделируемого объекта.

3. Внутренняя форма (*D*-модель). Она служит средством внутреннего представления в памяти ЭВМ геометрического объекта, который во внешнем мире представлен моделью *A* и описан при вводе в ЭВМ языком *L*. Такую модель называют информационной, и она представляет выбранную структуру данных, полностью определяющих данный класс геометрических объектов. Этот вид моделей имеет большое значение в САПР, поскольку все множество прикладных программ, реализующих процессы автоматизированного проектирования и графического представления объектов, воспринимает эти объекты только как соответствующие структуры данных.

Таким образом, будем считать, что геометрический объект определен в САПР, если для него заданы

$$ГО = \langle A, L, D \rangle. \quad (8.1)$$

Существующие в настоящее время системы геометрического моделирования характеризуются разнообразием используемых аналитических моделей, семантикой и синтаксисом языков описания и манипулирова-

задания поверхностей: алгебраической и канонической. Алгебраический способ применяется для задания поверхности в памяти ЭВМ и основывается на форме записи выражения поверхности второго порядка в общем виде (A -модель):

$$a_1x^2 + 2a_2xy + a_3y^2 + 2a_4xz + 2a_5yx + a_6x^2 + 2a_7x + 2a_8y + 2a_9z + a_{10} = 0. \quad (8.5)$$

В этом случае поверхность в памяти ЭВМ описывается набором коэффициентов уравнения (8.5), а ориентация ее задается знаками коэффициента (D -модель). D -модель рассчитывается на основе введенных конструктором данных, конкретизирующих моделируемую поверхность.

Канонический способ применяется для задания геометрической модели параметрами, наиболее удобными для конструктора. При этом используются следующие аргументы:

a, b, c — координаты произвольной точки оси цилиндра, центра сферы и вершины конуса;

m, n, p — направляющие косинусы нормального вектора к плоскости, направляющие косинусы оси цилиндра или конуса;

r — радиус цилиндра или сферы;

φ — угол раствора конуса;

d — расстояние от начала координат до плоскости.

Внутренние модели наиболее распространенных поверхностей можно записать в виде:

плоскость — d, m, n, p ;

цилиндр — a, b, c, r, m, n, p ;

сфера — a, b, c, r ;

конус — $a, b, c, \varphi/2, m, n, p$.

По способу организации информации об отдельных поверхностях объекта и других его геометрических элементах в D -моделях выделяют два различных типа моделей: кусочно-аналитическую и алгебро-логическую.

В кусочно-аналитической модели объекта его поверхность рассматривается состоящей из отдельных участков кусочно-гладких поверхностей указанных ранее типов, называемых гранями объекта. Каждая грань объекта задается уравнением поверхности (носителем грани) и границей грани, рассматриваемой как пространственный ориентированный граф. Дуги графа являются ребрами объекта и лежат на линиях пересечения соседних носителей граней, являющихся носителями дуг (ребер). Границы дуги на ее носителе отмечаются вершинами.

В состав кусочно-аналитической модели объекта входит указанный пространственный направленный граф ребер объекта, задаваемый матрицей смежности вершин (МСВ). Каждый столбец этой матрицы соответствует ребру объекта либо двум дугам графа, проходящим через одни и те же точки пространства, но относящимся к двум смежным граням объекта. В столбце МСВ последовательно указываются: носитель первой грани; носитель второй грани; тип дуги (замкнутая кривая второго порядка, окружность, дуга кривой второго порядка, дуга окружности, отрезок прямой, пространственная кривая); начальная точка ребра; конечная точка ребра.

Часть границы объекта D , образованная границей области D_i , называется гранью объекта и обозначается Γ_i . Если $I(D, M) = 1$, то точка лежит внутри D ; если $I(D, M) = -1$, то M внешняя по отношению к D , если $I(D, M) = 0$, то M принадлежит границе объекта и, кроме того, индексы i, j, \dots, k указывают номера граней, которым точка инцидентна.

Рассмотренный аппарат является разновидностью трехзначного логического исчисления и называется трехзначным индексированным исчислением [19].

Пример. Решим задачу об инцидентности точки $(0, 0)$ для фигуры, изображенной на рис. 41, воспользовавшись ее логической функцией (8.8):

$$I(D, M) = 1 \wedge (O_2 \vee 1) \wedge O_4 \wedge O_5 = 1 \wedge 1 \wedge O_{4,5} = 1 \wedge O_{4,5} = O_{4,5},$$

т. е. точка принадлежит грани $R_{4,5}$.

Для решения таких задач, как получение сечений объекта, проекций, вычисление геометрических характеристик, удобнее кусочно-аналитическая модель. Поэтому практические модели объекта являются комбинацией рассмотренных ранее двух типов моделей. Комбинированная модель является избыточной, однако она позволяет значительно ускорить решение задач.

Примером реализации алгебро-логических и кусочно-аналитических методов для построения моделей является система ФАП-КФ (п. 3.2).

Имеется возможность на основе алгебро-логических моделей вида (8.8) формировать описание геометрического объекта одним уравнением, если для логических операций конъюнкции ($D_i \wedge D_j$), дизъюнкции ($D_k \vee D_s$) и отрицания (\bar{D}_j) воспользоваться их геометрическими эквивалентами, известными как R -функции [63]:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{1}{2}(x + y - \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha(x, y)xy}); \\ z_2 &= \frac{1}{2}(x + y + \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha(x, y)xy}); \\ z_3 &= -\varphi(x, y)x, \end{aligned} \right\} \quad (8.9)$$

где $\alpha(x, y)$ — функция с областью определения $\{-1, 1\}$ и $\varphi(x, y)$ — произвольная знакоположительная функция.

Полагая $\alpha(x, y) = \varphi(x, y) = 1$, преобразуем на основе R -функций неравенство

$$\bar{D}_1 \wedge (D_2 \vee D_3) \wedge D_4 \wedge D_5 \geq 0,$$

определяющее область D (рис. 41). Последовательно получаем:

$$D_2 \vee D_3 = \frac{1}{2}[a|2y - 2x - a|];$$

$$D_4 \wedge D_5 = \frac{1}{2}[x + y - |x - y|];$$

$$\begin{aligned} D^* &= (D_2 \vee D_3) \wedge (D_4 \wedge D_5) = \frac{1}{4}[a|2y - 2x - a| + x + y - \\ &\quad - |x - y| - |a + |2y - 2x - a| - x - y + |x - y||] = \\ &= \frac{1}{4}[a + x + y - |x - y| + |2y - 2x - a| - |a - x - y| + \\ &\quad + |x - y| + |2y - 2x - a|]; \end{aligned}$$

$$D = \bar{D}_1 \wedge D^* = \frac{1}{8}[5a + x - 3y - |x - y| + |2y - 2x - a| -$$

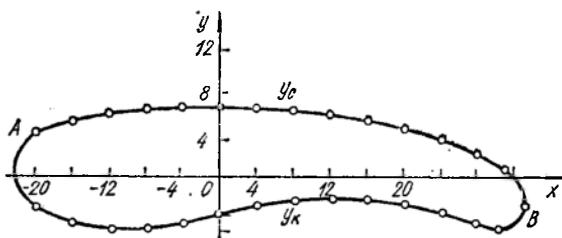


Рис. 44. Пример моделирования контура выпуклым полиномом.

где a_i — единичные векторы репера Френе; l_j — единичные векторы декартовой системы координат.

Величины a_i зависят от параметра t и вычисляются по известным формулам Серре — Френе [3].

Пусть через точку $M(x, y, z)$ направляющей проходит образующая линия, уравнение которой в подвижной системе координат репера имеет вид $\rho = \rho(u)$. При движении точки M по направляющей образующая опишет поверхность, уравнение которой

$$r(u, t) = A(t) \rho(u),$$

где A — матрица связей систем координат. Ее элементы вычисляются по формулам (8.10). Проиллюстрирован этот метод на рис. 42 в самом простом варианте. В более сложных случаях образующая может двигаться по нескольким направляющим, которые составляют линейный каркас. В этом случае метод называется каркасно-кинематическим. На рис. 43 показан пример моделирования этим методом. Теория метода разработана в монографии [46].

Остановимся на другой группе методов конструирования поверхностей. Эти методы связаны с понятием каркаса поверхности.

● *Дискретным каркасом поверхности* называется конечное множество точек, линий, принадлежащих поверхности. В некоторых точках или вдоль некоторых линий могут быть заданы радиусы кривизны, направления касательных и другие геометрические условия. Возникает задача, как по заданному дискретному каркасу получить уравнение поверхности. Решение этой задачи связано с вопросами интерполяции и аппроксимации функций. Заметим, что классические методы, основанные на применении формул Лагранжа, Ньютона и др., для этого не годятся, так как возрастание степени интерполяционного полинома приводит к волнистости поверхности моделируемого объекта. Можно, конечно, провести разбиение исходного множества точек и решить для каждого подмножества задачу интерполяции, но это приведет к появлению изломов, что также недопустимо. В реальных задачах точки обычно задаются с некоторыми погрешностями. Поэтому от кривой не требуется, чтобы она проходила через все заданные точки или даже через часть их. Требуется, чтобы она наилучшим образом приближала будущую поверхность к заданному точечному базису.

Для решения задачи задаются определенным видом моделирующей функции, например полиномом $y = P_n(x, a)$, где a — вектор параметров. Компоненты a определяются из условия минимума двух функционалов [76]. Функционал метрики характеризует отклонение точек базиса от моделируемой кривой. В качестве этого функционала можно использовать выражение квадратичного отклонения:

$$M = \sqrt{(y_j - P_n(a, x_j))^2}. \quad (8.11)$$

$\gamma_i(u)$, $\gamma_{i+1}(u)$, $r_j(v)$, $r_{j+1}(v)$ (рис. 45). Уравнение поверхности лоскута находят с помощью формулы

$$r(u, v) = F(t) \begin{pmatrix} 0 & \gamma_i(u) & \gamma_{i+1}(u) \\ r_j(v) & r_{i,j} & r_{i+1,j} \\ r_{j+1}(v) & r_{i,j+1} & r_{i+1,j+1} \end{pmatrix} F^t(v), \quad (8.14)$$

где

$$F(t) = [-1, F_0(t), F_1(t)]; \quad (t = u) \vee (t = v).$$

Функции F_0 и F_1 должны удовлетворять определенным условиям, получаемым из гладкости поверхности. Если на поверхности непрерывность нормали не требуется, то

$$\begin{aligned} F_0(0) &= 1, & F_1(0) &= 0, \\ F_0(1) &= 0, & F_1(1) &= 1. \end{aligned} \quad (8.15)$$

Если же требуется выполнение этого условия, то необходимо, чтобы

$$F'_1(0) = F'_0(1) = F'_1(0) = F'_1(1) = 0. \quad (8.16)$$

Для непрерывности радиусов кривизны требуется применение более сложных моделей метода Кунса.

Функции $F_i(t)$ С. Кунс назвал функциями стыковки (blending function). Можно задать множество таких функций. Например в виде алгебраических полиномов:

$$F_0(t) = 2t^3 - 3t^2 + 1; \quad (8.17)$$

$$F_1(t) = -2t^3 + 3t^2 \quad (8.18)$$

или тригонометрических функций:

$$F_0(t) = \cos^2 \pi/2t; \quad (8.19)$$

$$F_1(t) = \sin^2 \pi/2t. \quad (8.20)$$

При использовании метода Кунса неважно, какой вид имеют функции, описывающие граничные кривые. Наиболее часто для этого применяют полиномы. Тогда функции стыковки целесообразно брать в виде (8.17).

Пусть с некоторого эскиза, чертежа или физической модели сняты координаты точек граничной линии γ^k . Определим их радиусами-векторами r_i^k , $i = 0, N$.

Искать уравнение дуги линии r_{i+1}^k , r_{i+1}^k будем в виде кубического полинома

$$r_i^k = a_{0i}^k + a_{1i}^k t + a_{2i}^k t^2 + a_{3i}^k t^3, \quad t \in [0, 1]. \quad (8.21)$$

Коэффициенты (8.21) однозначно определяются заданием граничных точек и наклоном касательных в них, т. е. векторами r_i^k , r_{i+1}^k . Очевидно, что $a_{0i}^k = r_i^k$, $a_{1i}^k = \dot{r}_{i+1}^k$. Два других коэффициента a_{2i}^k и a_{3i}^k ищем из условия стыковки дуги $r_i^k r_{i+1}^k$ с дугой $r_{i+1}^k r_{i+2}^k$. Задача сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_{2i}^k + a_{3i}^k &= r_{i+1}^k - r_i^k - \dot{r}_i^k, \\ 2a_{2i}^k + 3a_{3i}^k &= \dot{r}_{i+1}^k - \dot{r}_i^k, \end{aligned} \right\} \quad (8.22)$$

рейку, нагруженную, как показано на рис. 46, то уравнение ее изогнутой оси в безразмерных координатах $\xi = x/l$, $\eta = y/l$, где l — длина рейки, можно записать в виде

$$\eta_k = \frac{\theta_{M2} - \theta_{M1}}{6} \xi^3 + \frac{\theta_{M2}}{2} \xi^2 - \left(\frac{\theta_{M1}}{3} + \frac{\theta_{M2}}{6} \right) \xi + \sum_{j=1}^N \left(\frac{\theta_{pj} (1 - \xi_j) \xi^3}{6} + \frac{\theta_{pj} (1 - \xi_j) (\xi_j - 2) \xi}{6} \xi_j \right) - \sum_{j=1}^k \frac{\theta_{pj} (\xi - \xi_j)^3}{6}, \quad (8.26)$$

$$\theta_{Mk} = \frac{\mu l^3}{EJ}, \quad \theta_{pj} = \frac{P_j l^2}{EJ}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots; \quad \xi_{k-1} \leq \xi < \xi_k;$$

EJ — жесткость рейки на изгиб.

Уравнение (8.26) называется полиномиальным сплайном $S_{m,1}(x)$, на каждом звене $[\xi_j, \xi_{j+1}]$ эта функция является кубическим полиномом. Стыковка между соседними звеньями осуществляется до второго порядка гладкости.

В общем случае функция $S_{m,k}(t)$, заданная на сетке $\Delta t = a = t_0 < t_1 < \dots < t_m = b$, называется полиномиальным сплайном степени m , дефекта k , если выполняются условия: $S_{m,k}(t)$ — полином степени m на каждом звене $[t_i, t_{i+1}]$; $S_{m,k}(t)$ — непрерывна до $m - k$ порядка включительно.

Заметим, что (8.26) является сплайном степени 3, дефекта 1. В дальнейшем рассмотрим сплайны дефекта 1 (обозначим их $S_{m,i}$, где i — номер дуги). На практике наиболее часто используются В-сплайны, определяемые формулой

$$B_{m,i}(t) = (m+1) \sum_{k=i-m}^i \frac{(t-t_k)_+^m}{\omega'(t_k)}, \quad (8.27)$$

где

$$\omega = (t - t_{i-m})(t - t_{i-m+1}) \dots (t - t_i); \quad (8.28)$$

$$(t - t_k)_+^m = \begin{cases} (t - t_k)^m, & t > t_k \\ 0, & t \leq t_k. \end{cases} \quad (8.29)$$

Основным свойством В-сплайнов является конечность интервала задания — $[t_{i-m}, t_i]$, при этом значения сплайна в граничных точках

$$B_{m,i}(t_i) = B_{m,i}(t_{i-m}) \equiv 0. \quad (8.30)$$

Это свойство называется финитностью. Им определяется, в частности, линейная независимость В-сплайнов, т. е.

$$S_{m,i} = \sum_{k=i-m}^i C^k B_{m,k}(t), \quad t \in [t_i, t_{i+1}]. \quad (8.31)$$

Из (8.31) с учетом (8.30) следует, что каждый коэффициент C^i влияет на свой участок и на m смежных с ним. Этим свойством пользуются для локальной модификации формы кривой, моделируемой сплайном.

В качестве узлов сетки носителя сплайна используют натуральный ряд чисел $0, 1, 2, \dots, N$. Для такой сетки можно ввести операцию нормировки и тогда семейство В-сплайнов, заданных на любой дуге (i ,

Чтобы задать поверхность при использовании B -сплайнов, необходимо иметь лишь $(N + m) \times (M + n)$ коэффициентов C^{ij} , что является более экономным решением по сравнению с методом Кунса, где требуется шесть N, M параметров. Для модификации формы объекта конструктор может оперировать положением отдельных точек, что, в силу финитности B -сплайнов, обеспечивает локализацию изменений моделируемых кривых.

Выражения (8.34) и (8.36) определяют математическую модель геометрического объекта, заданную в параметрическом виде (A -модель). К сожалению, при использовании параметрического задания на кривой в плоскости (x, y) или поверхности в пространстве (x, y, z) могут появиться особенности, им не свойственные.

Рассмотрим общий случай моделирования кривой, проходящей через N точек, сплайнами второй и третьей степени. Для однозначности построения сплайна в точках r_0 и r_N задаются касательные, имеющие направления y'_0 и y'_N соответственно.

Если радиусы-векторы точек r_i удовлетворяют условию

$$|\Delta r_i \times \Delta r_{i+1}| \geq a [|\Delta r_i \times \Delta r_{i+2}| + |\Delta r_i \times \Delta r_{i+1}|], \quad (8.42)$$

а длины конечных касательных

$$\lambda_0 \leq \frac{b |\Delta r_0 \times R_1|}{|\tau_0 \times R_1|}, \quad (8.43)$$

$$\lambda_N \leq \frac{b |\Delta r_N \times R_2|}{|\tau_N \times R_2|}, \quad (8.44)$$

где

$$R_1 = \Delta_1 r_1 - a \Delta_2 r_1,$$

$$R_2 = \Delta_1 r_{N-1} - a \Delta_2 r_{N-1},$$

$$b = \begin{cases} 4, & \text{для сплайна степени 2;} \\ 3, & \text{для кубического сплайна;} \end{cases}$$

$\Delta_k r_i, \Delta_k r_i$ — конечные разности в точке i ;

a — корень характеристического уравнения $a^2 + \begin{cases} 4 \\ 6 \end{cases} a + 1 = 0$, то на моделируемой кривой не появится никаких ложных особенностей в виде перегибов, возвратов, петель и др.

На рис. 47, *а* и *б* показаны примеры моделирования кривой кубическими параметрическими сплайнами. В первом случае точки r_i удовлетворяют условиям (8.42), во втором — нет. Первая кривая не имеет ложных перегибов, на второй — они появились. На рис. 47, *в* показана кривая, моделируемая кубическим сплайном, длины конечных касательных не удовлетворяют условиям (8.43) и (8.44), на ней имеются ложные особенности в виде точек возврата.

Таким образом, в дальнейшем будем предполагать, что исходная информация для моделирования кривой или поверхности параметрическими сплайнами удовлетворяет указанным выше условиям.

Не сложно показать связь B -сплайнов с методом Кунса. Для этого необходимо задать все величины, входящие в выражение (8.14), выразить через правую часть коэффициенты B -сплайнов. Левую часть (8.14) необходимо записать в виде (8.36). Важное место в САПР отводится за-

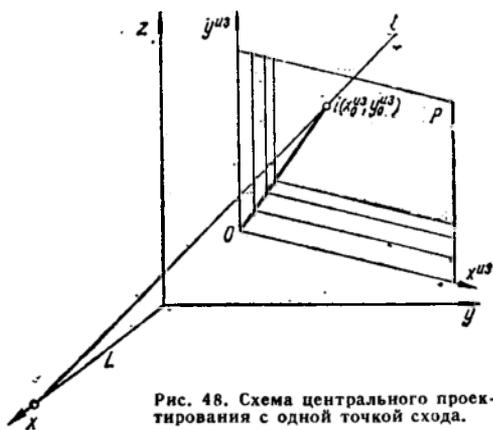


Рис. 48. Схема центрального проецирования с одной точкой схода.

Для перспективной проекции с одной точкой схода (рис. 48) матрица проецирования [3]:

$$A_3 = \begin{pmatrix} L & x_0 & 0 & 0 \\ 0 & y_0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L \end{pmatrix}. \quad (8.47)$$

Матрица результирующего преобразования A определяется перемножением соответствующих матриц, и формула преобразования координат такая:

$$(x, y, z, w) = (x, y, z, 1) A. \quad (8.48)$$

Используя (8.45) и отбрасывая нулевую третью координату, получим цифровую модель изображения геометрического объекта, которая затем может быть выведена на графическое устройство.

Рассмотрим алгоритм построения модели поверхности с помощью приведенных методов в соответствии со схемой геометрического моделирования, представленной на рис. 40. Пусть на планшете устройства ввода графической информации находится чертеж плоских ортогональных проекций поверхности сложной формы, например теоретический чертеж корпуса судна.

1. Пользователь с помощью устройства ввода выполняет операцию по привязке системы координат чертежа к системе координат планшета. Для этого используются формулы:

$$x' = M/d [(x - x_A)(x_B - x_A) - (y - y_A)(y_B - y_A)]; \quad (8.49)$$

$$y' = M/d [(x - x_A)(y_B - y_A) + (y - y_A)(x_B - x_A)], \quad (8.50)$$

где M — масштаб чертежа; x_A, y_A, x_B, y_B — координаты любых двух точек чертежа; d — расстояние между этими точками.

2. После этого пользователь вводит в память ЭВМ последовательно координаты точек линий, сопровождая указаниями об их характере. ЭВМ пересчитывает координаты точек в систему координат объекта. В результате в памяти ЭВМ образуется точечный каркас, состоящий из линий чертежа.

3. Используя модель B -сплайнов, ЭВМ определяет параметры уравнения линий. В результате в памяти ЭВМ строится модель линии типа D .

4. Пункты 2 и 3 повторяются для всех линий чертежа.

В результате в памяти ЭВМ будут построены D -модели ортогональных проекций обводов поверхности (каркас поверхности). Тогда для каждой линии будут определены первые и вторые производные радиус-вектора узловых точек каркаса.

5. Применяя метод Кунса, можно построить уравнение каждого лоскута, ограниченного дугами линий каркаса. В результате получим модель поверхности, покрытую лоскутами Кунса.

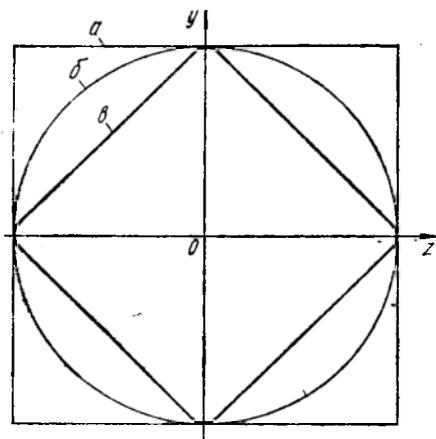


Рис. 50. Иллюстрация метода Осипова:
 a — $m = 1$; b — $m = 0$; v — $m = -3$.

Методы управления формой кривых при проектировании ряда классов сложных геометрических объектов предложены в работах В. А. Осипова [46]. Методы основаны на использовании специального вида функций, зависящих от небольшого числа параметров. Влияние их на форму и на геометрические характеристики объекта известно. Изменяя эти параметры по определенным законам, получают спектр проектируемых объектов этого класса. Отбор их производится или визуально после построения изображения, или по заранее заданным критериям (например, минимального сопротивления профиля).

Проиллюстрируем методику на примере управления формой кривой типа шанпоут. Для этого используют две функции:

$$y = \pm \sqrt{\frac{1-z^2}{1-mz^2}}, \quad z = \pm \sqrt{\frac{1-y^2}{1-my^2}}, \quad (8.54)$$

где m — управляющий параметр. При $m = 1$ функции описывают единичный квадрат, при $m = 0$ — окружность единичного радиуса, $m = -3$ определяет выпуклую фигуру (рис. 50). Методика получения различных контуров на базе использования функций, подобной (8.54), но с переменным параметром $m(t)$, предложена в [46].

Интересный метод управления формой геометрического объекта в интерактивных системах предложил П. Безье [17]. Особенностью метода является то, что конструктору не нужно прибегать к помощи численных параметров, геометрический смысл которых ему не ясен. Идею метода рассмотрим на примере гладких кривых. Кривая Безье определяется вершинами полигона, единственным образом задающими форму кривой. Кривой принадлежит только первая и последняя вершины многоугольника, а остальные характеризуют производные, порядок и вид кривой. Изменения вершин этого полигона создает у конструктора более ясное интуитивное ощущение восприятия связи между числовыми значениями параметров и формой.

Кривую Безье находят в базе Бернштейна [17]:

$$J_{n,i}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}, \quad (8.55)$$

где C_n^i — число сочетаний из n по i .

Уравнение кривой задается в виде

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i J_{n,i}(t), \quad t \in [0, 1]. \quad (8.56)$$

Коэффициентами являются значения вершин опорного полигона. Значения, характеризующие гладкость в узловых точках исходной кривой, первые, вторые и т. д. производные легко определяются че-

звено сплайна будет разбито на три дополнительных звена, на каждом из которых сплайн записывают в виде

$$S(t) = P_i^0 R_i^0 + P_i^{(1)} R_i^1 + P_i^{(2)} R_i^{(2)}, \quad (8.59)$$

где R_i^k — кубические полиномы, коэффициенты которых явно выражаются через коэффициенты исходного сплайна ($i = 0, 1, 2$); $P_i^{(k)}$ — значения сплайна и его производных по t в узлах t_i ($i = 0, 1, 2$), вычисленные по формуле (8.56).

Положим $P_i^{(1)} = \delta P_i^{(1)}$, $P_i^{(2)} = \xi P_i^{(2)}$, где δ и ξ безразмерные параметры. Изменяя δ и ξ , можно получить различные по форме кривые. На рис. 52 представлены кривые, моделируемые одним уравнением (8.34), но при различных значениях параметров δ и ξ .

Из многообразия моделей, используемых в системах геометрического моделирования, рассмотрены лишь некоторые, имеющие определенное прикладное значение. В заключение представим гипотетическую систему геометрического моделирования, в которой воплощены наиболее интересные решения в этой области.

Модели. Выбор модели является основным вопросом для любой системы. Решение его определяется условиями той среды, в которой должен работать тот или иной тип моделей. Так, средой для A -моделей является многообразие материальных объектов пространства, а также мысленных образов человека. Важными здесь являются не только модели формы объектов, но и модели размещения их в пространстве. Поэтому при определении набора необходимых для системы моделей приходится находить компромисс между большим количеством высокоспециализированных объектно-ориентированных, а потому наиболее эффективных моделей, и сравнительно небольшим набором моделей достаточно универсальных, а потому в среднем менее эффективных в каждом конкретном применении. Очевидно, развитие системы должно идти в обоих направлениях, пополняя библиотеку специализированных моделей и обобщая их наиболее сильные стороны.

L -модели определяют язык пользователя. Здесь основным требованием является общение с конструктором на его профессиональном языке. Это значит, что язык должен описывать модель объекта, постановку проектных задач, управление их решением, операторы редактирования данных и выдачи проектной информации.

И, наконец, D -модели должны работать в среде многочисленных прикладных систем, представленных семейством пакетов прикладных программ САПР. Здесь основные требования — полнота представления данных о проектируемом объекте и простота манипулирования им при обеспечении эффективного по объемно-временным показателям доступа к данным со стороны пакета программ. Спецификой такого представления является возможность раздельного хранения в памяти ЭВМ топологической информации и геометрической, дополненной необходимыми атрибутами, с обеспечением раздельной их обработки. В отличие от A -моделей разнообразие D -моделей не должно быть большим.

Интеграция с прикладными системами. Системы геометрического моделирования в условиях САПР обычно тесно взаимодействуют с ра-

С помощью метода конечного элемента решаются задачи прогнозирования статического, динамического и температурного поведения машин и механизмов; оценки напряжений и деформаций балок и стержневых систем, пластин и оболочек; разработки на прочность конструкций современных судов и летательных аппаратов.

Несмотря на ряд модификаций метода конечного элемента, известных как методы Ритца, Галеркина, наименьших квадратов и коллакаций, сущность этого метода сводится к следующему. Область определения исходных уравнений в частных производных покрывается некоторым конечным числом не пересекающихся друг с другом элементов и ищется дискретная аппроксимация решения уравнений в виде линейной комбинации $\sum \alpha_i \varphi_i$ некоторых базисных функций $\varphi_i(x)$. Последние связаны с отдельными введенными элементами и могут быть кусочно полиномиальными, рациональными и др. Параметры этих базисных функций подбираются так, чтобы обеспечить необходимую степень непрерывности функций, описывающих соседние элементы. Аппроксимация решения по всей области определения уравнений может быть выражена через значения базисных функций и их производных в узловых точках, при этом каждая функция φ_i равна нулю на большей части области определения и отлична от нуля только в окрестности одного узла. В общем виде аппроксимирующая решение функция имеет вид

$$U(x) = \sum_{i=1}^N \left[\alpha_i(x) \varphi_i + \beta_i(x) \left(\frac{\partial U}{\partial x_1} \right)_i + \gamma_i(x) \left(\frac{\partial U}{\partial x_2} \right)_i + \dots \right], \quad (9.1)$$

где N — число узлов сети элементов, покрывающих область определения функции.

В большинстве практических модификаций метода конечного элемента (9.1) упрощается к виду

$$U(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(x) \varphi_i. \quad (9.2)$$

Нахождение коэффициентов $\alpha_i(x)$, а в общем случае и $\beta_i(x)$, $\gamma_i(x)$ и т. д., является наиболее критической и самой сложной процедурой метода конечного элемента. Обычно эти коэффициенты определяются с помощью дополнительной оптимизационной процедуры, связанной с представлением исходной задачи в некоторой эквивалентной вариационной формулировке [65, 84].

Например, в методе Ритца для нахождения коэффициентов формируется система линейных уравнений

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_i} I \left(\sum_{j=1}^N \alpha_j \varphi_j \right) = 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad (9.3)$$

где в соответствии с принципом вариации используется двойной интеграл по границе ∂R области определения R :

$$I(u) = \iint_R F(x, y, u, u_x, u_y) dx dy, \quad (9.4)$$

имеющий экстремум только в том случае, когда искомая функция двух переменных $u(x, y)$ удовлетворяет дифференциальное уравнение Эй-

Если граничные условия не заданы в точках x_0 и x_1 , то минимизируется интеграл

$$I(u) = \int_{x_0}^{x_1} F(x, u, u') dx, \quad (9.12)$$

и условием минимума его значения является удовлетворение функции u дифференциальному уравнению (9.11) совместно с естественным краевым условием

$$\frac{\partial F}{\partial u'} = 0 \quad (x = x_0, x_1). \quad (9.13)$$

В дуальном принципе вариации, когда искомого решение d аппроксимируется сверху и снизу $d_n \leq d \leq d_n$, минимизируется интеграл (9.4) с учетом выражения (9.6) по непрерывной функции $u(x, y)$, имеющей кусочно-непрерывную производную в области R и принимающую заданные значения $u = f(\sigma)$ на границе ∂R области определения R , где σ — дуга границы ∂R .

В дуальной задаче максимизируется интеграл

$$J(v) = - \iint_R 1/2 [v_x^2 + v_y^2] dx dy - \int_{\partial R} v f'(\sigma) d\sigma \quad (9.14)$$

по непрерывной функции $v(x, y)$ с кусочно-непрерывной производной в области R , которая удовлетворяет уравнению Лапласа (9.7) и естественным граничным условиям

$$v_y \frac{\partial x}{\partial \sigma} - v_x \frac{\partial y}{\partial \sigma} = f'(\sigma). \quad (9.15)$$

При этом

$$\min_u I(u) = \max_v J(v) = d. \quad (9.16)$$

Пробные функции. Рассмотрим задачу аппроксимации вещественной функции двух переменных с помощью кусочно-непрерывных функций на области определения R с границей ∂R . Область покрывается множеством элементов различной формы.

Для прямоугольной области определения конечные элементы формируются проведением линий, параллельных осям x и y (рис. 53). Пусть область задания $[x_0, x_m] \times [y_0, y_m]$ разбита на элементы с шагами $h_1 = x_{i+1} - x_i$ и $h_2 = y_{j+1} - y_j$ по координатным осям.

Тогда билинейная интерполяция значения $f(x, y)$ на прямоугольном конечном элементе определяется выражением

$$P_1^{(i,j)}(x, y) = \alpha_{ij}(x, y) f_{ij} + \beta_{i+1,j}(x, y) f_{i+1,j} + \gamma_{i,j+1}(x, y) f_{i,j+1} + \delta_{i+1,j+1}(x, y) f_{i+1,j+1}, \quad (9.17)$$

где

$$\alpha_{ij}(x, y) = \frac{1}{h_1 h_2} (x_{i+1} - x)(y_{j+1} - y);$$

$$\beta_{i+1,j}(x, y) = \frac{1}{h_1 h_2} (x - x_i)(y_{j+1} - y);$$

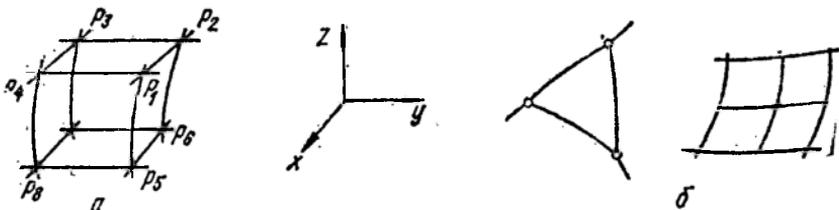


Рис. 55. Криволинейные и изопараметрические конечные элементы: а — трехмерные; б — двухмерные.

Вошедшие в (9.20) коэффициенты

$$\alpha_1(x, y) = 1/2\Delta (\tau_{23} + \eta_{23}x - \xi_{23}y);$$

$$\alpha_2(x, y) = 1/2\Delta (\tau_{31} + \eta_{31}x - \xi_{31}y);$$

$$\alpha_3(x, y) = 1/2\Delta (\tau_{12} + \eta_{12}x - \xi_{12}y),$$

где 2Δ — удвоенная площадь треугольника,

$$\tau_{ij} = x_i y_j - x_j y_i;$$

$$\xi_{ij} = x_i - x_j;$$

$$\eta_{ij} = y_i - y_j.$$

Базисные функции, связанные с узлами разбиения области определения R , находят суммированием вкладов прилежащих треугольных конечных элементов.

Для повышения точности вычислений вместо билинейной интерполяции для прямоугольных конечных элементов и линейной интерполяции для треугольных конечных элементов применяют более сложные методы интерполяции полиномами Эрмита, Лагранжа, сплайн-функциями второго и третьего порядков [84]. При этом используют как узловые точки, так и середину сторон конечных элементов. Кроме того, учитывая реальные граничные условия, выбирают конечные элементы с искривленными сторонами — двухмерный случай — или искривленными поверхностями — трехмерный случай (рис. 55, а, б).

Криволинейные элементы с помощью преобразования координат можно выпрямить [27]. Для этого используют такие же полиномиальные выражения, как и для базисных функций φ_i (изопараметрические преобразования).

Повышение степени используемого интерполяционного полинома Эрмита, например использование выражения

$$H_3(x, y) = \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 \alpha_{jk} x^j y^k$$

не приводит к росту числа конечных элементов, поддерживающих выбранный полином (оно остается равным четырем, как и в билинейном случае). В то же время применение для внутренних узлов кубических сплайнов, например сплайнов Шенберга

$$M(x) = 1/6h\delta_x^4 (x/h - j)^3;$$

$$M(y) = 1/6h\delta_y^4 (y/h - k)^3,$$

нений порядка $2k$) точки коллакаций на каждом интервале $[x_i, x_{i+1}]$ определяются нулями полинома Лежандра

$$P_k \left[\frac{2x - x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} - x_i} \right].$$

В настоящее время накоплен большой опыт оценки устойчивости аппроксимационных процедур типа (9.2) [27, 65, 84].

С помощью модификации метода Галеркина, известной как полудискретный метод Галеркина, можно решать и динамические задачи, в которых наряду с пространственными координатами к числу неизвестных переменных относится время t .

Это задачи, например, описываемые конвекционно-диффузным уравнением

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(p(x, y) \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q(x, y) \frac{\partial W}{\partial y} \right) - u \frac{\partial W}{\partial x} - v \frac{\partial W}{\partial y}, \quad (9.23)$$

где W — температура; $p(x, y)$, $q(x, y)$ — коэффициенты диффузии; u , v — составляющие скорости внешнего потока носителей, а также задачи, описываемые уравнением Навье — Стокса для несжимаемой вязкой жидкости,

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \gamma \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial W}{\partial x} - v \frac{\partial W}{\partial y}, \quad (9.24)$$

где u , v — составляющие скорости потока ψ ; $W = -\nabla^2 \psi$; γ — коэффициент вязкости.

Для одномерного случая (9.23) и (9.24) обычно сводятся к виду

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (9.25)$$

где ε — коэффициент диффузии; k — коэффициент дрейфа. При этом начальные условия

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= u_0(x), & x &\in [0, 1], \\ u(0, t) &= u(1, t) = 0, & t &\in [0, T]. \end{aligned}$$

Полудискретный метод Галеркина для решения (9.25) заключается в нахождении аппроксимационного выражения

$$U(x, t) = \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i(t) \varphi_i(x) \quad (9.26)$$

из условия, что

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial t}, \psi_n(x) \right) + (U', \varepsilon \psi_n'(x) + k \psi_n(x)) &= 0, \\ n &= 1, 2, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (9.27)$$

где тестовая функция ψ_n , как и базисная φ_i , принадлежит одному пространству функций. Подстановка (9.26) в (9.27) приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\sum_{i=1}^{N-1} [(\varphi_i, \psi_j) \dot{\alpha}_i + \{\varepsilon (\varphi_i', \psi_j') + k (\varphi_i, \psi_j)\} \alpha_i] = 0, \quad (9.28)$$

Уравнение (9.32) может быть записано также с помощью разностных операторов в виде

$$(\delta_x^2 I_y + \delta_y^2 I_x) U_{ij} - 2h^2 = 0, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (9.33)$$

где δ_x^2, δ_y^2 — операторы второй центральной разности, равные

$$\delta_x^2 W_{ij} = \frac{W_{i+1,j} - 2W_{ij} + W_{i-1,j}}{h^2} x$$

$$\delta_y^2 W_{ij} = \frac{W_{i,j+1} - 2W_{ij} + W_{i,j-1}}{h^2} y$$

а I_x, I_y — операторы правила Симпсона для вычисления определенного интеграла, равные

$$I_x U_{ij} = 1/6 [U_{i-1,j} + 4U_{ij} + U_{i+1,j}]_x$$

$$I_y U_{ij} = 1/6 [U_{i,j-1} + 4U_{ij} + U_{i,j+1}]_y$$

Аппроксимационное решение на множестве конечных элементов показано на рис. 56 и приведено в табл. 18, при этом из-за симметрии показана только $1/8$ области определения функции. Точные решения, приведенные в табл. 18, определяются теоретическим решением задачи, равным

$$u(x, y) = - (1/2\pi)^2 + x^2 + 8/\pi \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)^3} \frac{c h (2k-1) y}{c h (2k-1) 1/2\pi} \cos(2k-1)x.$$

Данная задача решалась и для случая выбора треугольного конечного элемента (проведения диагоналей в предыдущих квадратах), а также использования интерполяционных выражений для конечных элементов более высоких порядков. Для частного значения $N = 6$ максимальная ошибка приведена в табл. 19.

Для иллюстрации особенностей применения метода Галеркина рассмотрим задачу стационарного потока вязкой жидкости, описываемую уравнением, полученным на основе

Таблица 18. Результаты решения задачи методом конечного элемента

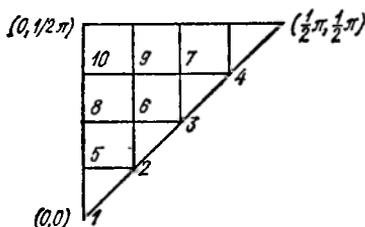


Рис. 56. Выбор конечных элементов для решения уравнений Пуассона.

Номер точки	Решение			
	$N = 3$	$N = 7$	$N = 15$	точное решение
1	-1,534	-1,473	-1,459	-1,454
2		-1,321	-1,308	-1,304
3	-0,950	-0,907	-0,897	-0,894
4		-0,370	-0,362	-0,359
5		-1,394	-1,381	-0,376
6		-1,089	-1,079	-1,075
7		-0,566	-0,559	-0,556
8	-1,278	-1,146	-1,135	-1,132
9		-0,666	-0,660	-0,658
10		-0,698	-0,692	-0,690

Совместно приведенные уравнения образуют систему

$$\begin{aligned} (1 - 1/2hk + 1/12h^2k^2) W_{i+1} - (2 + 1/6h^2k^2) W_i + \\ + (1 + 1/2hk + 1/12h^2k^2) W_{i-1} = 0, \\ i = 1, 2, \dots, N-1, \end{aligned}$$

имеющую теоретическое решение

$$W_i = A_2 + B_2 \left(\frac{1 + 1/2hk + 1/12h^2k^2}{1 - 1/2hk + 1/12h^2k^2} \right)^i.$$

В табл. 20 сравниваются решения с помощью конечных элементов с линейной и квадратичной базисными функциями.

Таблица 19. Погрешности решения в зависимости от выбора конечного элемента

Конечный элемент, используемая интерполяционная формула	ϵ_{\max}
Прямоугольный, билинейная	0,03269
Прямоугольный, кубический полином Эрмита	0,000063
Треугольный, линейная	0,03116
Треугольный, кубическая	0,00007

Таблица 20. Сравнительные результаты применения конечных элементов с различными базисными функциями

x	$h = 1/20$		$h = 1/10$		Теоретические значения
	линейная	квадратичная	линейная	квадратичная	
0,90	0,9600	0,9941	0,9996	0,9974	0,9975
0,925	—	—	0,9971	0,9885	0,9889
0,95	1,2000	0,9231	0,9796	0,9490	0,9502
0,975	—	—	0,8571	0,7742	0,7769
1,00	0	0	0	0	0

При выбранном $k = 60$ в линейном случае для $h = 1/20$ наблюдаются колебания решения.

Рассмотрим решение динамической задачи (9.25) с помощью полудискретного метода Галеркина. Для билинейных квадратных элементов с базисными функциями $\varphi_i(x)$ тестовые функции выбираются из условия

$$\psi_i(x) = \varphi_i(x) + \alpha \sigma \left(\frac{x}{h} - i \right), \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (9.36)$$

где

$$\sigma(S) = \begin{cases} 0, & \text{если } |S| < 1; \\ -3S(1-S), & \text{если } 0 \leq S \leq 1; \\ -\sigma(-S), & \text{если } 1 \leq S \leq 0, \end{cases}$$

и α — произвольный параметр.

При таком выборе система обыкновенных дифференциальных уравнений (9.28) приобретает вид

$$h^2 M \dot{\alpha} = \epsilon S \alpha, \quad (9.37)$$

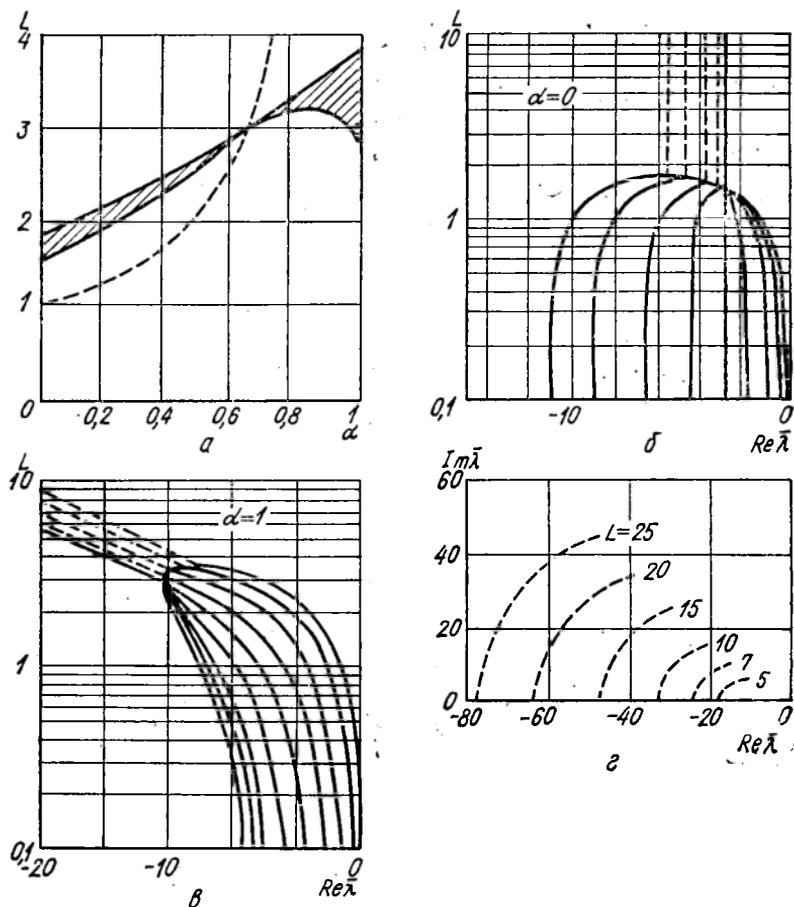


Рис. 57. Решение динамической задачи распространения (9.25):
 a — граничные кривые условий (9.42), (9.43) и (9.45); b — кривые $\text{Re } \bar{\lambda}_i = f(L)$ для $\alpha = 0$ и $h = 0$; δ — кривые $\text{Re } \bar{\lambda}_i = f(L)$ для $\alpha = 1$ и $h = 1/10$; ε — годографы собственных значений $\bar{\lambda}_i = \text{Re } \bar{\lambda}_i + j \text{Im } \bar{\lambda}_i$.

диапазоне $[0, 1; 10]$. При этом разрывными линиями показаны комплексные собственные значения. Действительные значения $\bar{\lambda}_i$ приведены на рис. 57, b . Отметим, что при $\alpha = 0$ и $L \geq \sqrt{3}$ действительные части собственных значений не зависят от L .

Если рассматриваемую задачу (9.25) решать обычными разностными методами заменой дифференциальной задачи разностной [45], то корни модифицированного характеристического уравнения

$$(h^2 I \lambda - \varepsilon S) \alpha = 0 \quad (9.44)$$

определяют выражением

$$\bar{\lambda}^i = -2(1 + \alpha L) + 2[(1 + \alpha L)^2 - L^2]^{1/2} \cos \frac{i\pi}{N},$$

$$i = 1, 2, \dots, N - 1,$$

подземных и наземных сооружений в промышленности и гражданском строительстве (Научно-исследовательский институт автоматизированных систем в строительстве, г. Киев) и др.

9.2. ПЛОСКИЕ КОНСТРУКЦИИ. РАЗМЕЩЕНИЕ И СОЕДИНЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ

В технических объектах часто встречаются плоские конструкции, в которых компоненты и соединения между ними располагаются в ограниченном числе параллельных плоскостей.

Примерами плоских конструкций являются печатные монтажные платы, применяемые в электронной аппаратуре. Чтобы такую плату реализовать, необходимо удовлетворить ряду ограничений, разделяемых на метрические и топологические. Метрические ограничения определяются фиксированными размерами компонентов, шириной проводников и минимальными допустимыми расстояниями между различными элементами конструкции. К топологическим ограничениям относят запрещение расположения трасс в заданных областях монтажного пространства и пересечения различных соединений, а также требование электрического объединения определенных контактов.

Процесс проектирования можно разделить на два последовательно выполняемых этапа. На первом выполняется построение предварительного варианта размещения компонентов и соединений, удовлетворяющего топологическим ограничениям.

На втором — полученный вариант размещения преобразуется в реализуемую монтажную схему, удовлетворяющую не только топологическим, но и метрическим ограничениям. Этот подход к проектированию плоских конструкций называется топологическим и включает следующие основные этапы [52]:

построение математической модели конструируемого объекта; формирование плоской укладки модели объекта (топологический анализ); планаризацию модели; построение предварительного варианта размещения компонентов и соединений; построение окончательного варианта конструкции.

На первом этапе строится математическая модель, отражающая рассматриваемые свойства объекта, на втором — выделяется максимальная часть модели, которая укладывается на плоскости без нарушения топологических ограничений. Если выделяемая часть содержит не все элементы модели, то выполняется третий этап, на котором исходная модель преобразуется в планарную. Четвертый этап не обязателен, хотя и обеспечивает разработчика предварительным вариантом размещения компонентов. Окончательный вариант размещения компонентов и соединений реализуется на заключительном (пятом) этапе.

Топологическое проектирование плоских конструкций, рассмотренное ранее, используется помимо радиоэлектроники также для проектирования инженерных сетей строительных объектов, компоновки оборудования цехов и монтажных соединений, проектирования транспортных трасс и др.

При решении конкретных задач используются различные математические модели объектов и их конструкций в виде графов, гиперграфов

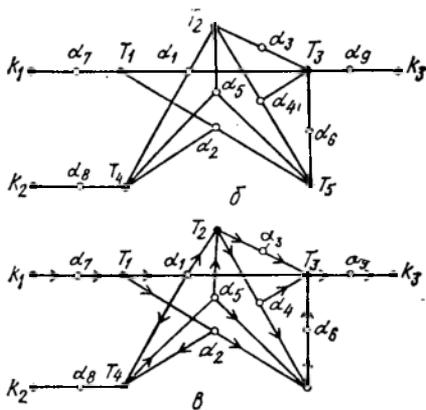
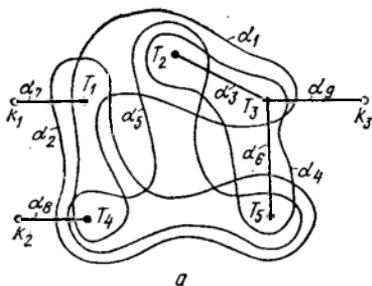


Рис. 60. Примеры моделей объекта:
 а — гиперграф функциональной схемы; б — кенигово представление гиперграфа
 схемы; в — ультраграф схемы.

В инженерной практике большинство конструкторских задач связано с конструированием в трехмерном монтажном пространстве. Вместе с тем специфика этих задач и особенностей конструирования обычно позволяют перейти к адекватной задаче в двухмерном монтажном пространстве за счет рассмотрения проекций компонентов на плоскость.

Различают дискретные и непрерывные монтажные пространства. Дискретное монтажное пространство характеризуется конечным числом заранее заданных позиций для размещения компонентов. Дискретное монтажное пространство может быть регулярным и нерегулярным. В первых (регулярных) позиции располагаются с постоянным шагом по вертикали и горизонтали. Нерегулярные дискретные пространства имеют, как правило, блоки старших рангов. Регулярные монтажные пространства имеют унифицированные блоки средних и младших рангов (например, в цифровой аппаратуре).

В непрерывных монтажных пространствах нельзя заранее определить координаты позиций, так как размещаемые компоненты имеют различные размеры и форму.

При осуществлении коммутации компонентов также строятся специальные монтажные пространства как дискретного регулярного типа (например, в виде мелкой ортогональной технологической сетки в случае трассировки печатных соединений или соединений интегральной схемы), так и нерегулярного (в виде графа каналов в случае проводного монтажа). В более сложных алгоритмах трассировки используются и непрерывные монтажные пространства.

В случае многослойного монтажа монтажное пространство образуется путем специального объединения монтажных пространств отдельных слоев.

На различных этапах конструирования в зависимости от конкретных решаемых задач и методов их решения используются различные модели.

Поскольку основные задачи конструирования относятся к поли-

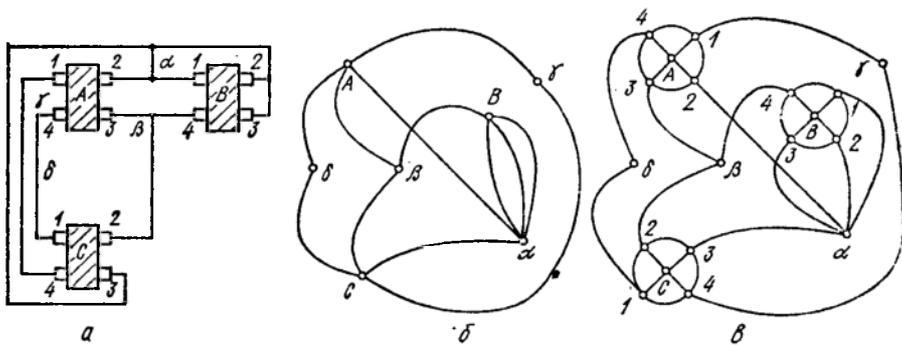


Рис. 29. Построение модели плоского объекта на основании многоместного графа: а — схема; б — ее потенциальный граф; в — полная топологическая модель схемы.

гиперграфа, однако информационные свойства модели остаются аналогичными предыдущей модели. В более общей постановке задачи топологического анализа плоского объекта необходимо учитывать порядок расположения контактов его элементов. Для этого строятся графы-модели элементов. В таких моделях вершины соответствуют контактам, а ребра — парам соседних контактов.

Общая модель объекта (модель M2) с учетом графов-моделей элементов представляется многоместным графом $G(A, R)$, где A — множество вершин; R — множество комплексов (множество подграфов с некоторой центральной точкой). Построение модели M2 показано на рис. 29, где приведена схема (рис. 29, а), ее потенциальный граф (рис. 29, б), отображающий элементы в вершины, а соединения — в комплексы, и полная топологическая модель схемы (рис. 29, в) с учетом графов-моделей элементов.

5.2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Основная часть реализуемых в САПР расчетных работ (по объему и затратам) выполняется на количественном уровне моделирования (детальном и адекватном). В связи с этим целесообразно автоматизировать процедуру формирования аналитической модели объекта на выбранном уровне структурирования и абстрагирования. Модель объекта или элементов при детальном и адекватном моделировании чаще всего представляется ориентированным графом с подробным описанием весов всех ребер графа (компонентных уравнений для элементов схемы замещения). На основании такой модели строится ее математическая форма (математическая модель) в виде системы уравнений (алгебраических, дифференциальных, смешанных, линейных или нелинейных, непрерывных или разностных и т. д.), описывающих закон функционирования и характер изменения переменных объекта (компонента).

При количественном моделировании инженерных объектов, модели которых представлены орграфами, большое значение имеют следующие законы равновесия.

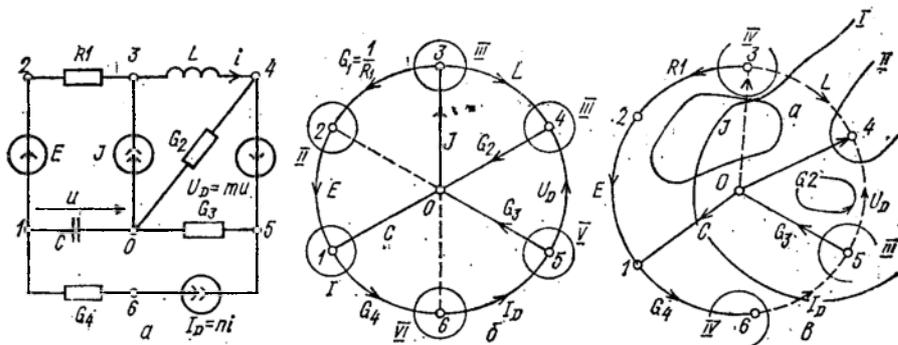


Рис. 31. Электрическая схема (а), ее граф с канонической системой сечений (б) и граф с фундаментальной системой сечений (в).

Если граф модели объекта имеет v вершин и l ребер, то размерности указанных матриц соответственно равны [72]:

$$\Pi = [v - 1] \times [v - 1];$$

$$P = [l - v + 1] \times [l - v + 1],$$

так что общее число уравнений (5.3) равно l , хотя число переменных $[u] + [i] = 2l$.

Независимость сечений и контуров графа удобно устанавливать с помощью дерева графа, соответствующего произвольной совокупности ребер, объединяющих все вершины графа и не образующих ни одного замкнутого контура. Выбор дерева неоднозначен, поэтому следует установить определенную иерархию приоритетов для ребер графа при выборе дерева, позволяющую реализовать некоторые дополнительные условия (например, получить специфический вид уравнений математической модели). В таком случае каждому ребру дерева графа можно сопоставить сечение, инцидентное только одному ребру дерева, а также другим ребрам графа, называемым хордами, образующим дополнение. При удалении совокупности всех ребер, принадлежащих сечению, граф распадается на две или более частей. Каждой хорде, не вошедшей в дерево, можно составить контур, в который, кроме данной хорды, входят (инцидентны) только ребра дерева графа.

Сечения и контуры рассматривают как систему координат, относительно которой записываются уравнения объекта. Если принять в качестве независимых разностные переменные ребер дерева u_T и потоковые переменные хорд i_N , то остальные переменные (u_N и i_T) находят на основании обобщенных законов Кирхгофа из соответствующих сечений и контуров. Тогда

$$i_T = -\Pi i_N \quad (5.4)$$

или

$$[1\Pi] \begin{bmatrix} i_T \\ i_N \end{bmatrix} = \Pi i = 0,$$

если преобразовать формы матрицы сечений к виду $[1\pi]$, где π — матрица сечений для хорд размером $[v - 1] \times [l - v + 1]$;

$$u_N = -\rho u_T \quad (5.5)$$

или

$$G^{(j)}u^{(j)} + R^{(j)}i^{(j)} = W^{(j)}, \quad (5.8)$$

где

$$G^{(j)} = \frac{\partial K}{\partial u}, \quad R^{(j)} = \frac{\partial K}{\partial i}.$$

Принято различать Y и Z -ребра (компоненты) в зависимости от выбора управляющей переменной в (5.7), для которых

$$\left. \begin{aligned} i &= K_1(u), \\ i^{(j)} &= \frac{\partial K_1}{\partial u} \Big|_{u^{(j-1)}} u^{(j)} + W^{(j)}, \end{aligned} \right\}$$

где вводится независимый источник

$$W^{(j)} = K_1(u^{(j-1)}) - \frac{\partial K_1}{\partial u} \Big|_{u^{(j-1)}} u^{(j-1)};$$

или

$$\left. \begin{aligned} u &= K_2(i), \\ u^{(j)} &= \frac{\partial K_2}{\partial i} \Big|_{i^{(j-1)}} i^{(j)} + W^{(j)}, \end{aligned} \right\}$$

где вводится независимый источник

$$W^{(j)} = K_2(i^{(j-1)}) - \frac{\partial K_2}{\partial i} \Big|_{i^{(j-1)}} i^{(j-1)}.$$

Временной шаг, а следовательно, и интервал линеаризации автоматически выбирается, исходя из заданной погрешности вычислений.

Компонентные уравнения (5.7) отражают помимо нелинейности также инерционность, присущую объекту и его компонентам.

Инерционные свойства отдельных компонент выражаются уравнениями типа

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad \text{или} \quad u_L = L \frac{di_L}{dt}. \quad (5.9)$$

В процессе вычислений на ЭВМ уравнения (5.9) алгебраизируются применением аппроксимирующих выражений для производной, полученных на основе численных методов интегрирования дифференциальных уравнений [50]. Например, для первого уравнения из системы (5.9), учитывая неявный метод Эйлера

$$u_{C(n+1)} = u_{Cn} + h i_{C(n+1)},$$

получим

$$\left. \begin{aligned} u_{C(n+1)} &= u_{C(n)} + \frac{h}{C} i_{C(n+1)}, \\ i_{C(n+1)} &= \frac{C}{h} u_{C(n+1)} - \frac{C}{h} u_{C(n)}. \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

если использовать исходные компонентные уравнения и зависимость

$$u = [1 - \rho^t] u_T = \Pi^t u_T,$$

определяемую соотношением (5.5).

При выборе в объекте полюсного дерева, ветвями которого являются узловые величины v , уравнения (5.12) приводятся к виду (модель OM_{10}):

$$\left[A \frac{\partial K}{\partial u} A^t \right] v = bf, \quad (5.13)$$

где A — матрица инцидентности. Размер уравнений (5.12) и (5.13) равен $[v - 1] \times [v - 1]$.

Предыдущая однородная модель не удобна для объектов, содержащих идеальные компоненты (например, источники, короткозамкнутые ребра). В случае, когда в структуре объекта имеется kZ -компонентов, описываемых уравнениями $u_2 = K_2(i_2)$, и $(l - k) Y$ -компонентов с уравнениями $i_1 = K_1(u_1)$, удобно расширить вектор переменных модели OM_2 и ввести в него i потоковые переменные Z -компонентов, неудобные при описании объекта в терминах разностных переменных (например, потоковые переменные, используемые для управления зависимыми источниками).

Тогда уравнения гибридной, или таблично-узловой модели объекта GM_1 строятся преимущественно на основе уравнений сечений и системы (5.3), дополненных компонентными уравнениями Z -типа:

$$[\Pi_1 \Pi_2] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \Pi_1 K_1(u_1) + \Pi_2 i_2 = 0;$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} u_T.$$

Реализуется система уравнений размерностью $[v - 1 + k] \times [v - 1 + k]$ вида

$$\begin{array}{|c|c|} \hline \Pi_1 \frac{\partial K_1}{\partial u_1} D_1^t & \Pi_2 \\ \hline -D_2^t & \frac{\partial K_2}{\partial i_2} \\ \hline \end{array} \begin{bmatrix} u_T \\ i_2 \end{bmatrix} = bf, \quad (5.14)$$

которая автоматически адаптируется к компонентному составу объекта.

Аналогично на базе узловых величин, выступающих в качестве разностных переменных дерева $u_T = v$, получают уравнения (модель GM_{10}):

$$\begin{array}{|c|c|} \hline A_1 \frac{\partial K_1}{\partial u_1} A_1^t & A_2 \\ \hline -A_2^t & \frac{\partial K_2}{\partial i_2} \\ \hline \end{array} \begin{bmatrix} v \\ i_2 \end{bmatrix} = bf, \quad (5.15)$$

поскольку в этом случае $\Pi = A$ и $D^t = A^t$.

Формирование на ЭВМ любой из возможных моделей объектов типа (5.12)...(5.15) выполняется без матричных операций только с использованием логических процедур.

$$i_{R1} = G_1 u_{R1} \text{ или } u_{R1} = R_1 i_{R1},$$

$$i_{G2} = G_2 u_{G2}, i_{G3} = G_3 u_{G3}, i_{G4} = G_4 u_{G4},$$

$$I_D = ni = ni_L, U_D = tu = tu_C.$$

Кроме того, в схеме имеется два независимых источника: напряжения E и тока J . Соответствующий схеме граф с выделенной совокупностью независимых сечений для узловых напряжений приведен на рис. 31, б. Таких сечений шесть и, кроме того, в схеме имеется три Z -компонента (E, L, U_D), токи которых вводят в вектор переменных. Таким образом, искомая система уравнений схемы будет иметь 9-й порядок.

1. Вначале по описанной методике формируется субматрица проводимости, не принимая во внимание Z -компоненты:

adG_4			$-G_4$		
	G_1	$-G_1$			
	$-G_1$	G_1			
			G_2		
				G_3	
$-G_4$				G_4	

v_1
v_2
v_3
v_4
v_5
v_6
i_E
i_L
i_{UD}

 \cdot

J_C
$-J$

 $=$

2. Определяется инцидентность введенных токов $i_Z = (i_E, i_L, i_{UD})$ независимым сечениям, находится соответствующая подматрица инцидентности A_2 (5.15), по ней — A_2^t , которые вносятся в подматрицы N и M структуры модели (5.18):

				-1	
				1	
					1
					-1
					-1
					1
1	-1				
		-1	1		
				1	-1

v_1
v_2
v_3
v_4
v_5
v_6
i_E
i_L
i_{UD}

 \cdot

 $=$

3. В матрице модели схемы учитываются зависимые источники типа $I_i = nI_j$ и $U_i = mU_j$, а также собственные сопротивления Z -компонентов и источники, входящие в добавляемые компонентные уравнения. Параметр n проставляется на пересечении строк матрицы, определяемых вершинами включения ребра с током I_i зависимого источника, и столбца, соответствующего ребру с управляющим током I_j . Аналогично параметр m вписывается в элемент матрицы, расположенной на пересечении строки, определяемой ребром U_i (среди добавочных компонентных уравнений), и столбцов, соответствующих вершинам включения управляющего ребра U_j . На этом этапе

$x = [u_C i_L]^t$, соответствующих разностным переменным емкостных компонентов и потоковым переменным индуктивных компонентов, а остальные переменные объединяются в субвектор x_0 переменных безынерционных компонентов.

Тогда уравнения гибридной модели объекта приводятся к виду

$$\begin{bmatrix} pW_{11} + a_1 & W_{12} \\ a_2 & W_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} f. \quad (5.19)$$

Исключая x_0 и обращая матрицу W_{11} , получаем каноническую форму уравнений переменных состояния

$$px = \dot{x} = W_{11}^{-1} [(a_1 - W_{12}W_{22}^{-1}a_2)x - (b_1 - W_{12}W_{22}^{-1}b_2)f] = Ax + Bf. \quad (5.20)$$

Разделение и исключение зависимых переменных в (5.19) выполняется по следующей алгоритмической процедуре.

Представим (5.19) в виде

$$\begin{bmatrix} pW_{11} & W_{12} \\ 0 & W_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} f$$

или

$$W^{(0)}z^{(0)} = A^{(0)}X^{(0)} + B^{(0)}f, \quad z = [x, x_0]^t \quad (5.21)$$

и используем алгоритм Гаусса — Жордана для приведения матрицы $W^{(0)}$ к единичной форме.

Если в процессе преобразования матрица $W^{(0)}$ будет содержать нулевую j -ю строку среди строк подматрицы $W_{22}^{(0)}$, то составляющие субвектора x окажутся линейно зависимыми и, по крайней мере, одну переменную состояния нужно исключить.

В этом случае j -я строка принимает вид

$$[0] x_0 = [a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn}] x + [b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jm}] f.$$

Определяя первый ненулевой элемент a_{jk} , из уравнений (5.21) можно исключить переменную

$$x_k = -(a_{j1}x_1 + \dots + b_{j1}f_1 + \dots)/a_{jk} \quad (5.22)$$

и ее производную

$$\dot{x}_k = -(a_{j1}\dot{x}_1 + \dots + b_{j1}\dot{f}_1 + \dots)/a_{jk}. \quad (5.23)$$

Переменная x_k исключается при выполнении процедуры Гауссова исключения элемента в k -м столбце матрицы A (сведения их к нулевым значениям) с последующим вычеркиванием этого столбца. Исключение производной \dot{x}_k из правой части выражения (5.21) достигается вычеркиванием k -го столбца матрицы $W^{(0)}$ и подстановкой выражения (5.23) в k -ю строку уравнений (5.21), при этом оставшиеся члены $s = k + 1, \dots, n$ j -й строки матрицы A вносятся в k -ю строку подматрицы W_{11} , а члены $l = 1, \dots, m$ j -й строки матрицы B вносятся в k -ю строку дополнительной матрицы B_1 , соответствующей вектору f . В результате этого уравнения (5.21) принимают вид

$$W^{(1)}z^{(1)} = A^{(1)}X^{(1)} + B^{(1)}f + B_1^{(1)}\dot{f} \quad (5.24)$$

юся в окаймлении исходной матрицы новыми строками и столбцами. Например для матрицы A_{ik} размером $i \times k$, состоящей из суммы (разности) двух матриц, т. е. характеризующей пересечение двух подсистем,

$$A_{ik} = \begin{array}{|c|} \hline k \\ \hline A'_{ik} \pm A''_{ik} \\ \hline i \\ \hline \end{array} \quad (5.29)$$

операция развертывания заключается в добавлении к матрице k -й (i -й) блочной строки и k -го (i -го) блочного столбца. В результате

$$A_p = \begin{array}{|cc|} \hline k & k \\ \hline A'_{ik} & \pm A''_{ik} \\ \hline -1 & 1 \\ \hline i & i \\ \hline \end{array} \quad \text{или} \quad A_p = \begin{array}{|cc|} \hline k & k \\ \hline A'_{ik} & 1 \\ \hline \pm A''_{ik} & -1 \\ \hline i & i \\ \hline \end{array} \quad (5.30)$$

Окончательное преобразование приводят к виду (при удвоении столбцов и строк исходной матрицы)

$$A_p \Rightarrow \begin{array}{|ccc|} \hline k & k & k \\ \hline A'_{ik} & & 1 \\ \hline & \pm A''_{ik} & -1 \\ \hline -1 & 1 & \\ \hline i & i & i \\ \hline \end{array} \quad (5.31)$$

Используя метод исключения Гаусса по строкам и столбцам, из матриц (5.30) и (5.31) получают исходную матрицу (5.29).

Решение системы (5.26) сводится к предварительному получению и решению уравнений меньшей размерности относительно переменных связи

$$A^*x = b^*, \quad (5.32)$$

после чего переменные каждой подсистемы x_i^j определяются процедурой решения (5.26).

Существует несколько вариантов получения уравнения переменных связи (5.32).

Получение уравнения (5.32) на основе решения общей системы уравнений (5.26). В этом случае общая матрица A уравнений (5.26) записывается в виде

$$A = \hat{A} + CD + D^t D, \quad (5.33)$$

где

$$\hat{A} = \begin{array}{|cc|} \hline A_1 & \\ \hline A_2 & I \\ \hline \end{array}; \quad c = \begin{array}{|c|} \hline A_j \\ \hline A_2 \\ \hline \end{array}; \quad d^t = \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline I \\ \hline \end{array}. \quad (5.34)$$

Далее $m + 1$ раз (m — размерность вектора переменных связи x_2) решается система уравнений с треугольной матрицей

$$\hat{A}x^j = B^j, \quad j = 0, 1, \dots, m, \quad (5.35)$$

где $(B^0) = B^0 = b$ и $(B^j)_{j=1, \dots, m} = c^j$, при этом c^j — j -й столбец матрицы C .

целесообразность решения уравнений каждой подсхемы методом и шагом дискретизации, определяемыми свойствами этих уравнений.

Таким образом, методы диакоптики применительно к моделированию сложных систем позволяют реализовать идею разбиения системы на части, распараллелить моделирование отдельных частей, учитывая при этом различные инерционные свойства отдельных частей. В частности, рассмотренные подходы реализованы в программах моделирования CLASSIE и SPICE-V, позволяющих на матричной ЭВМ CRAY-1 анализировать большие интегральные схемы, содержащие тысячи транзисторов.

6 МЕТОДЫ АНАЛИЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТА

6.1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

В общем случае математическая модель объекта представляет собой систему нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений вида

$$F(x, \dot{x}, t) = 0, \quad (6.1)$$

где x — вектор переменных модели; F — вектор-функция.

Методы решения системы (6.1), обеспечивающие получение динамических и статических характеристик объекта, включают в себя процедуры численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений и решения систем нелинейных алгебраических уравнений. Выбор конкретных методов решения для каждой из этих процедур обуславливает вид формул алгебраизации и линеаризации компонентных соотношений.

Осуществляя алгебраизацию компонентных уравнений, содержащих производные по времени, с помощью выражений, аналогичных (5.10) — (5.11), преобразуем исходную систему уравнений (6.1) в систему нелинейных алгебраических уравнений

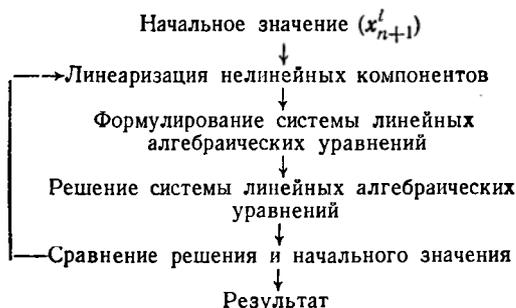
$$F(x_{n+1}, t_{n+1}) = 0. \quad (6.2)$$

Уравнения типа (6.2) используются для описания статических режимов объекта в целом

$$F(x, t) = 0. \quad (6.3)$$

Различие выражений (6.3) и (6.2) состоит в том, что в (6.2) вид функционала F зависит от интервала времени решения, в результате чего уравнение (6.2) решается на каждом временном шаге. Задача

Полный процесс решения нелинейных алгебраических уравнений включает следующие этапы:



Анализ уравнений модели объекта, по существу, сводится к многократному (сотни, а иногда тысячи раз) решению системы линейных алгебраических уравнений (6.6), в котором выделяются два цикла: внешний цикл временных итераций по индексу n , когда корректируются аппроксимации для производных по времени от переменных модели, и внутренний цикл итераций по индексу m , когда на каждом выбранном временном интервале с помощью метода Ньютона уточняется линейная аппроксимация нелинейных переменных модели. Внутренний цикл решения по индексу m имеет самостоятельное значение при анализе статических режимов работы.

Модификации метода Ньютона. Итерации Ньютона могут не сходиться, если начальное приближение вектора неизвестных x_{n+1}^0 , контролируемое проектировщиком объекта, окажется далеким от решения и, следовательно, определенное матрицей Якоби направление сходимости будет значительно отличаться от истинного. Поэтому на практике применяют различные модификации метода Ньютона. Для демпфирования колебаний составляющих вектора x в процессе итерационного решения систем (6.2) и (6.3) искусственно ограничивают величину шага приращения колеблющихся переменных

$$\hat{x}_i^{(m+1)} = x_i^{(m)} + \lambda (x_i^{(m+1)} - x_i^{(m)}), \quad (6.8)$$

где $x_i^{(m+1)}$ — полученное по выражению (6.4) значение i -й компоненты вектора x ; λ — демпфирующий параметр, выбираемый при сопоставлении на m и $(m+1)$ -й итерации знаков погрешности определения той составляющей вектора x , которая обусловила максимум относительной погрешности на m -й итерации, или же выбираемый при сопоставлении норм невязки $\|F\|$ на двух соседних итерациях [71].

Кроме того, при оценке приращений переменных математической модели объекта применяется модификация формулы (6.8), заключающаяся в выборе очередного приближения согласно выражению

$$\hat{x}_i^{(m+1)} = x_i^{(m)} + \text{sign}(\Delta x_i^{(m+1)}) \frac{r}{k} \ln [1 + k |\Delta x_i^{(m+1)}|], \quad (6.9)$$

где $\Delta x_i^{(m+1)} = x_i^{(m+1)} - x_i^{(m)}$, $\text{sign}(\Delta x_i^{(m+1)})$ — знак приращения; r и k — эмпирические константы.

где n — размерность решаемой системы уравнений (6.11); a, l, u — элементы матриц A, L и U соответственно.

После LU -преобразования матрицы A решение системы (6.11) заменяется последовательным решением двух систем линейных уравнений с треугольными матрицами:

$$\left. \begin{aligned} Ly &= b, \\ Ux &= y, \end{aligned} \right\}$$

которые решаются простой подстановкой

$$\left. \begin{aligned} y_i &= b_i - \sum_{s=1}^{i-1} l_{is} y_s, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ x_i &= \left(y_i - \sum_{s=i+1}^n u_{is} x_s \right) / u_{ii}, \quad i = n, n-1, \dots, 1. \end{aligned} \right\} \quad (6.14)$$

Для линейных систем уравнений очень большой размерности предпочтительно вместо LU -преобразования применять итерационный метод Гаусса — Зейделя. В матрице A системы уравнений (6.11) выделяются диагональная D , нижняя L и верхняя U треугольные составляющие, так что

$$A = D + L + U.$$

Затем на каждой m -й итерации решается треугольная система уравнений относительно каждой переменной

$$x_i^{m+1} = D_{ii}^{-1} (b_i - L_i \hat{x}^{m+1} - U_i x^m), \quad (6.15)$$

где L_i и U_i — i -е строки матриц L и U ,

а $\hat{x}^{m+1} = (x_1^{m+1}, \dots, x_{i-1}^{m+1}, x_i^{m+1}, x_{i+1}^m, \dots, x_n^m)^t$.

Уравнение (6.15) содержит только одну неизвестную переменную x_i^{m+1} , так как переменные $x_1^{m+1}, \dots, x_{i-1}^{m+1}, x_{i+1}^m, \dots, x_n^m$ уже определены к моменту вычислений. Этим достигается разбиение исходной системы уравнений на отдельные уравнения или их блоки (группы), что существенно повышает эффективность вычислений. В частности, такой подход реализован в современных программах моделирования сверхбольших интегральных схем (СБИС) типа DIANA, SPLICE.

Число итераций m и, следовательно, сходимость вычислений определяются величиной погрешности

$$\epsilon^{m+1} = \|x^{m+1} - x^m\|,$$

для которой справедливо соотношение

$$\epsilon^{m+1} = \|(1 - D^{-1}L) D^{-1}U\| \epsilon^m = \|M\| \epsilon^m,$$

из которого следует, что итерационный процесс вычислений будет сходиться для любых начальных значений x , если все собственные значения матрицы M по модулю меньше единицы.

В общем случае сходимость зависит от численных значений матриц L, D и U . Обычно быстро сходятся несколько первых итераций, а затем процесс замедляется, асимптотически следуя линейному закону.

Скорость сходимости можно повысить, если упорядочением строк и столбцов исходной матрицы A предварительно привести ее

Применяется также позиционное кодирование, когда каждому элементу матрицы присваивается только один номер (индекс), например по строкам:

1	2	...	...	n
$n+1$	$n+2$	...	...	$2n$
$2n+1$	$2n+2$	...	...	$3n$
...
n^2-n+1	...	...	...	n^2

В этом случае разреженная матрица представляется двумя массивами: ненулевых элементов VA и номеров этих элементов NR . Например для приведенной матрицы 6-го порядка

$$NR = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 3 & 6 & 8 & 15 & 18 & 19 & 23 & 26 & 31 & 36 \\ \hline \end{array},$$

$$VA = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline a_{11} & a_{13} & a_{16} & a_{22} & a_{33} & a_{36} & a_{41} & a_{45} & a_{52} & a_{61} & a_{66} \\ \hline \end{array}.$$

Дополнительно к рассмотренному применительно к процедуре LU -преобразования используется кодировка по способу строк и столбцов. В этом случае массив IC имеет индексы строк ненулевых элементов матрицы L и индексы столбцов НЭ матрицы U , а в массиве VA последовательно размещаются ненулевые элементы столбцов матрицы L и строк матрицы U . Границы участков массивов IC и VA , соответствующие НЭ отдельных столбцов матрицы L и НЭ отдельных строк матрицы U , фиксируются в массиве IR , длина которого увеличивается вдвое в сравнении с другими способами кодировки. Дополнительно формируется массив IVA , в котором указываются номера ячеек массива VA , содержимое которых изменяется в процессе LU -преобразования матрицы A .

Благодаря измененной форме упаковки матрицы, согласованной с последовательностью процесса LU -преобразования, отсутствуют логические операции и процедуры поиска обрабатываемых НЭ на каждом шаге вычислений. Формируемые элементы матрицы L и U записываются на позиции обработанных элементов матрицы A , что экономит массив используемой памяти.

Необходимость принятия специальных мер для сохранения разреженности уравнений модели объекта в процессе их решения объясняется тем, что при LU -преобразовании матрицы A возможно появление новых ненулевых элементов (ННЭ) и их количество зависит от того, какие из элементов матрицы A и в какой последовательности будут выбраны в качестве главных.

При многократном решении (6.11) процесс LU -преобразования целесообразно построить так, чтобы по возможности уменьшить количество ННЭ и изменений в имеющихся ненулевых элементах (ИНЭ). Таким образом, сокращается число арифметических операций при решении системы (6.11), а значит, повышается точность решения и уменьшаются затраты памяти, необходимые для хранения информации о системе уравнений (6.11) и (6.6). Оптимизация процесса LU -преобра-

При многократном решении уравнений (6.11) важно учитывать не только разреженность их матриц, но и частоту изменения элементов этих матриц. Коэффициенты уравнений объекта образуются из вкладов нелинейных, реактивных и постоянных его компонентов, а также величин ± 1 (п. 5.2). Величины вкладов в матрицу A системы (6.11) нелинейных компонентов изменяются при решении уравнений объекта наиболее часто (переоцениваются на каждой итерации Ньютона), вклады линейных реактивностей изменяются реже (на каждом временном шаге), а вклады постоянных компонентов остаются неизменными до завершения анализа данного варианта решения. Учет характера компонентов объекта, участвующих в образовании элементов матрицы A , дает возможность прогнозировать частоту их изменения и учитывать эту информацию на всех этапах обработки уравнений модели. При этом каждому ненулевому элементу матрицы A соответствует некоторое целое число, характеризующее его тип: 1, 2 — для элементов ± 1 соответственно; 3 — для постоянного элемента; 4 — для элемента, величина которого изменяется во времени; 5 — для нелинейного элемента, зависящего от составляющих вектора переменных модели объекта.

Учет частоты изменения элементов математических моделей исследуемых объектов оказывает влияние на используемую стратегию упорядочения, поскольку становится выгодным минимизировать при упорядочении количества ННЭ и ИНЭ высших типов. Поэтому в процессе упорядочения строкам и столбцам матрицы уравнений объекта, среди которых определяется главный элемент, также присваиваются типы (они определяются максимальными типами элементов, находящихся в этих строках и столбцах). Тогда среди нескольких элементов матрицы, удовлетворяющих критерию (6.18) и проверке по абсолютной величине, в качестве главного выбирается тот элемент, строка и столбец которого имеют минимальный тип.

Среди дополнительных эффективных мер, принимаемых для обеспечения численной устойчивости процесса решения разреженных систем (6.11), следует отметить метод диагональной модификации (МДМ) и выделение в нижнем правом углу матрицы A заполненного субблока, при LU -разложении которого главные элементы выбираются по всему его полю.

Метод диагональной модификации не нарушает однородности процесса решения системы вида (6.11) и не требует проведения перестановок их строк и столбцов. В соответствии с МДМ при появлении на главной диагонали решаемой системы уравнений малого по величине элемента (например, a_{kk}) его модифицируют добавлением некоторой константы g_k и продолжают вычисления с модифицированной матрицей:

$$A' = A + e_k g_k e_k^t,$$

где e_k — единичный вектор, элементы которого равны нулю, кроме k -го, равного единице.

Для получения истинного решения модифицированной системы уравнений должна быть решена столько раз с различными векторами правых частей, сколько диагональных модификаций было выполнено в исходной системе. Например, при однократном использовании МДМ

При этом, полагая на входе объекта синусоидальный источник единичной амплитуды и нулевой фазы, получаем значения действительной и мнимой составляющих передаточной характеристики T на частоте ω_k как соответственно действительную и мнимую части реакции схемы x_k :

$$T(j\omega) = \operatorname{Re} x_k + j \operatorname{Im} x_k,$$

откуда легко определяются значения амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик объекта:

$$T(\omega) = |T(j\omega)| = \sqrt{(\operatorname{Re} x_k)^2 + (\operatorname{Im} x_k)^2}.$$

Таким образом, решив уравнения объекта (6.23) на частоте $\omega = \omega_k$, можно определить значение всех интересующих проектировщика передаточных функций от одного входа к произвольному числу выходов. Если необходимо найти передаточные функции от разных входов, то для каждого из них необходимо повторить прямой и обратный ход решения уравнений объекта (6.23) с соответствующей правой частью.

Передаточные функции линейных объектов получают на основе уравнений их моделей также в виде отношения полиномов комплексной переменной p , т. е. $T(p) = A(p)/B(p)$. В этом случае для последнего нахождения частотно-временных характеристик удобным оказывается метод полюсов и нулей [71], которые, в частности, могут быть найдены с помощью QR -алгоритма как собственные значения матриц уравнений модели проектируемого объекта.

Чувствительность. Исследование чувствительности выполняется, как правило, в сочетании с каким-либо основным видом анализа (статическим, динамическим, частотным), который оказывает существенное влияние на выбор конкретной методики расчета функций чувствительности $dy/d\xi_i$ или коэффициента влияния параметра ξ_i на выходную характеристику объекта γ .

В настоящее время при решении задач моделирования чувствительности наиболее часто применяются различные модификации методов присоединенных объектов, моделей чувствительности и вариационный метод. В общем случае инженерный объект описывается совокупностью уравнений независимых сечений или контуров, в которые частично или полностью введены компонентные соотношения (п. 5.2):

$$\left. \begin{aligned} i - \varphi_1(i, \xi) &= 0, \\ u - \varphi_2(i, \xi) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.24)$$

где i, u — вектора потоковых и разностных переменных модели объекта; ξ — вектор варьируемых параметров.

Модель чувствительности для объекта получают дифференцированием (6.24) по ξ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i}{\partial \xi} - \frac{\partial \varphi_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \xi} &= \frac{\partial \varphi_1}{\partial \xi}, \\ \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial \xi} &= \frac{\partial \varphi_2}{\partial \xi}. \end{aligned} \right\} \quad (6.25)$$

Если объект описывается некоторой интегральной характеристикой

$$\gamma(\xi) = \int_0^T g(i, u, \xi, t) dt,$$

то отдельные составляющие градиента такой характеристики представляются в виде

$$\frac{\partial \gamma(\xi)}{\partial \xi_j} = \int_0^T \left(\frac{\partial g}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial g}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \xi_j} + \frac{\partial g}{\partial \xi_j} \right) dt, \quad (6.29)$$

где составляющие $\partial i / \partial \xi_j$ и $\partial u / \partial \xi_j$ определяются как реакции соответствующей модели чувствительности.

В результате однократного анализа модели чувствительности формируется соответствующий столбец матрицы первых производных

$$J = \left[\begin{array}{cccc} \dots & \frac{\partial i_1}{\partial \xi_j} & \dots & \\ \dots & \vdots & \dots & \\ \dots & \frac{\partial u_1}{\partial \xi_j} & \dots & \\ \dots & \vdots & \dots & \\ \dots & \vdots & \dots & \end{array} \right] n. \quad (6.30)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_m$

Если необходимо одновременно выделить все функции чувствительности одной переменной объекта по всем варьируемым параметрам, т. е. выделить строку матрицы J (6.30), например

$$\left[\frac{\partial i_k}{\partial \xi_1}, \frac{\partial i_k}{\partial \xi_2}, \dots, \frac{\partial i_k}{\partial \xi_m} \right],$$

то применяют метод присоединенных объектов [71].

Из уравнения (6.26) можно найти полную матрицу (6.30):

$$J = \begin{bmatrix} i' \\ u' \end{bmatrix} = A^{-1}B, \quad (6.31)$$

где $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]^t$.

Умножая выражение (6.31) на квадратную матрицу I_k с k -м столбцом, содержащим единичные элементы, получим:

$$y'_k = I'_k J = I'_k A^{-1} B = [(A^t)^{-1} 1_k]^t B = \hat{y}'_k B = \hat{y}'_k y_k, \quad (6.32)$$

где y'_k соответствует i'_k или u'_k .

Вектор $\hat{y}'_k = [\hat{i}'_k \hat{u}'_k]$ находим из решения уравнений присоединенного объекта типа

$$[A^t] \begin{bmatrix} \hat{i}'_k \\ \hat{u}'_k \end{bmatrix} = 1_k, \quad (6.33)$$

которые различаются формулами вычисления следующего приближения, способами оценки локальной погрешности, стратегией выбора шага (порядка), правилами принятия решения о преемственности решения [75]. Сложность современных инженерных объектов требует применения при их моделировании в САПР (особенно в случаях, когда математические модели имеют сильно разнесенные собственные значения) мощных методов интегрирования или даже различных комбинаций отдельных методов, обеспечивающих автоматический выбор и смену методов (например, явных и неявных) в процессе решения исследуемой системы дифференциальных или алгебро-дифференциальных уравнений.

Формулы вычисления следующего приближения. Методы интегрирования можно разделить на две большие группы: одношаговых методов (например, Эйлера, Рунге—Кутта) и многошаговых методов (прогноза—коррекции, Адамса, Гира). Это разделение обусловлено количеством информации о предыдущих значениях интегрируемой функции $x_{n-k}, x_{n-k+1}, \dots, x_{n-1}$, используемой для нахождения приближения x_n к точному значению $x(t_n)$ с помощью соответствующих разностных формул.

Методы численного интегрирования разделяются на явные и неявные в зависимости от того, используется ли в соответствующих разностных формулах приближения для x_n производная $x_{n-1} = \varphi(x_{n-1}, t_{n-1})$ или $x_n = \varphi(x_n, t_n)$.

Разбивая интервал интегрирования (t_0, T) на отдельные временные участки $h = t_k - t_{k-1}$, $k = 1, 2, \dots, N$ и интегрируя выражение (6.36), получаем для интервала времени t_{k-q}, t_{k+p} :

$$x_{k+p} = x_{k-q} + \int_{t_{k-q}}^{t_{k+p}} \varphi[x(\tau), \tau] d\tau. \quad (6.37)$$

Если заменить $\varphi[x(\tau), \tau]$ некоторым интерполяционным полиномом, принимающим значения $x_n = \varphi(x_n, t_n)$ на множестве точек t_n , то из (6.37) получим различные формулы численного интегрирования.

Применим, например, интерполяционный полином в форме Ньютона, использующий обратные разности высоких порядков,

$$P(t) = \sum_{j=0}^l (-1)^j \binom{-s}{j} \nabla^j \varphi_k, \quad (6.38)$$

где

$$\begin{aligned} \nabla^{(0)} \varphi_k &= \varphi_k, \\ \nabla^{(p)} \varphi_k &= \nabla^{(p-1)} \varphi_k - \nabla^{(p-1)} \varphi_{k-1}, \\ s &= \frac{t-t_k}{h}, \quad \binom{t}{j} = \frac{t(t-1)\dots(t-j+1)}{j!}. \end{aligned}$$

Подставляя полином (6.38) и (6.37), получаем

$$x_{k+p} = x_{k-q} + h \sum_{j=0}^l \alpha_j \nabla^{(j)} \varphi_k, \quad (6.39)$$

где

$$P_{k+1} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{x_{k+1}^{(m)}} = 1 - h\beta_0^* \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_{x_{k+1}^{(m)}} = 1 - h\beta_0^* J_{k+1}^{(m)}, \quad (6.46)$$

$J_{k+1}^{(m)}$ — матрица Якоби решаемой системы уравнений (6.36).

В качестве начального приближения $x_{k+1}^{(0)}$ удобно выбирать значение вектора переменных, предсказанное с помощью формулы явного метода (6.41). Комбинированный процесс использования формул (6.41) и (6.43) называется методом прогноза-коррекции, в котором явный метод (6.41) называется предсказывающим, а неявный (6.43) — корректирующим. Очевидно, что решение нелинейного алгебраического уравнения (6.44) можно заменить многократной последовательной оценкой x_{k+1} по формуле (6.43) с учетом начального значения, определенного по (6.41), до тех пор, пока не будет достигнута сходимость, причем

$$x_{k+1}^{(m+1)} = x_k + h [\beta_0^* \Phi(x_{k+1}^{(m)}, t_{k+1}) + \beta_1^* \Phi(x_k, t_k) + \dots + 1]. \quad (6.47)$$

По точности и по вычислительным затратам в таких случаях, как правило, наблюдаются потери.

Формулы, аналогичные (6.43) и (6.41), можно вывести и для общего случая, когда происходит изменение шага h и порядка r формулы, если интерполяционный полином в (6.37) выразить через разделенные разности.

Основываясь на (6.39) и выбирая значения для p , q и r , можно получить другие формулы численного интегрирования. В частности, для линейных многшаговых методов в общем случае справедливо выражение

$$x_{n+1} = \sum_{i=0}^q a_i x_{n-i} + h \sum_{i=-1}^q b_i \Phi(x_{n-i}, t_{n-i}), \quad (6.48)$$

которое соответствует как явным ($b_{-1} = 0$), так и неявным ($b_{-1} \neq 0$) методам.

На основе (6.48) получена неявная формула Гира для жестких дифференциальных уравнений [71]:

$$x_{n+1} = hb_{-1} \Phi(x_{n+1}, t_{n+1}) + \sum_{i=1}^k a_i x_{n-i}, \quad k \leq 6, \quad (6.49)$$

из которой легко определяется аппроксимация для производной

$$x_{n+1} = -\frac{1}{h} \sum_{i=0}^k \alpha_i^* x_{n+1-i}, \quad (6.50)$$

коэффициенты которой в предположении, что вычисления ведутся с переменным шагом, следующие:

$$\alpha_i^* = \left(\frac{t_n - t_{n-1}}{t_n - t_{n-i}} \right) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k \left(\frac{t_n - t_{n-j}}{t_{n-i} - t_{n-j}} \right), \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

Соответствующая ей формула прогноза, аналогичная (6.41), при использовании разделенных разностей

$$x_{n+1}^{(0)} = \sum_{i=1}^{k+1} \gamma_i x_{n+1-i}, \quad (6.51)$$

откуда

$$\nabla_n x_n = x_n - x_{n-1},$$

$$\nabla_n^2 x_n = x_n - x_{n-1} - \rho_1 \nabla_{n-1} x_{n-1},$$

.....

$$\nabla_n^{k+1} x_n = x_n - x_{n-1} - \rho_1 \nabla_{n-1} x_{n-1} - \dots - \rho_k \nabla_{n-1}^k x_{n-1}.$$

Формулы типа (6.50), (6.52) и (6.55) можно использовать в алгебро-дифференциальной системе уравнений (6.1) для сведения ее к системе нелинейных алгебраических уравнений (6.2), соответствующей времен-

Таблица 14. А (α) — устойчивость многошаговых неявных формул численного интегрирования

q	$k=1$	2	3	4	5	6	7
1	90°	90°	86°	74°	52°	18°	0
1.01	90°	90°	85°	72°	48°	10°	0
1.02	90°	90°	85°	71°	45°	1°	0
1.05	90°	90°	83°	65°	32°	0	0
1,1	90°	89°	81°	55°	1°	0	0
1,2	90°	87°	70°	25°	0	0	0
1,5	90°	75°	25°	0	0	0	0
2,0	90°	50°	0	0	0	0	0

ной точке t_{n+1} . Последняя решается методом Ньютона с использованием (6.51), (6.53) и (6.54) для оценки начального значения искомого вектора неизвестных $x_{n+1}^{(0)}$.

Формулы (6.50), (6.52) и (6.55) эквивалентны, а между их коэффициентами существует однозначная связь. Например, формула второго порядка ($k=2$) для каждого метода приводится к виду, аналогично формуле Шихмана [50]:

$$x_{n+1} = \frac{(t_{n+1} - t_{n-1})(t_{n+1} - t_n)}{(2t_{n+1} - t_n - t_{n-1})} \dot{x}_{n+1} + \frac{(t_{n+1} - t_{n-1})^2}{(2t_{n+1} - t_n - t_{n-1})} x_n - \frac{(t_{n+1} - t_n)^2}{(2t_{n+1} - t_n - t_{n-1})} x_{n-1}. \quad (6.56)$$

Об эквивалентности методов (6.50), (6.52) и (6.55) свидетельствует и их одинаковая численная устойчивость при $k \leq 6$. Известно, что при $k \leq 2$ эти методы обладают А-устойчивостью, т. е. область их абсолютной устойчивости включает всю левую полуплоскость $\text{Re}(h\lambda) < 0$, где λ — собственные значения матрицы Якоби для правой части уравнения (6.36). Для $k=3, \dots, 6$ они, с одной стороны, А (α) — устойчивы, т. е. область их абсолютной устойчивости включает бесконечный клин $|\arg(-h\lambda)| < \alpha$, а с другой, — жестко устойчивы, поскольку область их абсолютной устойчивости ограничена частью левой полуплоскости. При этом в начале координат обеспечивается устойчивость и точность. В табл. 14 приведены значения α для формул различных

h в степени $k + 2$ и выше и которыми обычно пренебрегают, C_{k+1} — константа, характеризующая численный метод.

Выражение (6.60) неудобно для применения, поэтому для оценки локальной погрешности применяют различные косвенные методы. Прежде всего, производные высоких порядков можно выразить приближенно через разности высоких порядков, используемые, например в (6.55):

$$\varepsilon_T = \frac{h}{t_{n+1} - t_{n-k}} \nabla_{n+1}^{k+1} x_{n+1} = \frac{1}{t_{n+1} - t_{n-k}} \left(x_{n+1} - \sum_{i=0}^k \varphi_i \nabla_n^i x_n \right). \quad (6.61)$$

Далее можно применить экстраполяцию значений переменных $x_{n+1}(h)$ и $x_{n+1}(h/2)$, полученных интегрированием от точки t_n до точки t_{n+1} один раз с шагом h и другой раз с шагом $h/2$, причем

$$\varepsilon_T = \frac{x_{n+1}(h) - x_{n+1}(h/2)}{h(1 - 2^{-k})}, \quad (6.62)$$

где k — порядок используемого метода интегрирования.

Наконец, можно использовать способ вложенных методов, когда на каждом шаге интегрирование выполняется дважды: методом порядка k и методом порядка $k + 1$. Разность полученных значений $x_{n+1}^{(k)}$ и $x_{n+1}^{(k+1)}$ дает оценку величины локальной погрешности

$$\varepsilon_T = \frac{x_{n+1}^{(k+1)} - x_{n+1}^{(k)}}{h}. \quad (6.63)$$

Здесь, как и в случае экстраполяции, имеется выбор: продолжать вычисления по значению, полученному методом порядка k , или методом порядка $k + 1$.

Если учесть, что формулы прогноза (6.51), (6.53) и (6.54) имеют порядок на единицу больше, чем основные расчетные составляющие типа (6.51), (6.52) и (6.54), то к способу вложенных методов можно отнести оценку локальной погрешности вида

$$\varepsilon_T = \frac{h}{t_{n+1} - t_{n-k}} (x_{n+1} - x_{n+1}^{(0)}). \quad (6.64)$$

Отметим, что в (6.64) входит то же значение x_{n+1}^0 , которое используется в итерациях Ньютона при решении нелинейного уравнения (6.2). Справедливость (6.64) непосредственно вытекает из (6.61), если учитывать (6.54). Чаще всего исходными при моделировании являются интервал интегрирования $T(t_0, t_0 + T)$ и максимальная допустимая погрешность вычислений E_{\max} на этом интервале. Тогда допустимая на единичном шаге вычислений локальная погрешность определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{E_{\max}}{T} \leq \frac{\varepsilon_T}{h}. \quad (6.65)$$

Стратегия выбора шага (порядка). Подставляя (6.60) в (6.65), находим взаимосвязь максимально допустимой локальной погрешности на единичном шаге вычислений ε с максимальным размером шага h :

$$\varepsilon = [C_{k+1} x^{(k+1)}(\tau)] h^k, \quad (6.66)$$

На основании одного из выражений (6.60) или (6.64) оценивается погрешность вычисления каждой составляющей вектора x сразу для методов трех ближайших порядков

$$\varepsilon_{k-1}, \varepsilon_k, \varepsilon_{k+1}, \quad 1 \leq k \leq 6. \quad (6.68)$$

Далее выбираются погрешности, соответствующие наименее точным составляющим вектора переменных x :

$$e_1 = \max \varepsilon_{k-1}, \quad e_2 = \max \varepsilon_k, \quad e_3 = \max \varepsilon_{k+1}.$$

Порядок метода после каждых k шагов вычислений выбирается равным порядку, при котором величина e_i минимальна ($i = 1, 2, 3$). Новое значение шага h определяется в соответствии с (6.67). Шаг вычислений при неизменном порядке метода корректируется не сразу, а только по достижении определенных соотношений между действительной и заданной погрешностями вычислений, а также используемом и разрешенном значениями шага интегрирования. В соответствии с табл. 11 частые и большие изменения h не разрешаются, при этом $q_{\text{доп}} = h_j/h_{j-1} = \frac{k+1}{\sqrt{4}}$. Изменение h и k не разрешается также для $(k+1)$ шагов после последнего изменения h .

Для начала интегрирования используется метод при $k = 1$. По мере увеличения длины шага до максимально возможной порядок постепенно достигает оптимальной величины. Если порядок выбран ошибочно слишком большим, то уменьшаются различия погрешностей e_i вычисления вектора переменных, по которым выбирается порядок метода, при этом в одной и той же точке программа отвергает несколько шагов с последовательно уменьшающейся длиной, а затем продолжает счет.

Суть стратегии переменных шага и порядка состоит в возможности их автоматического выбора. Программа адаптируется к решаемой задаче в зависимости от характера последней.

Другая стратегия изменения h и k описана в [50]. Она также обеспечивает максимизацию временного шага, но достигает это следующим образом.

На основании (6.61) применительно к алгоритму (6.55) оценивается погрешность каждой составляющей вектора переменных x для методов 1, 2, ..., $k+1$ порядков:

$$e^1, e^2, \dots, e^k, \quad 1 \leq k \leq 6. \quad (6.69)$$

Среди вычисленных погрешностей выбираются погрешности, соответствующие наименее точным компонентам вектора x ,

$$e_i = \max (e^i), \quad i = 1, 2, \dots, k+1,$$

и порядок метода выбирается равным порядку, при котором величина e_i ($i = 1, 2, \dots, k+1$) минимальна.

Новый временной шаг определяется по формуле

$$h_j = \sqrt{\frac{e_i}{E_{ik}}} h_{j-1}, \quad (6.70)$$

где

$$e_i = |\delta x_i|; \quad E_{ik} = \frac{h}{t_{n+1} - t_{n-k}} (x_{(n+1)k} - x_{(n+1)k}^0);$$

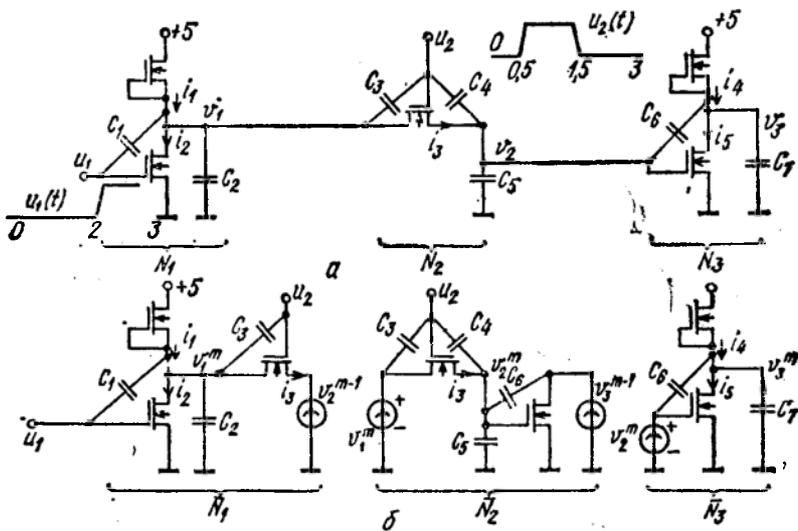


Рис. 35. Схема сдвигового регистра (а) и ее декомпозиция для m -й итерации релаксационного метода (8.71).

Рассмотрим электронную схему динамического сдвигового регистра на МОП-транзисторах (рис. 35, а). При предположении, что все емкости в схеме линейны, соответствующая система уравнений модели схемы принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} (C_1 + C_2 + C_3) \dot{v}_1 - i_1(v_1) + i_2(v_2, u_1) + i_3(v_1, u_2, v_2) - \\ - C_1 \dot{u}_1 - C_3 \dot{u}_2 = 0; \\ (C_4 + C_5 + C_6) \dot{v}_3 + C_6 \dot{v}_3 - i_3(v_1, u_2, v_2) - C_4 \dot{u}_2 = 0; \\ (C_6 + C_7) \dot{v}_3 - C_6 \dot{v}_2 - i_4(v_3) + i_5(v_3, v_2) = 0, \end{aligned} \right\} (6.72)$$

где v_i — узловые напряжения ($i = 1, 2, 3$); u_j — входные воздействия ($j = 1, 2$), эпюры которых приведены на рис. 35, а.

Применяя алгоритм (6.71) к уравнениям (6.72) для m -й итерации,

$$\left. \begin{aligned} (C_1 + C_2 + C_3) \dot{v}_1^m - i_1(v_1^m) + i_2(v_1^m, u_1) + i_3(v_1^m, u_2, v_2^{m-1}) - \\ - C_1 \dot{u}_1 - C_3 \dot{u}_2 = 0; \\ (C_4 + C_5 + C_6) \dot{v}_3^m - C_6 \dot{v}_3^{m-1} - i_3(v_1^m, u_2, v_2^m) - C_4 \dot{u}_2 = 0; \\ (C_6 + C_7) \dot{v}_3^m - C_6 \dot{v}_2^m - i_4(v_3^m) + i_5(v_3^m, v_2^m) = 0. \end{aligned} \right\} (6.73)$$

Система уравнений (6.73) графически изображена на рис. 35, б, из которого следует, что использование рассмотренного релаксационного метода разделяет исходную схему на несколько подсхем. С помощью методов численного интегрирования каждая из выделенных подсхем анализируется для всего временного интервала интегрирования перед тем, как перейти к анализу следующей подсхемы.

Если предположим, что в исходной схеме рис. 35, а имеются три подсхемы N_1 , N_2 и N_3 , то выделенные релаксационным методом подсхемы \bar{N}_1 , \bar{N}_2 и \bar{N}_3 (рис. 35, б) по существу соответствуют подсхемам

эксплуатации моделирующих программ на примере СПАРС [47] показал, что основные параметры настройки следующие:

— минимальный шаг интегрирования $MINSTEP$, являющийся фильтром высоких частот изменения переменных, не интересующих разработчика. Величина $MINSTEP$ выбирается произвольно, однако его сильное уменьшение может привести к замедлению расчетов, а увеличение — к снижению точности;

— порядок метода интегрирования $ORDER$, который может фиксироваться или изменяться до $k \leq 6$, что существенно сказывается при ожесточении требований к погрешности метода интегрирования и усложнения реакции исследуемого объекта;

— показатель $REIS$, используемый при оценке необходимости отбрасывания текущего шага при анализе объекта во временной области. Число отброшенных шагов зависит от сложности исследуемых зависимостей, но обычно не превышает 10...20 % общего числа шагов;

— относительная погрешность $CONVTA$ итераций Ньютона при расчете динамики, влияющая на суммарное число итераций и, следовательно, на общее время расчетов;

— показатель $XMAX$, или исходное значение максимальной величины составляющих вектора неизвестных, которая является пороговым значением абсолютного изменения переменных. Выбор ее величины зависит от используемой системы единиц. Во всех случаях снижение $XMAX$ приводит к повышению точности результатов расчета и увеличению времени вычислений;

— относительная локальная погрешность метода интегрирования $TRUN$, определяющая условия выбора нового временного шага и влияющая на общее число временных шагов. Чрезмерное ее уменьшение приводит к большим временным затратам на проведение расчетов.

Выбор отмеченных параметров позволяет эффективно управлять процессами интегрирования, изменяя суммарное время вычислений в несколько раз.

Кроме рассмотренных возможностей управления характеристиками, влияющими на качество работы исполнительных процедур, существуют управляющие параметры, изменяющие режим вычислений. Например, параметр $DAMP$ для изменения режима демпфирования колебаний переменных на итерациях по Ньютону, параметр IVZ для изменения частоты переоценки матрицы Якоби, параметр $TA YDC$ для изменения режима расчета статике и перехода к методу продолжения решения по параметру и др.

— Таким образом, существующие возможности управления характеристиками основных исполнительных процедур обеспечивают достаточно полный комплекс мер, повышающий надежность подсистемы инженерного анализа. Как показывает опыт, наличие подобных средств влияния проектировщика на исполнительные подпрограммы позволяют увеличить степень их универсальности. Это существенно сказывается на эффективности процедуры моделирования при работе с широким ассортиментом нелинейных инженерных объектов.

каждой из частных целевых функций Φ_j , заданной весовыми коэффициентами W_j , то многокритериальная задача параметрической оптимизации сводится к минимизации обобщенной ЦФ вида

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^m W_j \Phi_j(x). \quad (7.3)$$

Необходимые условия решения задачи условной оптимизации (7.2) для выпуклых функций $\Phi(x)$, заданных (7.3), строго определяются теоремой Куна — Таккера [42, 49, 79]. Точка $x = x^*$ является точкой локального экстремума функции $\Phi(x)$ при заданных ограничениях, если Φ , A_i и B_k дифференцируема в точке x^* и существуют векторы $\lambda^* = \{\lambda_1^*, \dots, \lambda_n^*\}$ и $u^* = \{u_1^*, \dots, u_N^*\}$, при которых выполняются условия

$$\left. \begin{aligned} B_k(x^*, y) &= 0, \quad k = 1, \dots, N; \\ \lambda_i^* &\geq 0; \\ A_i(x^*, y) &\geq 0, \quad i = 1, \dots, M; \\ \lambda^* A_i(x^*, y) &= 0; \\ \frac{\partial \Phi(x^*)}{\partial x} - \sum_{i=1}^M u_i^* \frac{\partial A_i(x^*, y)}{\partial x} - \sum_{k=1}^N \lambda_k^* \frac{\partial B_k(x^*, y)}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

Методы решения задач (7.1) значительно лучше разработаны и теоретически обоснованы, чем методы условной оптимизации. Поэтому использование мощного аппарата безусловной оптимизации для решения задач вида (7.2) обусловило появление большой группы методов штрафов, сводящих задачу (7.2) к решению одной или нескольких безусловных задач вида

$$\Phi_0(x^*) = \min_x \{\Phi(x) + \Phi_{\text{шт}}(x)\}, \quad (7.5)$$

где $\Phi_{\text{шт}}(x)$ — функция штрафа, с помощью которой контролируется выполнение ограничений. Если они выполняются, то $\Phi_{\text{шт}}(x) = 0$.

В случаях, когда возникают затруднения при оценке важности отдельных частных ЦФ, исходная многокритериальная задача может быть представлена в виде условной минимаксной задачи

$$\min_x \max_j \Phi_j(x), \quad j = 1, \dots, m \quad (7.6)$$

при заданных ограничениях. Необходимые условия экстремума задачи (7.6) возможно также получить с помощью теоремы Куна — Таккера:

$$B_k(x^*, y) = 0, \quad k = 1, \dots, N; \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{1j}^* &\geq 0, \quad \lambda_{2j}^* \geq 0, \quad \sum_{i=1}^m \lambda_{ij}^* = 1; \\ \lambda_{1j}^* [\Phi_j(x^*) - \max_i \Phi_i(x^*)] &= 0, \quad j = 1, \dots, m; \\ \lambda_{2i}^* A_i(x^*, y) &= 0, \quad i = 1, \dots, M; \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^m \lambda_{1j}^* \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_s} - \sum_{i=1}^M \lambda_{2i}^* \frac{\partial A_i(x^*, y)}{\partial x_s} - \sum_{k=1}^N u_k^* \frac{\partial B_k(x^*, y)}{\partial x_s} = 0, \quad s = 1, \dots, n.$$

Преимуществами методов случайного поиска является слабая зависимость результата поиска от координат начальной точки $x^{(0)}$ и от количества варьируемых параметров. Достоинством их также является то, что для определения направления уменьшения $\Phi(x)$ используется информация только о значениях ЦФ. При использовании методов случайного поиска, хотя и быстро локализуется область экстремума, но внутри ее скорость сходимости методов резко уменьшается. Поэтому целесообразно использовать методы случайного поиска лишь на некоторых начальных этапах решения экстремальных задач, а в дальнейшем решении предпочтительнее регулярные методы.

Регулярные методы. Большинство регулярных методов поиска экстремума многопараметрических функций с учетом особенностей используемого математического аппарата и объема информации, требуемого для определения координат новой текущей точки поиска $x^{(k+1)}$, относятся к одной из следующих групп: прямых методов поиска, не использующих производных ЦФ; методам сопряженных направлений, не использующих производных ЦФ; градиентным методам; методам сопряженных градиентов, использующим первые производные ЦФ; ньютоновским методам; квазиньютоновским методам; быстросходящимся методам, использующим две и более старшие производные ЦФ.

Стратегии построения прямых методов поиска экстремума $\Phi(x)$, не использующих производные ЦФ, заключается в поочередном изменении каждой составляющей вектора x , до достижения минимума. Простейшим примером этой группы методов является алгоритм покоординатного спуска (метод Гаусса — Зейделя), заключающийся в циклической минимизации $\Phi(x)$ вдоль каждого из направлений, задаваемого координатными осями вектора x . Итерационная формула метода Гаусса — Зейделя

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \sum_{i=1}^n \alpha_i^{(k)} S_i^{(k)},$$

где $S_i^{(k)}$, $i = 1, \dots, n$ — система направлений вида

$S_1^{(k)} = (1, 0, \dots, 0)$; $S_2^{(k)} = (0, 1, \dots, 0)$; \dots ; $S_n^{(k)} = (0, 0, \dots, 1)$;
 $\alpha_i^{(k)}$ — скалярные коэффициенты, определяемые из решения задачи

$$\Phi(x_{i-1}^{(k)} + \alpha_i^{(k)} S_i^{(k)}) = \min_{\alpha_i} \Phi(x_{i-1}^{(k)} + \alpha_i^{(k)} S_i^{(k)}), \quad i = 1, \dots, n.$$

Преимуществом прямых методов поиска, не использующих производные ЦФ, является простота их программирования, и как следствие этого, небольшой объем оперативной памяти ЭВМ.

Однако большинство этих методов обладают малой скоростью сходимости и не гарантируют определения координат стационарных точек (даже при $k \rightarrow \infty$, где k — номер шага). Кроме того, многие из них неудобны в случаях минимизации «овражных» ЦФ и ЦФ со штрафами типа (7.5) [11]. Лучшей характеристикой по сравнению с ранее описанными процедурами обладают методы сопряженных направлений, не использующие производные ЦФ. С помощью этих алгорит-

поиска, т. е. путем решения задачи

$$\min_{\lambda \in \{0, \infty\}} \Phi \{x^{(k)} + \lambda^{(k)} \Phi' (x^{(k)})\}.$$

Для такого случая имеются и теоретические оценки скорости сходимости метода наискорейшего спуска, утверждающие, что последовательность точек, вычисленная с помощью (7.9), сходится к стационарной точке при $k \rightarrow \infty$, где k — номер шага. Это же характерно и для других градиентных методов.

Метод наискорейшего спуска, как и большинство других градиентных алгоритмов, оказывается практически малоприменимым для минимизации «овражных» ЦФ. Кроме того, как показывают экспериментальные исследования, эти алгоритмы хорошо сходятся лишь на начальных этапах поиска экстремума $\Phi(x)$, когда текущие рабочие точки $x^{(k)}$ расположены на достаточно большом расстоянии от точки оптимума x^* .

Значительно большей скоростью сходимости по сравнению с градиентными алгоритмами обладают методы сопряженных градиентов. Идея построения этих алгоритмов состоит в минимизации ЦФ $\Phi(x)$ на k -м шаге поиска вдоль направления $S^{(k)}$, определяемого линейной комбинацией текущего направления наискорейшего спуска $\Phi(x^{(k)})$ и $k-1$ предыдущих направлений уменьшения $\Phi(x)$. Причем в используемой линейной комбинации направлений поиска коэффициенты выбираются таким образом, чтобы $S^{(k)}$ было сопряжено по отношению к $S^{(0)}, \dots, S^{(k-1)}$. Этим достигается одновременное использование основного преимущества сопряженных направлений, гарантирующего сходимость последовательности (7.8) к точке оптимума x со сверхлинейной скоростью для ЦФ общего вида (необходима только гладкость и выпуклость $\Phi(x)$, и свойств направления антиградиента. Сверхлинейная сходимость определяется соотношением

$$\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| < C_k \|x^{(k)} - x^{(k-1)}\|$$

для $k \geq k_c$ и $C_k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$.

Общая итерационная схема этих методов представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} x^{(k+1)} &= x^{(k)} + \lambda^{(k)} S^{(k)}; \\ \lambda^{(k)} &= \operatorname{argmin} \{\Phi(x^{(k)} + \lambda^{(k)} S^{(k)})\}; \\ S^{(k)} &= F \{\Phi'(x^{(0)}), \Phi'(x^{(1)}), \dots, \Phi'(x^{(k)})\}; \\ S^{(0)} &= -\Phi'(x^{(0)}). \end{aligned}$$

Различный вид функционала $F \{\Phi'(x^{(0)}), \dots, \Phi'(x^{(k)})\}$ и определяет разные варианты методов сопряженных градиентов. Например в алгоритме Флетчера — Ривса значения $S^{(k)}$ оцениваются согласно

$$S^{(k)} = -\Phi'(x^{(k)}) + \frac{[\Phi'(x^{(k)})]^T \Phi'(x^{(k)})}{[\Phi'(x^{(k-1)})]^T \Phi'(x^{(k-1)})} S^{(k-1)}.$$

Как показывают результаты экспериментальных исследований градиентных методов, они сходятся к точке оптимума несколько

в тех случаях, когда возможна оценка значений вторых производных ЦФ.

Стремление создать процедуры безусловной минимизации столь же эффективные по скорости сходимости, как и ньютоновские методы, но не имеющие недостатков, привело к разработке квазиньютоновских методов поиска экстремума многопараметрических функций, или методов переменной метрики [12, 42, 49, 79].

В основу этих методов положена аппроксимация обратной матрицы Гессе $[\Phi''(x^{(k)})]^{-1} = H^{-1}(x)$ вспомогательной матрицей η . При таком подходе устраняется один из главных недостатков ньютоновских методов, затрудняющих их эффективное использование для решения задач параметрической оптимизации, — необходимость вычисления матрицы вторых производных $H(x)$ и ее обращения.

Общая итерационная формула для всех квазиньютоновских методов имеет вид

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda^{(k)} \eta^{(k)} \Phi'(x^{(k)}), \quad (7.11)$$

где $\Phi'(x^{(k)})$ — градиент целевой функции, вычисленный в точке $x^{(k)}$; $\lambda^{(k)}$ — скалярный коэффициент, определенный с помощью одномерного поиска.

Значение элементов матрицы $\eta^{(k)}$ вычисляется при использовании информации о целевой функции в k -й и $k-1$ -й точках поиска $\Phi(x^{(k)})$, $\Phi(x^{(k-1)})$, ее производных в этих точках $\Phi'(x^{(k)})$, $\Phi'(x^{(k-1)})$, а также значений $x^{(k)}$, $x^{(k-1)}$ и $\eta^{(k-1)}$. Различия в способах оценки элементов матрицы $\eta^{(k)}$ и определяют многообразие квазиньютоновских методов минимизации.

Наиболее эффективные алгоритмы этой группы (методы Давидона — Флетчера — Пауэрлла, Флетчера, Бройдена) используют такие формулы пересчета значений матрицы $\eta^{(k)}$, которые для квадратичной функции $\Phi(x)$ обеспечивают через n шагов поиска выполнение равенства $\eta^{(n)} = H^{-1}(x)$. В качестве исходной матрицы $\eta^{(0)}$ используется единичная матрица I . В этом случае (7.11) эквивалентно (7.9). Следовательно, при использовании квазиньютоновских методов осуществляется постепенный переход от наискорейшего спуска к ньютоновским итерациям, причем на соответствующих этапах минимизации используются преимущества каждого из этих методов.

Многие квазиньютоновские алгоритмы могут быть получены с помощью общего подхода к построению методов сопряженных направлений, предложенных Хуангом [49]. Это значит, что генерируемые в процессе минимизации $\Phi(x)$ с помощью квазиньютоновских методов направления поиска являются сопряженными, что, в свою очередь, позволяет судить о сверхлинейной скорости сходимости квазиньютоновских алгоритмов при условии точного определения значений $\lambda^{(k)}$. Это же утверждение оказывается справедливым и при неточном одномерном поиске, но при выполнении условия $x^{(i)} - x^{(i-1)} = \eta^{(k)} \Delta g^{(i)}$, $i = 1, \dots, k$, $k \geq n$. Это свидетельствует о слабой зависимости эффективности квазиньютоновских процедур от точности одномерного поиска.

Модифицированный метод переменного порядка (МПП-М). Этот метод, относящийся к группе быстросходящихся методов оптимизации, имеет ряд особенностей, среди которых можно выделить следующие:

Для оценки составляющих векторов $d_3^{(k)}$ и $d_4^{(k)}$ необходимо иметь информацию о значениях 3-х и 4-х производных ЦФ [49], в общем случае трудно вычисляемых, поэтому в МПП-М значения $d_3^{(k)}$ и $d_4^{(k)}$ аппроксимируются с помощью следующего соотношения:

$$d_s^{(k)} = \eta^{(k)} \Phi' \left(x^{(k)} - \sum_{i=2}^{s-1} d_i^{(k)} \right). \quad (7.21)$$

Выражение (7.21) обеспечивает достаточно точную аппроксимацию составляющих векторов $d_s^{(k)}$ ($s > 2$) при условии, что значения производных ЦФ ограничены по величине.

Вид используемого на данном шаге поиска оптимума полинома $h_s(\lambda)$ определяется в результате просмотра нескольких пробных значений ЦФ.

Значение порядка метода последовательно увеличивается, пока не достигнет четырех или пока не будет выполняться условие

$$\Phi(x^{(h)} - \sum_{i=2}^{s+1} d_i^{(k)}) > \Phi(x^{(k)} - \sum_{i=2}^s d_i^{(k)}). \quad (7.22)$$

В качестве оптимального для данного шага поиска экстремума принимается то из пробных значений s , которому соответствует наименьшее значение $\Phi(x^{(k)} - \sum_{i=2}^s d_i^{(k)})$. Начальное значение на всех шагах поиска экстремума $\Phi(x)$ (кроме первого) полагается равным двум. На первом шаге оптимизации, когда $\eta^{(0)} = I$, где I — единичная матрица, используется формула первого порядка (7.13). Соотношение (7.13) используется также в тех случаях, когда с помощью формул более старших порядков нельзя получить хотя бы наименьшего требуемого уменьшения ЦФ (чаще всего за счет ошибок, накопившихся при вычислении $\eta^{(k)}$). Если же и это не приводит к желаемому результату, то рабочая точка перезадается, используя следующее соотношение:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + (0,1 - 0,01) x^{(k)} \text{SIGN}(\Phi'(x^{(k)})). \quad (7.23)$$

Способ оценки величины скалярного параметра λ , входящего в соотношения (7.13), (7.14), (7.16), (7.18) зависит от порядка используемой формулы s , величины отдельных составляющих $d_2^{(k)}$ и предыстории поиска.

Оптимальное для данного шага поиска значение параметра определяется с помощью процедур одномерного поиска только в случаях, когда $s = 1$ или $s = 2$ и $\Phi(x^{(k)}) < \Phi(x^{(k)} - d_2^{(k)})$. Причем, если на предыдущих шагах оптимизации применялись хотя бы раз формулы 3-го и 4-го порядков, то задача одномерного поиска ставится традиционным образом:

$$\Phi(x^{(k+1)}) = \min_{\lambda} \Phi(x^{(k)} - h_s(\lambda)). \quad (7.24)$$

В противном случае поиск λ осуществляется решением следующей задачи:

$$\Phi(x^{(k+1)}) = \max_{\lambda} \|h_s(\lambda)\| \quad (7.25)$$

Метод минимаксной оптимизации с автоматическим сворачиванием частных критериев качества (АСЧК). Этот метод применяется для решения минимаксной экстремальной задачи

$$\Phi(x^*) = \min_x \max_i \Phi_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7.31)$$

при

$$\begin{aligned} A_j(x, y) &\geq 0, \quad j = 1, \dots, M; \\ B_k(x, y) &= 0, \quad k = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

Он основан на сведении минимаксной задачи (7.31) к последовательности задач безусловной оптимизации. Процесс поиска минимаксного экстремума разбивается на ряд шагов последовательного приближения к истинному значению оптимума. Для каждого шага вводится некоторое предположительное значение $\Phi(x^*)$ (плавающий базисный уровень $\Phi^{(k)}$), выделяется подмножество частных критериев качества $\Phi_i^{(k)}$, текущие значения которых больше $\Phi^{(k)}$, и осуществляется попытка приблизить их значения к базисному уровню $\Phi^{(k)}$ путем минимизации целевой функции следующего вида:

$$P(x, \Phi) = \sum_{i=1}^m K_i [\Phi_i(x) - \Phi^{(k)}]^2 + \sum_{j=1}^M K_j A_j^2 + \sum_{k=1}^N K_k B_k^2, \quad (7.32)$$

где

$$\begin{aligned} K_i &= \begin{cases} 0, & \text{если } \Phi_i(x) \leq \Phi^{(k)}, \\ 1, & \text{если } \Phi_i(x) > \Phi^{(k)}; \end{cases} \\ K_j &= \begin{cases} K_1, & \text{если } A_j < 0, \\ 0, & \text{если } A_j \geq 0; \end{cases} \\ K_k &= \begin{cases} K_2, & \text{если } B_k \neq 0, \\ 0, & \text{если } B_k = 0, \end{cases} \end{aligned}$$

а K_1, K_2 — некоторые положительные константы. В случае, когда начальное значение плавающего базисного уровня выбрано меньшим $\Phi(x^*)$, т. е. $\Phi^{(0)} < \Phi(x^*)$, а для оценки текущего значения $\Phi^{(k)}$ используется соотношение

$$\Phi^{(k+1)} = \Phi^{(k)} + [P(x^{(k)}, \Phi^{(k)})/m]^{1/2}, \quad (7.33)$$

то последовательность значений плавающего базисного уровня $\Phi^{(k)}$, $k = 0, 1, 2 \dots$ будет ограниченной, причем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \Phi^{(k)} = \Phi(x^*). \quad (7.34)$$

Таким образом, если задать начальное значение базисного уровня $\Phi^{(0)} < \Phi(x^*)$, то точку минимаксного оптимума находят в результате последовательной минимизации нескольких вспомогательных целевых функций $P(x, \Phi^{(k)})$, значения $\Phi^{(k)}$ для которых определяются по (7.33). Достоинством такого подхода является легкость его программной реализации на базе имеющихся процедур решения однокрите-

и поиск минимаксного оптимума продолжается, если $\varepsilon > \varepsilon_{\min} = (10^{-10} \dots 10^{-12})$. В противном случае происходит останов, свидетельствующий, что найден локальный минимаксный оптимум, но поставленная задача параметрической оптимизации не решена.

Рассмотрим случай, когда одновременно не выполняются условия (7.36) и (7.37). В этой ситуации процесс поиска минимаксного оптимума продолжается только, если не выполняются следующие дополнительные условия:

$$\begin{aligned} |\Phi^{(k)} - \Phi^{(k-1)}| &\leq \varepsilon_{\Phi}^{(k)}, \\ |x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}| &\leq \varepsilon 2_i^{(k)}, \quad i = 1, \dots, n, \\ |P(x^{(k)}, \Phi^{(k)}) - P(x^{(k-1)}, \Phi^{(k-1)})| &\leq \varepsilon 3^{(k)}, \end{aligned} \quad (7.39)$$

где $\varepsilon_{\Phi}^{(k)}$, $\varepsilon 2_i^{(k)}$, $\varepsilon 3^{(k)}$ — минимально допустимые значения соответственно изменения величин плавающего базисного уровня, составляющих вектора варьируемых параметров и целевой функции $P(x, \Phi)$ на k -м шаге поиска оптимума.

Выполнение условий (7.39) свидетельствует об обнаружении некоторой стационарной точки или о накопившихся в процессе поиска ошибках. Поэтому, если условия (7.39) выполняются, поиск оптимума продолжается после перезадавания рабочей точки при помощи соотношения

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - (0,1 - 0,3) x_i^{(k)} \text{SIGN}(P'_i(x^{(k)}, \Phi^{(k)})). \quad (7.40)$$

Трудоемкость получения решения во многом зависит от требуемой точности получения оптимума $\Phi_{\text{дон}}(x)$ и при изменении $\Phi_{\text{дон}}(x)$ может примерно на порядок возрастать количество необходимых оценок $P(x, \Phi)$ и число минимизаций $P(x, \Phi)$. Эффективность минимаксного метода с автоматическим сворачиванием функций качества в основном определяется эффективностью используемого алгоритма решения безусловных задач оптимизации.

Метод минимаксной оптимизации с автоматическим пошаговым выбором активных функций (АПВАФ). Для решения математической задачи в постановке (7.31) может быть использована и другая процедура, в основу которой положены следующие положения.

1. На каждом шаге поиска оптимума уменьшение минимаксной функции $\Phi(x)$ не должно быть меньше некоторой заранее выбранной величины $\delta^{(k)}$.

2. Приращения вектора варьируемых параметров $\Delta x^{(k)}$, приводящие к уменьшению $\Phi(x^{(k)})$ на $\delta^{(k)}$, определяются на основании линейной аппроксимации в точке $x^{(k)}$ частных критериев качества $\Phi_i(x)$, $i = 1, \dots, m$.

3. Для определения составляющих вектора $\Delta x^{(k)}$ используется информация о поведении не всех функций $\Phi_i(x^{(k)})$, $i = 1, \dots, m$, а только части из них, оказывающих доминирующее влияние на вид поверхности минимаксной функции $\Phi(x)$ в окрестности точки $x^{(k)}$. Причем активной в точке $x^{(k)}$ будем считать только такую функцию $\Phi_i(x)$, которая после выполнения шага оказалась бы больше минимаксной функции $\Phi(x^{(k+1)})$, если бы не рассматривалась при определении значений вектора $\Delta x^{(k)}$.

Модификация значений $\delta^{(k)}$ в зависимости от количества активных функций производится по-разному. Так, если количество активных функций больше одной, то

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)}/2. \quad (7.47)$$

Причем в этих случаях для выполнения условия (7.46) может потребоваться многократное (2...4 раза) использование выражения (7.47). Если же активная функция только одна, то, используя линейную зависимость между $\Delta x^{(k)}$ и $\delta^{(k)}$, модифицированное значение $\delta^{(k+1)}$ можно определить следующим образом:

$$\delta^{(k+1)} = 0,75\delta^{(k)} \min_i \frac{x_i^{(k)}}{\Delta x_i^{(k)}}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (7.48)$$

Причем уже на первом последующем шаге обеспечивается выполнение (7.46).

Для предотвращения недопустимо больших или малых значений $\Delta x^{(k)}$ в процедуре АПВАФ предусмотрены меры, связанные с ограничением значений градиента частных целевых функций $\Phi_i(x)$.

Одним из наиболее трудоемких этапов является выбор активных функций. Для определения множества активных функций используется следующая последовательность вычислений.

Для всех функций качества $\Phi_i(x^{(k)})$, $i = 1, \dots, s$ определяется разность между значением целевой $\Phi_i(x^{(k)})$ и величиной минимаксной функции $\Phi(x^{(k+1)}) = \Phi(x^{(k)}) - \delta^{(k)}$, которую получим после выполнения текущего шага:

$$r_i(x^{(k)}) = \Phi_i(x^{(k)}) - \Phi(x^{(k)}) + \delta^{(k)}, \quad i = 1, \dots, s. \quad (7.49)$$

Каждая из полученных разностей нормируется

$$R_i(x^{(k)}) = \frac{r_i(x^{(k)})}{\|\Phi_i'(x^{(k)})\|}, \quad i = 1, \dots, s \quad (7.50)$$

и определяется максимальная из нормированных разностей

$$R_{\max}(x^{(k)}) = \max_i R_i(x^{(k)}), \quad i = 1, \dots, s. \quad (7.51)$$

Величина $R_{\max}(x^{(k)})$ соответствует той из s рассматриваемых функций качества, поведение которой оказывает наиболее существенное влияние на характер минимаксной целевой функции $\Phi(x^{(k)})$ в окрестности точки $x^{(k)}$, а значит и на значения составляющих вектора $\Delta x^{(k)}$. Данная функция, обозначим ее $\Phi_L(x^{(k)})$, включается в число активных. Затем, используя (7.43) или (7.44), определяются значения вектора $\Delta x^{(k)}$, которые обеспечивают получение $r_i(x^{(k)}) = 0$, а разности остальных $s - 1$ функций вычисляются по формуле

$$\hat{r}_i(x^{(k)}) = \Phi_i(x^{(k)}) - \Phi(x^{(k)}) + \delta^{(k)} + \Phi_i'(x^{(k)}) \Delta x^{(k)}, \quad i = 1, \dots, s, \\ i \neq L. \quad (7.52)$$

Если $s - 1$ значений $\hat{r}_i(x^{(k)}) \leq 0$, то множество активных функций $L(x^{(k)})$ считается полным и вычисляются координаты новой рабочей точки $x^{(k+1)}$ по (7.41). В противном случае для функций, имеющих

Метод минимаксной оптимизации с автоматическим сворачиванием частных критериев качества (АСЧК). Этот метод применяется для решения минимаксной экстремальной задачи

$$\Phi(x^*) = \min_x \max_i \Phi_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7.31)$$

при

$$\begin{aligned} A_j(x, y) &\geq 0, \quad j = 1, \dots, M; \\ B_k(x, y) &= 0, \quad k = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

Он основан на сведении минимаксной задачи (7.31) к последовательности задач безусловной оптимизации. Процесс поиска минимаксного экстремума разбивается на ряд шагов последовательного приближения к истинному значению оптимума. Для каждого шага вводится некоторое предположительное значение $\Phi(x^*)$ (плавающий базисный уровень $\Phi^{(k)}$), выделяется подмножество частных критериев качества $\Phi_i^{(k)}$, текущие значения которых больше $\Phi^{(k)}$, и осуществляется попытка приблизить их значения к базисному уровню $\Phi^{(k)}$ путем минимизации целевой функции следующего вида:

$$P(x, \Phi) = \sum_{i=1}^m K_i [\Phi_i(x) - \Phi^{(k)}]^2 + \sum_{j=1}^M K_j A_j^2 + \sum_{k=1}^N K_k B_k^2, \quad (7.32)$$

где

$$\begin{aligned} K_i &= \begin{cases} 0, & \text{если } \Phi_i(x) \leq \Phi^{(k)}, \\ 1, & \text{если } \Phi_i(x) > \Phi^{(k)}, \end{cases} \\ K_j &= \begin{cases} K_1, & \text{если } A_j < 0, \\ 0, & \text{если } A_j \geq 0; \end{cases} \\ K_k &= \begin{cases} K_2, & \text{если } B_k \neq 0, \\ 0, & \text{если } B_k = 0, \end{cases} \end{aligned}$$

а K_1, K_2 — некоторые положительные константы. В случае, когда начальное значение плавающего базисного уровня выбрано меньшим $\Phi(x^*)$, т. е. $\Phi^{(0)} < \Phi(x^*)$, а для оценки текущего значения $\Phi^{(k)}$ используется соотношение

$$\Phi^{(k+1)} = \Phi^{(k)} + [P(x^{(k)}, \Phi^{(k)})/m]^{1/2}, \quad (7.33)$$

то последовательность значений плавающего базисного уровня $\Phi^{(k)}$, $k = 0, 1, 2 \dots$ будет ограниченной, причем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \Phi^{(k)} = \Phi(x^*). \quad (7.34)$$

Таким образом, если задать начальное значение базисного уровня $\Phi^{(0)} < \Phi(x^*)$, то точку минимаксного оптимума находят в результате последовательной минимизации нескольких вспомогательных целевых функций $P(x, \Phi^{(k)})$, значения $\Phi^{(k)}$ для которых определяются по (7.33). Достоинством такого подхода является легкость его программной реализации на базе имеющихся процедур решения однокрите-

и поиск минимаксного оптимума продолжается, если $\varepsilon > \varepsilon_{\min} = (10^{-10} \dots 10^{-12})$. В противном случае происходит останов, свидетельствующий, что найден локальный минимаксный оптимум, но поставленная задача параметрической оптимизации не решена.

Рассмотрим случай, когда одновременно не выполняются условия (7.36) и (7.37). В этой ситуации процесс поиска минимаксного оптимума продолжается только, если не выполняются следующие дополнительные условия:

$$\begin{aligned} |\Phi^{(k)} - \Phi^{(k-1)}| &\leq \varepsilon_{\Phi}^{(k)}, \\ |x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}| &\leq \varepsilon 2_i^{(k)}, \quad i = 1, \dots, n, \\ |P(x^{(k)}, \Phi^{(k)}) - P(x^{(k-1)}, \Phi^{(k-1)})| &\leq \varepsilon 3^{(k)}, \end{aligned} \quad (7.39)$$

где $\varepsilon_{\Phi}^{(k)}$, $\varepsilon 2_i^{(k)}$, $\varepsilon 3^{(k)}$ — минимально допустимые значения соответственно изменения величин плавающего базисного уровня, составляющих вектора варьируемых параметров и целевой функции $P(x, \Phi)$ на k -м шаге поиска оптимума.

Выполнение условий (7.39) свидетельствует об обнаружении некоторой стационарной точки или о накопившихся в процессе поиска ошибках. Поэтому, если условия (7.39) выполняются, поиск оптимума продолжается после перезадавания рабочей точки при помощи соотношения

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - (0,1 - 0,3) x_i^{(k)} \text{SIGN}(P'_i(x^{(k)}, \Phi^{(k)})). \quad (7.40)$$

Трудоемкость получения решения во многом зависит от требуемой точности получения оптимума $\Phi_{\text{доп}}(x)$ и при изменении $\Phi_{\text{доп}}(x)$ может примерно на порядок возрастать количество необходимых оценок $P(x, \Phi)$ и число минимизаций $P(x, \Phi)$. Эффективность минимаксного метода с автоматическим сворачиванием функций качества в основном определяется эффективностью используемого алгоритма решения безусловных задач оптимизации.

Метод минимаксной оптимизации с автоматическим пошаговым выбором активных функций (АПВАФ). Для решения математической задачи в постановке (7.31) может быть использована и другая процедура, в основу которой положены следующие положения.

1. На каждом шаге поиска оптимума уменьшение минимаксной функции $\Phi(x)$ не должно быть меньше некоторой заранее выбранной величины $\delta^{(k)}$.

2. Приращения вектора варьируемых параметров $\Delta x^{(k)}$, приводящие к уменьшению $\Phi(x^{(k)})$ на $\delta^{(k)}$, определяются на основании линейной аппроксимации в точке $x^{(k)}$ частных критериев качества $\Phi_i(x)$, $i = 1, \dots, m$.

3. Для определения составляющих вектора $\Delta x^{(k)}$ используется информация о поведении не всех функций $\Phi_i(x^{(k)})$, $i = 1, \dots, m$, а только части из них, оказывающих доминирующее влияние на вид поверхности минимаксной функции $\Phi(x)$ в окрестности точки $x^{(k)}$. Причем активной в точке $x^{(k)}$ будем считать только такую функцию $\Phi_i(x)$, которая после выполнения шага оказалась бы больше минимаксной функции $\Phi(x^{(k+1)})$, если бы не рассматривалась при определении значений вектора $\Delta x^{(k)}$.

Модификация значений $\delta^{(k)}$ в зависимости от количества активных функций производится по-разному. Так, если количество активных функций больше одной, то

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)}/2. \quad (7.47)$$

Причем в этих случаях для выполнения условия (7.46) может потребоваться многократное (2...4 раза) использование выражения (7.47). Если же активная функция только одна, то, используя линейную зависимость между $\Delta x^{(k)}$ и $\delta^{(k)}$, модифицированное значение $\delta^{(k+1)}$ можно определить следующим образом:

$$\delta^{(k+1)} = 0,75\delta^{(k)} \min_i \frac{x_i^{(k)}}{\Delta x_i^{(k)}}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (7.48)$$

Причем уже на первом последующем шаге обеспечивается выполнение (7.46).

Для предотвращения недопустимо больших или малых значений $\Delta x^{(k)}$ в процедуре АПВАФ предусмотрены меры, связанные с ограничением значений градиента частных целевых функций $\Phi_i(x)$.

Одним из наиболее трудоемких этапов является выбор активных функций. Для определения множества активных функций используется следующая последовательность вычислений.

Для всех функций качества $\Phi_i(x^{(k)})$, $i = 1, \dots, s$ определяется разность между значением целевой $\Phi_i(x^{(k)})$ и величиной минимаксной функции $\Phi(x^{(k+1)}) = \Phi(x^{(k)}) - \delta^{(k)}$, которую получим после выполнения текущего шага:

$$r_i(x^{(k)}) = \Phi_i(x^{(k)}) - \Phi(x^{(k)}) + \delta^{(k)}, \quad i = 1, \dots, s. \quad (7.49)$$

Каждая из полученных разностей нормируется

$$R_i(x^{(k)}) = \frac{r_i(x^{(k)})}{\|\Phi_i'(x^{(k)})\|}, \quad i = 1, \dots, s \quad (7.50)$$

и определяется максимальная из нормированных разностей

$$R_{\max}(x^{(k)}) = \max_i R_i(x^{(k)}), \quad i = 1, \dots, s. \quad (7.51)$$

Величина $R_{\max}(x^{(k)})$ соответствует той из s рассматриваемых функций качества, поведение которой оказывает наиболее существенное влияние на характер минимаксной целевой функции $\Phi(x^{(k)})$ в окрестности точки $x^{(k)}$, а значит и на значения составляющих вектора $\Delta x^{(k)}$. Данная функция, обозначим ее $\Phi_L(x^{(k)})$, включается в число активных. Затем, используя (7.43) или (7.44), определяются значения вектора $\Delta x^{(k)}$, которые обеспечивают получение $r_i(x^{(k)}) = 0$, а разности остальных $s - 1$ функций вычисляются по формуле

$$\hat{r}_i(x^{(k)}) = \Phi_i(x^{(k)}) - \Phi(x^{(k)}) + \delta^{(k)} + \Phi_i'(x^{(k)}) \Delta x^{(k)}, \quad i = 1, \dots, s, \\ i \neq L. \quad (7.52)$$

Если $s - 1$ значений $\hat{r}_i(x^{(k)}) \leq 0$, то множество активных функций $L(x^{(k)})$ считается полным и вычисляются координаты новой рабочей точки $x^{(k+1)}$ по (7.41). В противном случае для функций, имеющих

мальных задач, реализующих различные методы поиска экстремума многопараметрических функций.

В качестве базовых алгоритмов, на основе которых разработаны включенные в состав СПАРС практические процедуры параметрической оптимизации электронных схем, использовались следующие методы [12, 79]: обратный метод наискорейшего спуска; метод случайного поиска с уменьшением интервала поиска; метод Давидона — Флетчера — Пауэлла; метод Бройдена; метод Флетчера; модифицированный метод Ньютона; модифицированный метод переменного порядка; модифицированный метод с автоматическим сворачиванием функции качества; минимаксный метод с пошаговым выбором активных функций.

Машинные процедуры оптимизации, разработанные на основе этих методов, учитывают особенности задач оптимизации сложных объектов (большой разброс в значениях чувствительности выходных характеристик y , к варьированию составляющих вектора x , существенный перепад в абсолютных значениях компонентов x , удаленность исходной точки поиска x от точки оптимума x^* и т. д.) при выборе направления минимизации целевой функции для принятия решения о целесообразности проведения одномерного поиска, для определения длины шага и стратегии одномерного поиска, оценки моментов перехода с одной процедуры на другую, в критериях окончания процесса поиска оптимума. Большая часть включенных в СПАРС процедур решения экстремальных задач имеют сверхлинейную скорость сходимости и требуют сравнительно небольшого количества оценок целевой функции для получения точки оптимума.

Выбор конкретной процедуры или связки процедур для решения определенной оптимизационной задачи в ППП СПАРС осуществляется автоматически или с помощью директивы `<RUN` языка управления заданиями СПАРС (п. 3.2).

Анализ результатов решения тестовых оптимизационных задач с помощью алгоритма МПП-М и других процедур, имеющихся в блоке оптимизации СПАРС, показывает, что алгоритм МПП-М значительно превосходит по эффективности такие известные методы решения экстремальных задач, как алгоритмы Давидона — Флетчера — Пауэлла, Флетчера, Бройдена, алгоритмы случайного поиска и др.

Использование алгоритма МПП-М позволяет решать практически все исследуемые с помощью ППП СПАРС задачи параметрической оптимизации, причем затраты на поиск, как правило, не превышают 1000 оценок $\Phi(x)$. Трудоемкость решения экстремальных задач с помощью МПП-М практически не зависит от количества варьируемых параметров. Наблюдаемый при этом некоторый рост числа необходимых оценок $\Phi(x)$ объясняется увеличением объема вычислений, требуемых для определения значений составляющих градиента ЦФ.

При решении многих практических задач формулы 1-го и 2-го порядков, требующие проведения одномерного поиска, использовались лишь на нескольких первых шагах минимизации $\Phi(x)$ (от 3 до 9). После выведения рабочей точки в область оптимума на всех последующих шагах оптимизации, вплоть до окончания поиска экстремума, для определения координат новой рабочей точки использовались формулы старших порядков (чаще всего 4-го). Это объясняет тот факт, что

где γ_i и β_i — штрафные коэффициенты, такие, что:

$$\gamma_i = \begin{cases} \gamma_i^*, & \text{если } x_i > x_{vi}; \\ 0, & \text{если } x_i \leq x_{vi}; \end{cases}$$

$$\beta_i = \begin{cases} \beta_i^*, & \text{если } x_i < x_{ni}; \\ 0, & \text{если } x_i \geq x_{ni}. \end{cases}$$

При оценке текущего значения модифицированной целевой функции $\Phi_M(x)$ величина $\Phi_{шт}$ добавляется автоматически к $\Phi(x)$. При этом задача оптимизации с ограничениями преобразуется в задачу оптимизации без ограничений. Учет ограничений более сложного вида производится при формировании соответствующей целевой функции [49, 79].

Для решения оптимизационной задачи с помощью СПАРС необходимо вначале дать точное математическое описание критерию оптимальности, выбрать совокупность варьируемых параметров и диапазоны их изменения в процессе оптимизации, определить ограничения на оптимизируемые характеристики и варьируемые параметры, задать требуемую точность расчета. Естественно, что для успешного проведения формализации необходимо, чтобы пользователь хорошо понимал сущность происходящих в проектируемом объекте процессов, знал потенциальные возможности его оптимизируемого варианта, а также имел определенное представление об особенностях решения оптимизационных задач на ЭВМ.

Выбор математического описания критерия оптимальности в основном сводится к определению вида целевой функции. В СПАРС информация об используемых целевых функциях находится в специальных библиотеках. Все версии СПАРС имеют базовый набор целевых функций, отражающих особенности оптимизационных задач, используемых разработчиками СПАРС в процессе отладки блока оптимизации.

В существующих в настоящее время версиях ППП СПАРС базовый набор целевых функций включает следующие функциональные зависимости:

1. Взвешенную целевую функцию:

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_i \psi_j (y_{ji}(x) - y_{ji}^*(x))^2, \quad (7.56)$$

где $y_{ji}(x)$ и $y_{ji}^*(x)$ — соответственно реальные и требуемые значения j -й выходной характеристики схемы в i -й точке оптимизации, определяемой значениями соответствующей глобальной переменной частоты или времени; φ_i и ψ_j — весовые коэффициенты; m — количество оптимизируемых характеристик схемы;

n — число точек оптимизации.

2. Критерий абсолютной близости реальных и требуемых характеристик схемы:

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_i \psi_j ABS(y_{ji}(x) - y_{ji}^*(x)). \quad (7.57)$$

Это способствует более эффективному использованию имеющихся в блоке оптимизации алгоритмов поиска экстремума многопараметрических функций и значительно уменьшению трудоемкости подобных задач. Если пользователь не внесет в подпрограмму информацию об определении производных, то в необходимых случаях значения градиента целевой функции будут оцениваться с использованием процедуры, основанной на методе приращений.

Поскольку описание целевых функций выполняется на одном из языков высокого уровня, пользователь может сравнительно легко пополнять библиотеку целевых функций функциональными зависимостями практически любой сложности. Причем учет при оценке целевой функции ограничений, накладываемых как на оптимизируемые характеристики, так и на варьируемые параметры, также не вызывает затруднений.

После коррекции исходных текстов библиотеки целевых функций выполняются смешанные стандартные процедуры трансляции и редактирования. Полученная в результате модифицирования версия СПАРС в виде абсолютных модулей с новыми целевыми функциями может использоваться в дальнейшем.

В СПАРС задание информации, необходимой для решения конкретной оптимизационной задачи, осуществляется с помощью ряда директив языка управления заданиями системы (п. 3.2).

Так, целевые функции задаются с помощью специальной директивы задания сложных функциональных зависимостей $\langle \text{COND}$, имеющей формат:

$$\langle \text{COND}, \text{ИЦФ} = F_n (a_1 [a_2], \dots, \text{ИОХ1} [, \text{ИОХ2}] \dots),$$

где ИЦФ — имя целевой функции; a_1, a_2 — значения фактических параметров; n — номер целевой функции в библиотеке целевых функций; ИОХ1, ИОХ2 — имена оптимизируемых характеристик.

Информация о целевой функции, заданная с помощью языка управления заданиями, транслируется во внутреннюю структуру данных программы. В процессе оптимизации значения целевой функции, а при необходимости и значения ее производных, оцениваются соответствующими программами СПАРС.

Совокупность варьируемых параметров определяется с помощью директивы $\langle \text{VARP}$, имеющей формат

$$\langle \text{VARP}, \text{ИБЭ1} [, \text{ИБЭ2}] \dots,$$

где ИБЭ1, ИБЭ2 — имена варьируемых элементов. Двусторонние ограничения на варьируемые параметры задаются в файле задания директивой $\langle \text{VAL}$, формат которой

$$\langle \text{VAL}, [k_1 * (a_1, b_1)], \{[k_2 * (a_2, b_2)]\} \dots,$$

где k_1, k_2 — коэффициенты кратности, а каждая пара чисел a_i и b_i соответствует нижнему и верхнему пределам допустимого диапазона изменения значений i -го варьируемого параметра из списка имен, определенных директивой $\langle \text{VARP}$.

Вид исследований — параметрическая оптимизация — задается директивой $\langle \text{OPTIM}$, а директивы $\langle \text{TR}$, $\langle \text{DC}$ и $\langle \text{SOF}$ определяют соответственно анализ переходного процесса, расчет статистики и частот-

пендального импульса напряжения. Форма входных и выходных сигналов операционного усилителя приведена на рис. 37, в и рис. 37, г соответственно.

Расчет каждого варианта схемы состоит из анализа по постоянно-му току и расчета реакции операционного усилителя на воздействие входного сигнала во временной области до момента $T_{MAX} = 100$. В качестве варьируемых используются компоненты $R1$, $R3$ и $R4$, область допустимых значений которых определяется с помощью следующих ограничений:

$$0,05 \text{ кОм} \leq R1 \leq 100 \text{ кОм}, \quad 1 \text{ кОм} \leq R3 \leq 10 \text{ кОм}, \\ 1 \text{ кОм} \leq R4 \leq 10 \text{ кОм}.$$

В результате процедуры оптимизации нужно определить оптимальные значения варьируемых компонентов $R1$, $R3$, $R4$, а также построить чертеж, на котором расположить графики зависимости напряжения на сопротивлении $R11$ от времени до и после оптимизации.

Длительность переднего фронта можно определить как разность моментов времени $T2$ и $T1$, в интервале между которыми выходное напряжение возрастает до $0,1 \dots 0,8 U_{max}$, а длительность заднего фронта — как разность между моментами времени $T4$ и $T3$ (рис. 37, г). При этом в файле задания для описания переменных $T1 \dots T4$ необходимо использовать директивы \langle FFIX, а для описания ДЛПЕРФ и ДЛЗАДФ — директивы \langle FINT.

Таким образом, файл задания на оптимизацию операционного усилителя имеет вид

```
<DC;
<TR;
<OPTIM;
<VARP, R1, R3, R4;
<VAL, 0,05, 100, 2 * (1,10);
<FFIX, T1 = FRISE(UR11,1,4), T2 = FRISE (UR11,9,0);
<FFIX, T3 = FFALL(UR11,9,0), T4 = FFALL (UR11,1,4);
<FINT, ДЛПЕРФ = T2 — T1;
<FINT, ДЛЗАДФ = T4 — T3;
<COND, ЦФ = F1(25,34,21,55, ДЛПЕРФ, ДЛЗАДФ);
<PLOT, UR11;
<RUN, TMAX = 100;
<RUN, TRUNC = 0,01, CONVTA = 0,001, XMAX = 1, IVZ = 3;
<RUN, ERROF = 0,1;
<RUN, NUMBEX = 125;
```

Полученная в результате оптимизации величина целевой функции — $2,57 \cdot 10^{-5}$ (начальное значение 10^{21}). Трудоемкость оптимизации — 44 оценки целевой функции. Время счета на ЕС-1033 — 17 мин. Оптимальные значения варьируемых параметров: $R1 = 500 \text{ Ом}$; $R3 = 3,3625 \text{ кОм}$ и $R4 = 3,2103 \text{ кОм}$.

При решении экстремальных задач с помощью блока оптимизации СПАРС выдает сообщения об ошибках и критических ситуациях, возникающих при счете. Эти сообщения позволяют оперативно исправлять возникающие ошибки, а при необходимости — вмешиваться в процесс оптимизации.

емые ее промежуточные положения либо в памяти ЭВМ, либо на специальных носителях (экран, бумага, фотопленка).

Разработанные в настоящее время аксиоматика, теория и алгоритмы геометрических построений, аналитические модели геометрических объектов, численные методы решения математических задач составляют основу, на которой базируется и развивается новое перспективное научное направление — геометрическое моделирование с помощью ЭВМ. Наряду со средствами машинной графики и теорией программи-

Таблица 15. Классификационная матрица объектов геометрического проектирования

Структура	1	2	3
<i>с</i>	Композиция стержневых конструкций	Сборочная единица — композиция деталей	Полная поверхность агрегата
<i>б</i>	Стержневая конструкция — объединение стержней	Ограничивающие поверхности деталей — комбинация элементов ее поверхности	Ограничивающие поверхности агрегатов
<i>а</i>	Стержень (штанга, полоса, шина)	Элемент поверхности машиностроительной детали, задаваемый аналитическим уравнением	Элемент поверхности, задаваемый непрерывным каркасом

рования системы геометрического моделирования стали одной из важнейших составных частей САПР. В САПР возникает необходимость моделирования геометрических объектов различной формы и структуры.

Поэтому по определенным признакам выделяют более или менее крупные классы объектов и разрабатывают для их моделирования специализированные средства. С геометрической точки зрения любой объект характеризуется сложностью формы и структуры (композиции). Форма геометрического объекта является наиболее подвижной, изменчивой характеристикой. Структура же объекта выражает относительно устойчивые его свойства, определяя взаимное расположение его компонентов в пространстве. Поэтому логично в основу схемы классификации положить именно эти свойства пространственных объектов.

Укрупненная классификация геометрических объектов, наиболее распространенных в инженерной практике, показана в форме матрицы табл. 15. По столбцам матрицы, обозначаемым цифрами, отложена внутренняя геометрическая сложность объекта, характеризующаяся формой поверхности, по строкам — его композиционная сложность. Элементы, заполняющие первый столбец матрицы, обычно используются в строительстве инженерных сооружений. Многообразие машиностроительных деталей и узлов отражено во втором столбце. Элементы третьего столбца определяют геометрию изделия, поверхность которого взаимодействует с газообразной или жидкой окружающей средой, например, лопасти газовых турбин, поверхности транспортных машин.

циях и видах, чертежах и спецификациях. При этом информационная модель объекта наряду с геометрическими данными (точка, линии, поверхности и т. д.) содержит любые другие описания свойств и характеристик объекта (технологические данные, материал и др.), полученные и структурированные в модели на всех этапах процесса проектирования. Это является важной функцией модели геометрического объекта как средства интеграции процесса проектирования.

Диалоговая машинная графика образует в САПР наиболее естественный канал общения конструктора с цифровой моделью геометрического объекта. Языковыми средствами такого общения выступают привычные для инженера графические образы объекта в форме чертежей, общих видов в различных проекциях, схем и т. д. Для реализации этих средств используются технические устройства ввода, отображения и вывода графической информации, а также большой объем программного обеспечения по реализации заданного набора функций графической системы. В связи с этим структура систем, использующих развитые средства графического диалога, существенно отличается от систем с традиционной технологией прохождения задач на ЭВМ. Рассмотрим некоторые свойства таких систем, используя рис. 38:

1. Основным элементом системы является диалоговый монитор, который через устройства ввода принимает и организует исполнение директив конструктора, а также получает данные из модели геометрического объекта, информационной базы или пакета прикладных программ, организует преобразование их в описание нужного изображения и передает это описание на выводные устройства.

Вводимая конструктором директива содержит имя объекта или его части, тип выводного устройства, вид проекции, масштаб вычерчивания, параметры линейного преобразования изображения, формат чертежа, координаты точки наблюдения. Исходные данные по требованию системы вводятся в диалоговом режиме с возможностью широкого использования стандартных видов проекций, масштабов и устройств, выбираемых системой, если соответствующие данные не были введены. Таким образом, монитор посредством директивы отображения помогает конструктору заглянуть в память ЭВМ и рассмотреть геометрический образ проектируемого объекта с нужной позиции.

2. Программное обеспечение технических средств взаимодействия осуществляет преобразование вводимых и выводимых данных в стан-

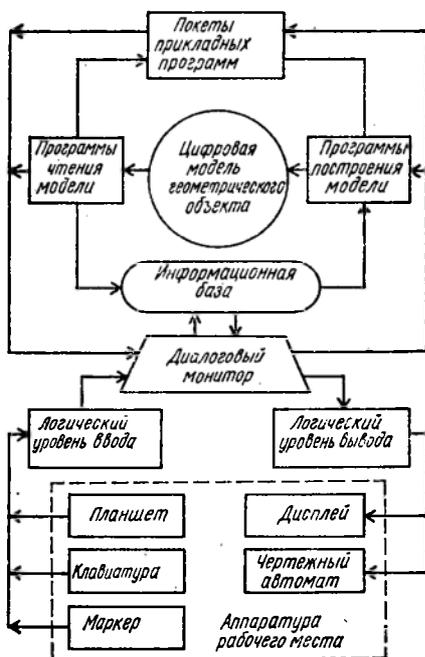


Рис. 38. Архитектура диалоговой системы геометрического моделирования.

выполнить распределение функций диалога и функций прикладных программ не только во времени внутри одной ЭВМ, но и между различными процессорами в многопроцессорной системе, где, например, диалоговый ввод, отображение и редактирование данных может осуществляться в процессоре АРМ, в то время как выполнение программы — в центральной ЭВМ. Подсистема геометрического моделирования является частью САПР и работа ее должна быть увязана с другими подсистемами. Эта увязка производится на базе общей для всех подсистем математической модели объекта проектирования.

Проиллюстрируем это на примере архитектуры САПР ГЕОМЕТРИЯ. Система предназначена для автоматизации проектирования внеш-

Таблица 16. Принципы ввода сообщения пользователя

Тип сообщения	Логическое устройство				
	Выборщик	Указатель	Забитчик положения	Шкала	Клавиатура
Выбор	Непосредственно N	Отображение меню: У→N	Отображение меню K→У→N	R→N	C→N
Указание	1. Отображение номеров элементов: N→N→У 2. Управляемое изменение яркости: N→У	Непосредственно У	Отображение маркера: K→У	1. Отображение маркера: R→K→У 2. Отображение номеров элементов: R→N→У	1. C→K→У 2. Отображение номеров элементов: C→N→У
Положение	Управляемое движение маркера: N→K	Отображение маркера или раstra: У→K	Непосредственно K	R→K	C→R→K
Величина	1. C 2. Отображение шкалы: N→K→R	1. Отображение меню: У→C→R 2. Отображение шкалы: У→K→R	Отображение шкалы: K→R	Непосредственно R	C→R
Строка	—	Отображение меню: У→C	Отображение меню: K→У→C	—	Непосредственно C

Обозначения: N — индекс элемента (целое число) конечного множества в сообщении типа *выбор*;
 У — указатель (функция адреса размещения указанного элемента) в указании;
 K — координаты положения;
 R — действительное значение величины;
 C — значение строки символов.

них форм машиностроительных объектов, включая поверхности, отраженные в классификационной матрице элементами второго и третьего столбцов.

Для решения этой задачи пользователю предоставляются следующие основные возможности: ввод, редактирование, сглаживание теоретических линий и создание модели каркаса; согласование теоретических линий и формирование модели поверхности геометрического объекта; сечение геометрического объекта; выполнение графической документации; вычисление эквидистанты для станка с ЧПУ; формирование модели пространственной линии; выполнение трассировки поверхности.

Технической базой системы является двухмашинный комплекс, состоящий из ЭВМ «Минск-32» и терминальной станции на базе мини-ЭВМ «Электроника-100И». Терминальная станция позволяет создать рабочее место конструктора непосредственно в проектно-конструкторских отделах. В состав терминальной станции входят: полуавтомат считывания графической информации (ПАСГИ); электромеханическое устройство ввода/вывода графической информации (ЭВГУ, СМК); дисплей на ЭЛТ с запоминанием и алфавитно-цифровой клавиатурой

общего процесса проектирования является то, что не всякая директива может быть выполнена в любой момент, поскольку возможность эта зависит от состояния модели проекта, состояния системы и результата работы предыдущей директивы.

Для обеспечения информационной связи при реализации отдельных директив операционная система следит за последовательностью ввода кодов директив, показывает пользователю, какую директиву надо выполнять, и настраивает систему на прием нужной директивы. Например, если вначале ввести директиву ВВОД, то система сообщит ВЫПОЛНИТЕ ДИРЕКТИВУ ПРИВЯЗКА и будет ждать ответа пользователя. Управление процессом проектирования включает и управление устройствами ввода/вывода.

В системе предусмотрена выдача текстовых сообщений о состоянии процесса проектирования. Для этого в ОС САПР заложен семантический контроль ввода исходных данных. В случае обнаружения ошибки система информирует оператора-проектировщика ОШИБКА ВВЕСТИ... и сама настраивается на прием достоверной информации.

При функционировании ОС САПР «Геометрия» позволяет управлять памятью системы, заключающейся в освобождении свободной (в данный момент) памяти и загрузки туда новой информации. Такая способность операционной системы позволяет организовать работу устройств ввода/вывода параллельно.

Операционная система состоит из инвариантной и проблемно-ориентированной части. Инвариантная часть представляет собой совокупность программ, не зависящих от специфики и особенностей проектируемых объектов. К инвариантной части операционной системы относятся программы управления диалогом проектирования (программы, обеспечивающие первый и второй уровни управления операционной системы). Операционная система САПР способна приспосабливаться к разнообразию условий и областей применения. Учитывая эту необходимость, операционная система имеет модульную и гибкую структуру.

Характерным свойством САПР должно стать наличие общего для всех программ системы образа проектируемого объекта. Поэтому одна из важнейших задач — интеграция отдельных локальных моделей в единую, т. е. задача создания информационной модели проектируемого объекта (ИМПО), хранящейся в базе данных системы.

Основные функциональные характеристики САПР ГЕОМЕТРИЯ следующие: время подготовки к работе — 5 мин; время ввода теоретической линии, сглаживание и формирование ее модели в базе данных — не более 15 мин; время ожидания при выводе графика линии — 10 с; качественный вывод линий чертежа протяженностью — 80...100 м; время решения самой сложной геометрической задачи (согласования каркаса) — 15...20 мин; база данных вмещает до 500 линий; производительность системы — один проект средней сложности за 8 ч.

ния геометрическими объектами, а также типами структур данных, представляющих эти объекты в памяти ЭВМ.

Рассмотрим два метода и соответствующие им модели геометрического моделирования. Первые из них ориентированы на структурно сложные объекты, состоящие из большого количества ограниченных по типу элементарных плоских и/или объемных компонентов. Типичными представителями их являются детали машин. Вторые соответствуют сложным поверхностям, характерным для транспортных машин различного назначения.

В системах первой группы метод детали описывается как замкнутое ограниченное пространство. В этом множестве будем различать поверхность (множество граничных точек) F и тело (множество внутренних точек T). Каждая поверхность, определяемая уравнением

$$F(x, y, z) = 0, \quad (8.2)$$

делит все пространство на две области: положительную область, где

$$F(x, y, z) > 0; \quad (8.3)$$

отрицательную область, где

$$F(x, y, z) < 0. \quad (8.4)$$

Описываемая таким образом поверхность является ориентированным элементом. Использование ориентированных элементов позволяет избежать неоднозначностей при формализации алгоритмов решения геометрических задач. При описании тел с помощью ориентированных поверхностей положительная область пространства считается относящейся к телу, а положительная нормаль к точке поверхности считается обращенной внутрь объекта.

Поверхности деталей машин обычно описываются алгебраическими функциями первого и второго порядков как поверхности тел:

эллипсоида $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0;$

однополостного гиперboloида $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0;$

двухполостного гиперboloида $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} + 1 = 0;$

конуса второго порядка $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0;$

эллиптического параболоида $\frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q} - z = 0; p > 0, q > 0;$

гиперболического параболоида $\frac{x^2}{2p} - \frac{y^2}{2q} - z = 0; p > 0, q > 0;$

плоскости $ax + by + cz + d = 0;$

эллиптического $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 = 0$, гиперболического $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} -$

$-1 = 0$ и параболического $y^2 - 2px = 0, p > 0$ цилиндров; сферы, кругового конуса $x^2 + y^2 + z^2 = 0; x^2 + y^2 - z^2 = 0$ соответственно.

Это обусловлено технологическими процессами, которые осуществляют формообразование поверхностей деталей. Различают два способа

Задается также вектор, нормальный к плоскости, содержащей дугу для окружности и ее части, а также множество точек, лежащих на кривой, если она аппроксимируется по точкам. В МСВ содержится информация о смежности граней объекта.

Алгебро-логическая модель трехмерного геометрического объекта состоит из совокупности уравнений, ориентированных граничных поверхностей объекта (8.1) и вспомогательных поверхностей. Кроме того, для объекта составляется логическое уравнение

$$D = F_2(D_1, D_2, \dots, D_n), \quad (8.6)$$

где F_2 — булева функция, зависящая от структуры объекта. Отдельные логические операции и функции трактуются в теоретико-множественном смысле как пересечение, объединение и дополнение положительных областей каждой из поверхностей D_i , образуя таким образом замкнутое тело.

На рис. 41 этот метод показан на примере плоской многоугольной фигуры. Пусть области D_i на плоскости xoy описываются следующими неравенствами:

$$\left. \begin{aligned} D_1: y - a &\geq 0; \\ D_2: y - x &\geq 0; \\ D_3: -y + x + a &\geq 0; \\ D_4: x &\geq 0; \\ D_5: y &\geq 0; \\ a &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.7)$$

Тогда фигура D описывается выражением

$$D = \bar{D}_1 \wedge (D_2 \vee D_3) \wedge D_4 \wedge D_5. \quad (8.8)$$

Алгебро-логическая модель объекта более компактна по сравнению с кусочно-аналитической моделью и не требует сложных вычислений при подготовке. Кроме того, использование этой модели позволяет значительно упростить решение основной позиционной задачи об инцидентности точки геометрическому объекту. Для этого используется специальный математический аппарат, позволяющий исследовать свойства геометрических объектов на основании его логической функции.

Определим для произвольной точки M пространства характеристическую функцию:

$$I(D_i, M) = \begin{cases} 1, & \text{если } M \text{ лежит внутри } D_i; \\ 0, & \text{если } M \text{ лежит на границе } D_i; \\ -1, & \text{если } M \text{ лежит вне } D_i. \end{cases} \quad (8.9)$$

Логическую функцию (8.6) преобразуем, заменив D_i на $I(D_i, M)$, а знаки пересечения, объединения, дополнения — на знаки конъюнкции, дизъюнкции и отрицания. Тогда

$$I(D, M) = F(I(D_1, M), I(D_2, M), \dots, I(D_N, M)).$$

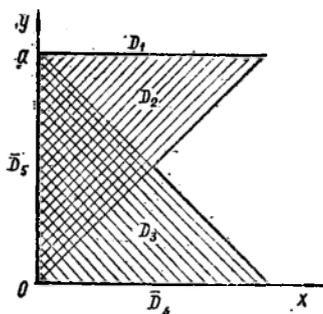


Рис. 41. Пример, иллюстрирующий возможности алгебро-логической модели.

$$\begin{aligned}
 & -|a - x - y + |x - y| + |2y - 2x - a|| - |-3a + x + 5y - \\
 & -|x - y| + |2y - 2x - a| - |a - x - y + |x - a| + \\
 & + |2y - 2x - a|||].
 \end{aligned}$$

Нами рассмотрены методы геометрического моделирования объектов, ограниченных сравнительно простыми выпуклыми или плоскими поверхностями. Однако многие машиностроительные детали ограничены поверхностями, которые не описываются алгебраическими уравнениями первого и второго порядков и требуют разработки более сложных методов формообразования поверхностей. Одним из наиболее развитых методов образования поверхностей такого класса является кинематический.

● *Кинематической поверхностью* называется геометрическое место точек, образованное непрерывным перемещением в пространстве линии, называемой образующей, по определенному закону. Например, плоские поверхности образованы поступательным перемещением образующей по прямолинейной направляющей; поверхности вращения получены вращением произвольной образующей линии вокруг неподвижной оси; винтовые поверхности получены винтовым движением образующей линии; линейчатые поверхности получены движением прямой линии в пространстве.

Закон движения образующей обычно определяется другой кривой, называемой направляющей.

Рассмотрим способ образования поверхности с помощью кинематического метода. Пусть в декартовой системе координат (o, x, y, z) имеется направляющая линия, заданная параметрическим уравнением $r = r(t)$. С каждой точки M этой линии связан репер Френе, образованный векторами касательной τ , нормали η и бинормали ξ (рис. 42). Положение репера Френе относительно декартовой системы координат задается шестью параметрами, три из них — декартовы координаты точки M и три — параметры ориентации. Направляющие косинусы a_{ij} векторов репера можно вычислить по формуле

$$a_{ij} = a_i l_j, \quad (8.10)$$

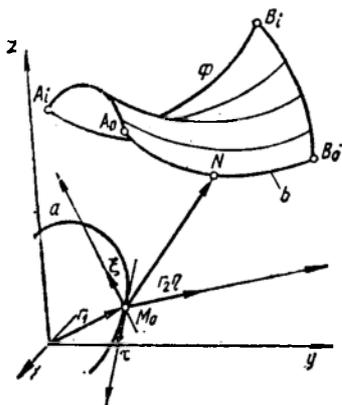


Рис. 42. Схема образования поверхности кинематическим методом.

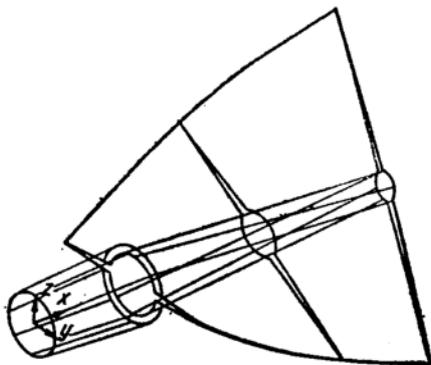


Рис. 43. Моделирование лопатки гидротурбины каркасно-кинематическим методом.

Второй функционал характеризует форму моделируемой кривой. В качестве этого функционала можно использовать выражение для оценки выпуклости функции

$$J = \min P''(a, x). \quad (8.12)$$

Это условие используется для уничтожения ложных точек перегиба на моделируемой кривой. На рис. 44 приведен пример моделирования контура полиномом с использованием рассмотренного метода. При этом

$$\begin{aligned} y_c = & 76\,173 - 118\,095 \cdot 10^{-1}x - 0,328672 \cdot 10^{-2}x^2 - 0,444459 \times \\ & \times 10^{-3}x^3 - 0,458369 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,95152310^{-5}x^5 + 0,181752 \cdot 10^{-6}x^6 - \\ & - 0,727394 \cdot 10^{-7}x^7 + 0,532592 \cdot 10^{-9}x^8 + 0,260535 \cdot 10^{-9}x^9 - \\ & - 0,597311 \cdot 10^{-11}x^{10} - 0,421095 \cdot 10^{-12}x^{11} + 0,156536 \cdot 10^{-13}x^{12} + \\ & + 0,173621 \cdot 10^{-15}x^{13} + 0,135889 \cdot 10^{-16}x^{14} - 0,152934 \cdot 10^{-17}x^{15}; \\ y_k = & -0,420467 \cdot 10^1 + 0,242811 \cdot 10^0x - 0,134927 \cdot 10^{-2}x^2 - \\ & - 0,787646 \cdot 10^{-3}x^3 - 0,228538 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,538015 \cdot 10^{-6}x^5 - \\ & - 0,515261 \cdot 10^{-7}x^6 + 0,422097 \cdot 10^{-9}x^7 + 0,467206 \cdot 10^{-10}x^8 + \\ & + 0,149881 \cdot 10^{-11}x^9 + 0,138066 \cdot 10^{-23}x^{10}. \end{aligned}$$

Для построения математической модели каркасно заданного геометрического объекта можно применять любые трансцендентные функции вида $y = f(x, a)$.

В этом случае общие недостатки метода следующие: метод не может использоваться для пространственных линий; определитель системы линейных уравнений часто бывает близким к нулю, тогда система становится неустойчивой; если кривая имеет вертикальные касательные, то она может моделироваться этими функциями; дискретизация функций не обеспечивает равномерность распределения точек по длине кривой, а это влияет на качество изображения на графическом терминале.

Более пригодными для использования в интерактивных системах проектирования являются конечно-элементные методы, среди которых наиболее известным является метод Кунса [3]. Для этого метода требуется, чтобы каркас был образован двумя семействами линий

$$\gamma_i(u) \text{ и } \Gamma_j(v); \quad i = 0, N; \quad j = 0, M.$$

Причем важно, чтобы для любых $i \in [0, N]$ и $j \in [0, M]$ выполнялось условие

$$r_{ij} = \gamma_i(u) \wedge \Gamma_j(v), \quad (8.13)$$

где r_{ij} — радиус-вектор точки пересечения.

Уравнение (8.13) называется условием согласованности линий каркаса.

Метод Кунса в простейшей форме заключается в представлении моделируемой поверхности в виде множества кусочков, лоскутков, стыковка между которыми осуществляется до заданного порядка непрерывности. Каждый лоскут функционально отображается на единичный квадрат параметрической плоскости, ограниченный кривыми

отсюда

$$\left. \begin{aligned} a_{3i}^k &= r_{i+1}^k + r_i^k - 2(r_{i+1}^k - r_i^k); \\ a_{2i}^k &= 3r_{i+1}^k - 3r_i^k - 2r_{i+1}^k - r_i^k. \end{aligned} \right\} \quad (8.23)$$

Неизвестные параметрические производные находим, подставляя (8.23) в условие стыковки дуг по вторым производным

$$a_{2i}^k + 3a_{3i}^k = a_{2i+1}^k. \quad (8.24)$$

После преобразований задача сведется к решению разностной системы

$$r_i^k + 4r_{i+1}^k + r_{i+2}^k = 3(r_{i+2}^k - r_i^k). \quad (8.25)$$

Для получения однозначного решения необходимо в точке с номером 0 и N задать направления касательных, т. е. векторы r_0^k и r_N^k . После решения этой системы можно однозначно определить уравнения границ лоскута Кунса.

Таким образом, для однозначного задания поверхности методом Кунса необходимо иметь массив координат точек линий, составляющих каркас, и вычисленный массив параметрических производных в этих точках. Это и есть D -модель поверхности.

Несложно показать, что в данном варианте метода вторые производные и выражения по параметрам u и v будут тождественно равны нулю. Поверхность в окрестности этих точек будет плоской.

Для того чтобы этого не произошло, рассматривают более сложные варианты метода Кунса, требующие задания вторых производных и функций стыковки второго рода [3]. В этом случае для задания поверхности нужно определять еще и r_{uu}, r_{vv} и $r_{u,v}$.

Таким образом, для задания необходимо иметь шесть N и M параметров ($r_{ij}, r_{ij}^u, r_{ij}^v, r_{ij}^{uu}, r_{ij}^{vv}, r_{ij}^{uv}, i = 1, N; j = 1, M$). В таком виде метод затруднительно применять для оперативной модификации формы поверхности, ибо изменение указанных величин приводит к сложным непредсказуемым изменениям поверхности, появлению ребер возврата, морщин. Метод может использоваться только при выполнении условия (8.13), в случае, если оно нарушено, необходимо решить сложную задачу по увязке линий семейств γ_i и Γ_j в каркасную сеть.

Дальнейшим совершенствованием метода Кунса явилось применение полиномиальных параметрических сплайнов [25]. Применение этого класса функций для моделирования гладких поверхностей имеет практическую основу. Известно, что при ручном проектировании гладких линий издавна применяется метод, заключающийся в представлении кривой в виде линии упругого равновесия нагруженной гибкой рейки. Если рассмотреть

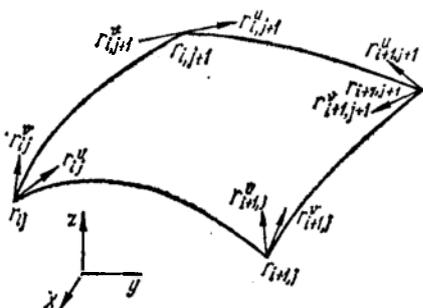


Рис. 45. Задание исходной информации для лоскута Кунса.

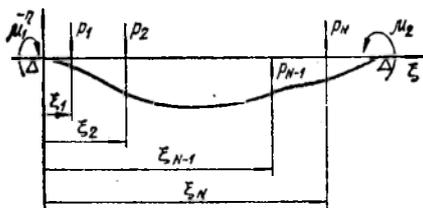


Рис. 46. Схема нагруженной рейки.

$i + 1$), будет определяться вектором

$$B_m = (B_0(t), B_1(t) \dots B_m(t)), \quad t \in [0, 1]. \quad (8.32)$$

Для кубических сплайнов вектор B следующий:

$$(B_0(t), B_1(t), B_2(t), B_3(t)) = 1/6 (t^3, t^2, t, 1) \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (8.33)$$

Таким образом, математическую модель кривой можно представить в виде

$$r(t) = B_m(t) C^i, \quad (8.34)$$

где

$$C^i = (C^i, C^{i+1}, \dots, C^{i+m}), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (8.35)$$

а математическую модель поверхности [67]

$$r^{ij}(u, v) = B_m(u) C^{ij} B_n(v), \quad (8.36)$$

где

$$C^{ij} = \begin{pmatrix} c^{i,j} & c^{i+1,j} & \dots & c^{i+n,j} \\ c^{i,j+m} & c^{i+1,j+m} & \dots & c^{i+n,j+m} \end{pmatrix}. \quad (8.37)$$

Задача сводится к определению коэффициентов C^i, C^{ij} по заданным геометрическим условиям. Наиболее часто для задания кривых используют точечный базис (x^i, y^i, z^i) и множество краевых условий, задаваемых в конечных точках: радиусы кривизны, направления касательных, что составляет основу языка описания (L -модель).

Для сплайнов нечетных степеней переход к D -модели выполняется решением разностной системы уравнений с фиксированием переменной t в точках 0 и 1. Так, для кубических сплайнов

$$C^t + 4C^{t+1} + C^{t+2} = 6r^t. \quad (8.38)$$

Если степень сплайна четная, то переменную t фиксируют внутри интервала $[0, 1]$, например для $t = 0,5$. В этом случае для $m = 2$ система имеет вид

$$C^t + 6C^{t+1} + C^{t+2} = 8r^t. \quad (8.39)$$

Системы (8.38) и (8.39) имеют дефект, равный двум. Для их замыкания используют краевые условия.

С целью вычисления коэффициентов C^{ij} в (8.36) фиксируют одну из переменных u или v и после суммирования по соответствующему индексу получают сплайн одного переменного:

$$r(0, v) = (B_{m,k}(0) C^{k,l}) B_{m,j}(v) = D^k B_{n,j}(v). \quad (8.40)$$

Коэффициенты D^k находятся из системы, аналогичной (8.38) или (8.39). Затем из решения систем

$$B_{m,k}(0) C^{kj} = D^k \quad (8.41)$$

вычисляются коэффициенты модели поверхности.

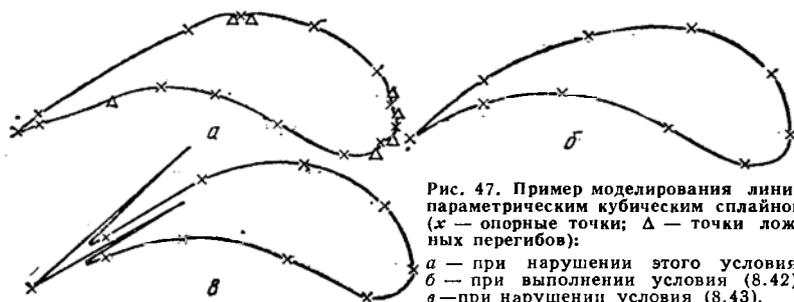


Рис. 47. Пример моделирования линии параметрическим кубическим сплайном (x — опорные точки; Δ — точки ложных перегибов):

а — при нарушении этого условия; б — при выполнении условия (8.42); в — при нарушении условия (8.43).

дачам построения и вывода изображения геометрического объекта на внешние устройства. Прежде чем задать основные преобразования координат, рассмотрим системы координат устройства ввода, геометрического объекта, устройства вывода, наблюдателя, с которыми имеют дело при автоматизации проектирования.

Система координат наблюдателя имеет большое значение для перспективных проекций. Если ввод и вывод выполняются с использованием одного физического устройства, то первая и третья системы координат совпадают.

Кроме перечисленных существует промежуточная система, так называемая система координат картинной плоскости. Определим понятие картины. Различают два основных типа линейного проецирования: центральное, когда проекционные лучи образуют конус, в вершине которого находится наблюдатель, и параллельное, когда проекционные лучи образуют цилиндр. Картинной называется плоскость, пересекающая лучи проецирования под определенным углом. Примем упрощающее допущение, что плоскость картины совпадает с плоскостью рабочего поля устройства вывода.

В соответствии с изложенным введем следующие преобразования координат: трехмерные аффинные преобразования относительно системы координат объекта; проекционные преобразования модели объекта на картинную плоскость; двумерные преобразования изображения в картинной плоскости.

Преобразования первой и третьей групп задаются невырожденными матрицами общего вида. Например, матрица поворота объекта вокруг оси oz имеет вид

$$A_1 = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8.45)$$

Проекционные преобразования задаются вырожденной матрицей. Например, если картинная плоскость совпадает с координатной, то матрица проецирования следующая:

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8.46)$$

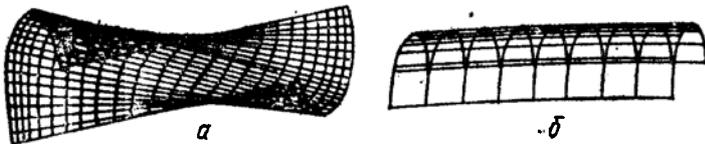


Рис. 49. Изображение лоскутов Кунса на экране дисплея.

После построения аналитической модели поверхности над ней можно выполнять различные графические операции. Для этой цели используется аппарат однородных координат.

Существует прямое отображение декартовых координат в однородные. Так, если декартовы координаты точки заданы вектором $r(x, y, z)$, а соответствующие однородные координаты в виде $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \omega)$, где ω — скаляр, имеющий смысл масштабного множителя, то:

$$x = \frac{\omega_x}{\omega}, \quad y = \frac{\omega_y}{\omega}, \quad z = \frac{\omega_z}{\omega}. \quad (8.51)$$

Пусть лоскут поверхности задан системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} x &= B_m(u) C_x^{ij} B_m(v); \\ y &= B_m(u) C_y^{ij} B_m(v); \\ z &= B_m(u) C_z^{ij} B_m(v). \end{aligned} \right\} \quad (8.52)$$

Выполняя преобразования проецирования, на плоскости получим некоторую параметризованную область x о y :

$$\left. \begin{aligned} x_{из} &= B_m(u) D_x^{ij} B_m(v); \\ y_{из} &= B_m(u) D_y^{ij} B_m(v), \end{aligned} \right\} \quad (8.53)$$

где $x_{из}$, $y_{из}$ — координаты точек картинной плоскости; D_x^{ij} , D_y^{ij} — коэффициенты модели изображения.

Проведя дискретизацию уравнений (8.53) по параметрам u и v , ЭВМ передает полученные массивы точек на внешнее графическое устройство, которое воспроизведет каркас в нужной проекции перемещением изображающей точки (перо, электронный луч) по траекториям поверхности графического устройства, заданными уравнениями (8.52).

Если изображение нас не устраивает, объект можно повернуть в пространстве. Для этого (8.51) необходимо умножить на матрицу (8.45), а затем выполнить проецирование, дискретизацию и отображение.

Примеры получения изображений лоскута приведены на рис. 49.

Рассмотрим решение одной задачи, наиболее часто встречающейся на ранних стадиях проектирования и связанной с управлением формой поверхности геометрического объекта. При этом проектное решение не всегда находят сразу, поскольку требуется, чтобы оно удовлетворяло нескольким, зачастую противоречивым критериям (например, гладкости, условиям функционирования, эстетики формы).

Управление формой поверхности можно выполнить с помощью кинематического метода. Для этого необходимо изменить параметры направляющей и образующей. Такими параметрами могут быть кривизна и кручение указанных линий.



Рис. 51. Отработка формы кривой методом Безье (штрихпунктирная линия — кривая Безье; сплошная — моделируемая кривая; сплошная с точками излома — полигон Безье);

a — первое приближение кривой; *б, в* — новые формы кривой, получаемые варьированием точек ломаной.

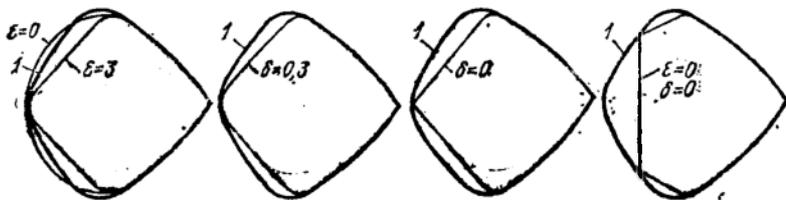


Рис. 52. К управлению формой кривой с помощью величины первой и второй производной (*1* — исходный контур).

рез вершины производящего полигона. Например, первые производные —

$$\begin{aligned} P'(0) &= n(P_1 - P_0); \\ P'(1) &= n(P_n - P_{n-1}). \end{aligned} \quad (8.57)$$

Вторые производные —

$$\begin{aligned} P''(0) &= n(n-1)(P_0 - 2P_1 + P_2); \\ P''(1) &= n(n-1)(P_n - 2P_{n-1} + P_{n-2}). \end{aligned} \quad (8.58)$$

В общем случае высшие производные *k*-го порядка определяются заданием *k*-смежных вершин.

Варьируя этими вершинами, пользователь меняет гладкость моделируемой кривой, а следовательно, и ее форму. На практике эта процедура выглядит так. Сначала конструктор делает на дисплее набросок желаемой кривой, затем указывает вершины ломаной Безье, которая породит первое приближение кривой (рис. 51, *a*). Если нет разумных критериев, то точки ломаной расставляют наудачу. Затем варьируют этими точками, добавляя или удаляя новые. Каждой такой операции соответствует новая форма линии (рис. 51, *б* и *в*).

Другой метод управления формой кривых предложен в работе [86]. Этот метод позволяет варьировать форму кривой с помощью параметров, характеризующих гладкость линии.

Пусть *i*-я дуга сплайна записывается в виде (8.34). Выберем на ней узлы $t_i \in [0, 1]$, например $t_1 = 1/3$, $t_2 = 1/2$, $t_3 = 2/3$. В результате

дом функциональных подсистем: машинной графики и документирования, прочностных конструкторских расчетов, подготовки программ для станков с ЧПУ. В совокупности они образуют интегрированную систему на основе единства технической и программно-информационной базы.

Наполнение в системе геометрических данных. В данном случае это банк геометрических объектов, ранее спроектированных системой. Имея параметризованные описания объектов в постоянно пополняемой базе данных системы, конструктор может экономить время на проектирование аналогичных объектов. Эффект еще более ощутим, если с геометрическими объектами-аналогами в базе данных хранится вся ранее созданная проектная информация, включая, например, технологические процессы изготовления, программы для станков с ЧПУ. Конструктор в САПР должен иметь возможность создавать персональную информационную систему, превращая тем самым САПР в распределенную систему.

Придание системам геометрического моделирования свойств, характерных для систем искусственного интеллекта. Практически это означает, что система способна самостоятельно выполнять новые и все более сложные проектные работы, не требуя от конструктора указаний, как ей их выполнять. Средством реализации таких свойств системы являются банки геометрических знаний и аппарат семантических моделей.

Систему геометрического моделирования следует рассматривать как сложную, в состав которой входят собственно функциональные подсистемы со специфическими информационными ресурсами: формообразования объектов; геометрических расчетов и геометрического анализа объектов; модификации и редактирования форм и структуры геометрических объектов; размещения геометрических объектов на плоскости и в пространстве; моделирования кинематики геометрических конструкций; постановки и решения оптимизационных геометрических задач.

К системе должен быть удобный и естественный доступ с удаленных графических терминалов и терминальных станций по каналам связи.

9 АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ

1. МЕТОД КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Задачи пространственного конструирования, описываемые уравнениями в частных производных, эффективно решаются с помощью метода конечного элемента, диапазон применения которого чрезвычайно широк: машиностроение и строительное дело, гидро- и аэродинамика, горное дело и новая техника, задачи устойчивости и распространения, моделирование и математическая физика [27, 65, 84].

лера — Лагранжа типа

$$\frac{\partial}{\partial x} F_{u_x} + \frac{\partial}{\partial y} F_{u_y} - F = 0. \quad (9.5)$$

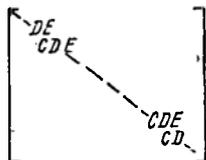
Для частного, но широко используемого на практике случая, когда

$$\left. \begin{aligned} F &= 1/2 (u_x^2 + u_y^2), \\ I(u) &= \iint_R [1/2 (u_x^2 + u_y^2) + 2v] dx dy \end{aligned} \right\} \quad (9.6)$$

выражение (9.5) сводится к уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0. \quad (9.7)$$

В случае применения метода конечного элемента для решения линейных одномерных задач формируемая алгебраическая система (9.3) имеет простую ленточную структуру, для задач размерности выше двух структура матрицы уравнений становится блочно-ленточной. Например, для двухмерных задач с билинейной интерполяцией по площади конечного элемента матрица уравнений приобретает трехдиагональную структуру вида



Существенным при вариационной постановке задачи является способ задания краевых условий. Различают условия Дирихле, или вынужденные, геометрические условия (однородные и неоднородные)

$$u(0) = 0, \quad u = g \quad (9.8)$$

и условия Неймана, или естественные динамические краевые условия

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad (9.9)$$

где n — внешняя нормаль к границе области определения функции ∂R .

В первом случае все базисные функции на границе области определения удовлетворяют условию (9.8), во втором — только часть из них.

В различных модификациях метода конечного элемента вместо (9.4) при постановке оптимизационной задачи используют другие функционалы. Например, для обеспечения условий устойчивого равновесия минимизируется выражение

$$I(u) = \int_{x_0}^{x_1} F(x, u(x), u'(x)) dx, \quad (9.10)$$

при этом условие минимума для функции (9.10) сводится к удовлетворению функцией $u(x)$ дифференциального уравнения

$$\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial u'} = 0. \quad (9.11)$$

$$\gamma_{i,j+1}(x, y) = \frac{1}{h_1 h_2} (x_{i+1} - x)(y - y_j);$$

$$\delta_{i+1,j+1}(x, y) = \frac{1}{h_1 h_2} (x - x_i)(y - y_j);$$

$$0 \leq i \leq m-1, \quad 0 \leq j \leq n-1.$$

Дискретная аппроксимация некоторой функции по всей области определения R определяется выражением, аналогичным (9.2),

$$P_1(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \varphi_{ij}(x, y) f_{ij}. \quad (9.18)$$

Базисные функции $\varphi_{ij}(x, y)$ для единичной прямоугольной области R находятся, например из условий:

$$\varphi_{ij}(x, y) =$$

$$= \begin{cases} \left[\frac{x}{h} - (i-1) \right] \left[\frac{y}{h} - (j-1) \right], & i-1 \leq \frac{x}{h} \leq i, \quad j-1 \leq \frac{y}{h} \leq j; \\ \left[\frac{x}{h} - (i-1) \right] \left[(j+1) - \frac{y}{h} \right], & i-1 \leq \frac{x}{h} \leq i, \quad j \leq \frac{y}{h} \leq j+1; \\ \left[(i+1) - \frac{x}{h} \right] \left[\frac{y}{h} - (j-1) \right], & i \leq \frac{x}{h} \leq i+1, \quad j-1 \leq \frac{y}{h} \leq j; \\ \left[(i+1) - \frac{x}{h} \right] \left[(j+1) - \frac{y}{h} \right], & i \leq \frac{x}{h} \leq i+1, \quad j \leq \frac{y}{h} \leq j+1, \end{cases} \quad (9.19)$$

где $1 \leq i, j \leq m-1, mh = 1$.

Базисные функции $\varphi_{ij}(x, y)$ являются финитными, т. е. они равны нулю, за исключением области $[x_{i-1}, x_{i+1}] \times [y_{j-1}, y_{j+1}]$.

Для треугольных конечных элементов со сторонами (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3$ (рис. 54) интерполяция значений функций $f(x, y)$ на треугольном элементе выполняется следующим образом:

$$P_1(x, y) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) f_i, \quad (9.20)$$

где $f_i = f(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, 3$.

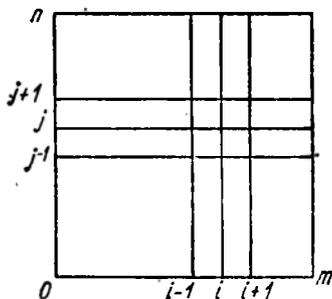


Рис. 53. К выбору конечных элементов прямоугольной формы.

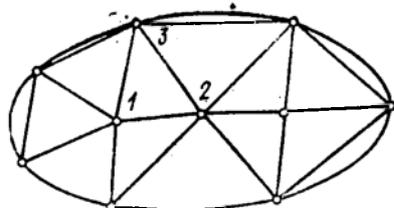


Рис. 54. К выбору конечных элементов треугольной формы.

где δ_x, δ_y — операторы центральной разности, составляющие

$$\delta_x u_{ij} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2h}, \quad \delta_y u_{ij} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2h},$$

увеличивает число поддерживающих конечных элементов до 16-ти, но при этом обеспечивает непрерывность первой и второй производных аппроксимирующих выражений для двух смежных узлов сетки области определения функции.

Методы аппроксимации. Помимо метода Рунца в практических задачах широко используются также методы Галеркина и коллакаций [84].

Расширяя круг решаемых задач на задачи, не соответствующие строго принципу вариации, Б. Г. Галеркин показал, что аппроксимационное решение (9.2) удовлетворяет уравнению вида

$$a(u, v) = (f, v) \quad (9.21)$$

для всех v из N -мерного пространства базисных функций φ_i , где скобка типа (f, v) соответствует скалярному произведению векторов.

При этом (9.21) не условие минимума, а является лишь условием стационарной точки.

В частности для дифференциального оператора

$$A = -\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

левая часть уравнения (9.21) приобретает вид

$$a(u, v) = \iint_R \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] dx dy. \quad (9.22)$$

При этом оказывается возможным определять аппроксимирующие решения функции U и тестовые функции V через одно и то же семейство базисных функций φ_i ($i = 1, \dots, N$).

Метод Галеркина применим и для некоторых нелинейных задач. Например, нелинейному уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(p(u) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q(u) \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) + f(x, y) = 0$$

соответствует уравнение Галеркина вида

$$a(u, \varphi_i) = \iint_R \left\{ p(u) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \right) + q(u) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \right) \right\} dx dy = (f, \varphi_i),$$

$$i = 1, \dots, N.$$

Метод коллакаций во многом аналогичен методу Галеркина. Он предусматривает определение коэффициента α_i для (9.2) из условия, что исходное дифференциальное уравнение удовлетворяется только в некоторых выбранных точках. Для обычных дифференциальных уравнений метод коллакаций по точности соответствует методу Галеркина при выборе той же совокупности базисных функций φ_i ($i = 1, \dots, N$). Например, для базисных функций в виде кусочных полиномов Эрмита степени $2k-1$ (что необходимо для решения дифференциальных урав-

где скобка типа (φ_i, ψ_j) соответствует скалярному произведению векторов, а верхний индекс ' означает дифференцирование по x .

Примеры применения. С помощью метода Рунца решить дифференциальное уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - 2 = 0,$$

если $u(x, y)$ определена в области $R = [-1/2\pi, 1/2\pi] \times [-1/2\pi, 1/2\pi]$ и заданы граничные условия $u = 0$ на границе ∂R , т. е.

$$u(x, \pm 1/2\pi) = 0 \quad \text{при } |x| \leq 1/2\pi,$$

$$u(\pm 1/2\pi, y) = 0 \quad \text{при } |y| \leq 1/2\pi.$$

В соответствии с методом конечного элемента при выборе коэффициентов в (9.2) должна решаться вариационная задача

$$\delta I(v) = 0,$$

где

$$I(v) = \iint_R [1/2(v_x^2 + v_y^2) + 2v] dx dy. \quad (9.29)$$

Аппроксимирующая функция находится на области R , разделенной на $(N + 1)^2$ квадратных конечных элементов с помощью сетки с шагом h . Тогда находятся N^2 базисных функций $\varphi_{ij}(x, y)$, $i, j = 1, \dots, N$, определяемые (9.19).

Аппроксимационное решение ищется в форме

$$U(x, y) = \sum_{i,j=1}^N U_{ij} \varphi_{ij}(x, y),$$

где используются значения U_{ij} , полученные из системы уравнений

$$\frac{\partial}{\partial U_{ij}} I \left(\sum_{k,l=1}^N U_{kl} \varphi_{kl}(x, y) \right) = 0, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (9.30)$$

С учетом (9.29) уравнения для нахождения коэффициентов приобретают вид

$$SU + P = 0, \quad (9.31)$$

где

$$S_{ij} = \iint_R \left\{ \left(\frac{\partial \varphi_{kl}}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \varphi_{kl}}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial y} \right) \right\} dx dy,$$

$$P_{ij} = 2 \iint_R \varphi_{ij} dx dy.$$

Прямое вычисление ранее приведенных интегралов для случая билинейных квадратных элементов ведет к системе уравнений

$$3U_{ij} - 1/3 \sum_{k=l-1}^{l+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} U_{kl} + 2h^2 = 0, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (9.32)$$

где $U_{kl} = 0$, если $k, l = 0, N + 1$.

уравнения Новье — Стока (9.24):

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{1}{\gamma} \left(u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} \right) = 0.$$

Для одномерного случая справедливо выражение

$$\frac{d^2 W}{dx^2} - k \frac{dW}{dx} = 0, \quad 0 \leq x \leq 1,$$

где $k = \text{const}$.

Интервал $[0, 1]$ покрывается N равными отрезками длиной $h = 1/N$ так, что узлы сетки расположены на расстоянии $x = ih, i = 1, 2, \dots, N$.

Граничные условия

$$W = \begin{cases} 1 & (x = 0); \\ 0 & (x = 1) \end{cases}$$

приводят к теоретическому решению

$$W(x) = \frac{e^{kx} - e^{kx}}{e^k - 1}.$$

При использовании метода Галеркина ищется приближенное решение

$$W(x) = \sum_{i=1}^N W_i \varphi_i(x), \quad (9.34)$$

которое удовлетворяет системе уравнений

$$(W' \varphi_i)' + k(W', \varphi_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (9.35)$$

являющейся частным случаем системы уравнений (9.28).

Если базисные функции φ_i кусочно-линейные, то система уравнений (9.35) преобразуется в систему разностных уравнений вида

$$\begin{aligned} (1 - 1/2 kh) W_{i+1} - 2W_i + (1 + 1/2 kh) W_{i-1} &= 0, \\ i &= 1, 2, \dots, N-1, \end{aligned}$$

которая имеет теоретическое решение

$$W_i = A_1 + B_1 \left(\frac{1 + 1/2 kh}{1 - 1/2 kh} \right)^i, \quad i = 1, 0, \dots, N.$$

Решение уравнения (9.26) будет сходиться при условии

$$h > 2/k.$$

Если базисные функции φ_i кусочно-квадратичные, то система уравнений (9.35) преобразуется в систему разностных уравнений

$$\begin{aligned} (1 - 1/2 hk) W_{i+1} - 4(2 - 1/2 hk) W_{i+1/2} + 14W_i - \\ - 4(2 + 1/2 hk) W_{i-1/2} + (1 - 1/2 hk) W_{i-1} &= 0, \\ i &= 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned}$$

для внутренних узлов, и

$$(4 - hk) W_i - 8W_{i-1/2} + (4 + hk) W_{i-1} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

для граничных.

где $\alpha = [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_{N-1}]^t$, $S = (1 + \alpha L) A - LB$, $L = \frac{hk}{2\varepsilon}$, а матрицы M , A и B определяются выражениями

$$M = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 4 & 1 - \frac{3}{2}\alpha & & & & \\ 1 + \frac{3}{2}\alpha & 4 & 1 - \frac{3}{2}\alpha & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & \cdot \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 1 & & & \\ 1 & -2 & 1 & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & & \\ -1 & 0 & 1 & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot \end{bmatrix}.$$

Полагая, что (9.37) имеет решение в виде

$$U = xe^{\lambda t}, \quad (9.38)$$

с учетом (9.37), находим характеристическое уравнение

$$(h^2 \lambda M - \varepsilon S) x = 0, \quad (9.39)$$

корни которого определяют собственные значения матрицы решения.

Если обозначить $\bar{\lambda} = \frac{h^2 \lambda}{\varepsilon}$, то корни уравнения (9.39), как можно показать, удовлетворяют условию [83]:

$$[4 - (1 - \frac{9}{4}\alpha^2) C] - \bar{\lambda}_i^2 + 6[4(1 + \alpha L) + (2 - \alpha L) C] \bar{\lambda}_i + 36[(1 + \alpha L)^2 - \{(1 + \alpha L)^2 - L^2\} C] = 0, \quad (9.40)$$

$$i = 1, 2, \dots, N - 1,$$

где
$$C = \cos^2 \frac{i\pi}{N}.$$

Корни $\bar{\lambda}_i$ будут действительными, если

$$\sin^2 \frac{i\pi}{N} \leq \frac{12[3(1 + \alpha L) - L^2]}{[3\alpha + L(3\alpha^2 - 2)]^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N - 1. \quad (9.41)$$

Таким образом, все корни будут действительными, если

$$L \leq \frac{2 - \alpha}{\frac{4}{3} - 2\alpha - \alpha^2}. \quad (9.42)$$

Условие (9.42) получают из (9.41), полагая $i = N/2$.

Все корни будут комплексными, если

$$\alpha < \frac{1}{3} - 1/L, \quad (9.43)$$

в чем можно убедиться, подставляя $i = 0, N$ в выражение (9.41).

Граничные кривые, соответствующие условиям (9.42) и (9.43), приведены на рис. 57, а. Для значений α и L , лежащих в заштрихованной области, реализуются и действительные и комплексные корни.

На рис. 57, б и в отображены действительные части собственных значений для $h = \frac{1}{10}$ ($N = 10$) и $\alpha = 0$; 1 и L , изменяющихся в

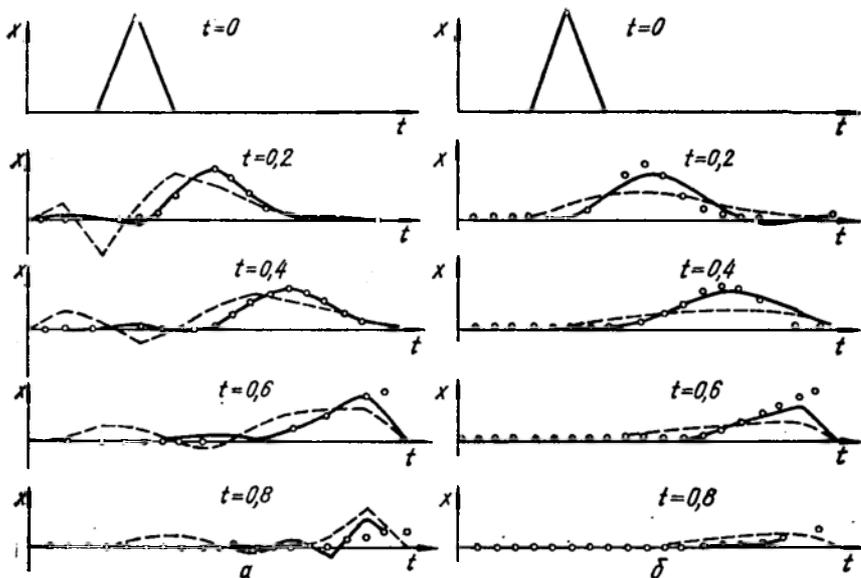


Рис. 58. Распространение треугольного импульса во времени для $\alpha = 0$ (а) и $\alpha = 1$ (б).

из которого следует, что собственные значения $\bar{\lambda}_i$ будут действительными и отрицательными, если

$$L \leq \frac{1}{1-\alpha}, \quad -1 < \alpha < 1 \quad (9.45)$$

или

$$L > 0, \quad \alpha \geq 1.$$

Условия (9.44) не зависят от i , поэтому значения $\bar{\lambda}_i$ или все вещественны, или все комплексные в зависимости от значений пары (α, L) . Граничная кривая $L = \frac{1}{1-\alpha}$ также показана на рис. 57, а.

На рис. 58 приведено полное решение для случая, когда треугольный импульс с базой 0,2, стартуя в момент $t = 0$, дрейфует в плоскости (x, t) , пока не встретит правую ее границу $x = 1$. При этом $h = \frac{1}{10}$, $k = 1$, $\epsilon = 0,01$ ($L = 5$), $\alpha = 0$ (рис. 58, а) и $\alpha = 1$ (рис. 58, б).

Сплошной линией показано решение, основанное на уравнении (9.39), пунктирной — на уравнении (9.44). Точками с шагом $1/20$ отмечено точное теоретическое решение.

К настоящему времени в инженерной практике широко эксплуатируется ряд программ пространственного конструирования, реализующих различные модификации метода конечного элемента. В частности, универсальная программа SAFE успешно применялась для моделирования биполярных и МОП-транзисторных структур (фирма ИБМ), программа ПРОЧНОСТЬ — для проведения расчетов на прочность авиационных и других конструкций, программа ЛАДА — для автоматизированного проектирования железобетонных конструкций

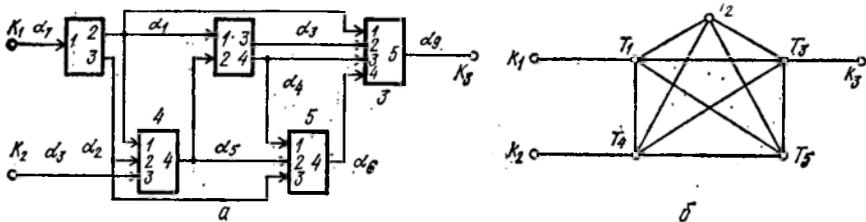


Рис. 59. Пример функциональной схемы объекта (а) и его модели (б).

и ультраграфов. В этих моделях вершинам соответствуют компоненты объекта. В моделях объекта в виде графа каждое соединение отображается в совокупность ребер, соединяющих соответствующие вершины (рис. 59, а, б). В различных видах моделей могут использоваться различные совокупности таких ребер. Например, в гиперграфовых моделях каждое соединение (цепь) представляется гиперребром α_i (рис. 60, а). Во многих случаях предпочтительней использовать соответствующий ему граф Кенига (рис. 60, б), представляющий собой двудольный (бихроматический) граф с двумя непересекающимися множествами вершин, соответствующих компонентам T_i и гиперребрам (соединениям) α_j . И, наконец, в ультраграфовых моделях каждое гиперребро имеет ориентацию, указывающую на источники и потребители сигналов (рис. 60, а).

В более точных моделях объекта вершины теоретикографовых моделей соответствуют отдельным частям компонентов (например, их контактам). Такие модели используются при решении задач трассировки соединений между компонентами.

Описание проектируемого объекта всегда имеет иерархическую структуру, моделью которой является ориентированное корневое дерево. Наличие иерархической структуры связано с процессом последовательного построения все более детальных моделей объекта. Таким образом, конструкторские задачи допускают двухуровневое или трехуровневое рассмотрение. При двухуровневом представлении, например, компонент $(i + 1)$ -го уровня рассматривается как весь объект, а компоненты i -го уровня как компоненты этого объекта. Представление объекта в виде совокупности блоков разного уровня определяет формальную структурную его модель. Соответствующая совокупность геометрических моделей определяет структурную модель его конструкции. Как функциональное, так и конструкторское деление объекта обладает иерархией.

Иерархическая структурная модель объекта и его конструкции, реализованные делением всего объекта на блоки разного ранга, обеспечивает удобство проектирования, изготовления, эксплуатации и является необходимым условием для применения методов автоматизации.

Постановка и решение конструкторских задач невозможны без определения математической модели монтажного пространства для каждого ранга блоков. Монтажным пространством блока i -го ранга называется некоторая область, ограниченная габаритами этого блока. Монтажное пространство является метрическим пространством, в котором размещаются блоки $(i - 1)$ -го ранга и осуществляется их коммутация.

номиально полным проблемам, для их решения используются приближенные (эвристические) алгоритмы. Рассмотрим несколько традиционных задач конструирования и простейшие алгоритмы их решения [22, 38, 53, 1].

Задача размещения одногабаритных элементов. При решении ее обычно используется регулярное монтажное пространство и модель объекта в виде графа. Задача состоит в расположении вершин графа в позиции пространства так, чтобы минимизировать суммарную длину ребер. Рассмотрим последовательный алгоритм (основной идеей этого алгоритма является идея упорядочения вершин по определенным признакам). В установленной очередности для каждой из них определяется наилучшая позиция (например, по суммарной длине ребер с уже размещенными вершинами). Затем процесс повторяется для оставшихся вершин и свободных позиций.

Для улучшения решения часто используются итерационные алгоритмы, основанные на парной или групповой перестановке вершин. Две вершины переставляются, если это уменьшает суммарную длину ребер графа. Существующие алгоритмы, в основном, отличаются способами выбора пар для пробного обмена.

Задача размещения разногабаритных элементов. Наиболее эффективно данная задача решается при использовании непрерывного монтажного пространства. В общем случае задача заключается в определении координат прямоугольных элементов таких размеров, что каждый прямоугольник, отображающий компонент, расположен в прямоугольной области A размещения; любые два прямоугольника не пересекаются и удалены друг от друга и от границы A на расстояние, не меньшее d ; ориентированные компоненты устанавливаются в заданной ориентации; зазоры между соседними прямоугольниками незначительно отличаются от заданной величины d_0 ; плотность заполнения A близка к постоянной величине; площадь A близка к минимальной; размеры всех прямоугольников лежат в заданных пределах и минимально отличаются от исходных; обеспечиваются наиболее благоприятные условия для последующего этапа трассировки соединений между компонентами.

Решение выполняется в два этапа. На первом, используя точечную аппроксимацию компонентов, определяется относительное размещение компонентов (их идеальные координаты); на втором — размещаются прямоугольники и выбирается их форма с учетом идеальных координат. Для решения первой задачи составляется и решается уравнение равновесия материальной системы точек, дуальное матричному уравнению эквивалентной схемы замещения объекта [53].

Второй этап является реализацией последовательно-одиночного плотного размещения с учетом идеальных координат. Пусть q компонентов уже размещены. Вся область A разбита на две: свободную и занятую. На границе свободной области определяется горизонтальный сегмент с минимальной Y -координатой (чтобы форма занятой области была, по возможности, близкой к прямоугольной после установки ($q + 1$)-го компонента).

Затем выбирается компонент, идеальные координаты которого минимально отличаются от координат начала сегмента. Данная

поминаются все свободные неотмеченные клетки, соседние с a . Им присваивается единичная масса. Совокупность клеток равной массы образует фронт. Номер фронта совпадает с массой образующих его клеток. На шаге k просматриваются и запоминаются все свободные неотмеченные клетки, соседние клеткам ($k - 1$) фронта. Эти клетки образуют k -й фронт. Волна распространяется до тех пор, пока она не достигнет клетки b или k -й фронт не окажется пустым.

7	8	9	8	7	8	9	9	
6	7	8	8	6	7	8	9	
5	8	8	8	5	6	7	8	9 b
4	3	2	3	4	5	8	9	
3	2	1	8	8	8	8		
2	1	0	1	8	7	8	9	
3	2	1	2	8	6	7	8	9
4	3	2	3	4	5	6	7	8
5	4	3	4	5	6	7	8	9

Рис. 61. Проведение соединений по волновому алгоритму Ли.

В первом случае путь существует, а во втором нет. Для проведения пути просматриваются все отмеченные клетки, соседние с b , и выбирается клетка d с минимальной массой. Затем процесс повторяется для клетки d и т. д. до тех пор, пока не достигнет a . Этот путь — кратчайший (из ортогональных).

Высокая плотность монтажа достигается с помощью топологических алгоритмов трассировки, предусматривающих возможность при последовательном проложении соединений осуществлять необходимую деформацию ранее построенных проводников: перемещать их, раздвигать и т. д. [54]. При этом трассировка осуществляется в два этапа. На первом — определяется взаимное расположение соединений в слоях плоской конструкции без точного задания их геометрии. Работающий здесь алгоритм относится к классу волновых, но используется монтажное пространство, существенно отличающееся от дискретной модели Ли. Плоскость клетки разбивается на минимальное число крупных прямоугольных клеток, свободных или содержащих контактные площадки и границы запрещенных зон. Состояние каждой клетки определяется пропускной способностью ребер (количеством линий, которые можно проложить в клетке вдоль осей x и y , не нарушив конструктивных ограничений) и кодом расположения проводников в отдельных клетках. Последние естественным образом стыкуются, поскольку смежные стороны клеток пересекаются одинаковым числом проводников. Уже проложенные соединения делят клетки на области, ограниченные участками соединений и сторон клеток. Таблица состояний, описывающих каждую область клеток, на этапе распространения волны позволяет определять для каждой клетки возможные направления движения. Все смежные области включаются во фронт волны при наличии пропускной способности у соответствующих сторон. При прокладке соединения из таблиц выбирается код рисунка расположения проводников в отдельных клетках и одновременно уменьшается пропускная способность ребер, пересекаемых проводником. Эффект смещения соединений достигается заменой рисунка расположения проводников в поле клетки.

На втором этапе строятся точные геометрические конфигурации проводников и осуществляется их привязка к геометрии платы.

Заключительным этапом конструирования является контроль основных параметров геометрической модели и выпуск конструкторской

стратегия ориентирована на минимизацию отклонения реальных координат компонентов от идеальных.

При проверке возможности размещения компонента учитывается возможность уменьшения зазоров до d , деформация компонента и его поворот. В случае невозможности установки компонента испытывается следующий претендент. Если допустимый претендент не найден, сглаживаются границы за счет уменьшения свободной области.

Задачи периодического размещения геометрических объектов, встречающиеся, например, при штамповке заготовок из рулонных и листовых материалов, также решаются методом последовательно-одиночного размещения. Введенные в работе [77] функции плотного размещения и годографа вектор-функции плотного размещения позволяют формализовать используемый алгоритм решения поставленной задачи. При этом годограф соответствует замкнутой линии, ограничивающей область возможных положений данного объекта, которая уточняется после каждого очередного размещения при условии, что размещение предыдущих объектов считается фиксированным. Для записи условий взаимного непересечения объектов сложной геометрической формы и размещения объектов внутри области удобно воспользоваться аппаратом R -функций [63].

Компоновка блоков. В качестве модели объекта используется обычно гиперграф. Задача заключается в разрезании объекта на части. Таким образом, чтобы минимизировать некоторый критерий (например, число соединений между блоками) при определенных ограничениях.

В последовательных алгоритмах компоновка блоков производится их последовательным заполнением. Выбор очередной вершины гиперграфа в компоновке блок производится по максимуму (минимуму) некоторого частного критерия, характеризующего целесообразность выбора данной вершины. Если таких показателей несколько, то используются методы их свертки.

Итерационные алгоритмы улучшения начальной компоновки аналогичны итерационным алгоритмам размещения.

Трассировка соединений. Рассмотрим трассировку, использующую регулярное монтажное пространство в виде технологической сетки. Пусть имеется семейство критериев, которые лексикографически упорядочены. Наиболее распространен волновой алгоритм (алгоритм Ли).

Множество клеток монтажного пространства состоит из подмножеств свободных и занятых. Трассы соединений могут проходить только по свободным клеткам, причем после проведения трассы все клетки, ей соответствующие, уже считаются занятыми.

Предположим, что необходимо определить путь минимальной длины между контактами a и b . Поиск пути состоит из двух этапов — распространения волны и проведения пути. На первом этапе моделируется распространение волны по свободным клеткам от клетки a (рис. 61).

В процессе распространения некоторым клеткам соответствует значение функции $f(c)$, называемой массой клетки. Клетка считается неотмеченной, если ее масса равна нулю. Клетке (начало пути) присваивается масса $f(a) = 0$. Тогда масса любой отмеченной клетки определяет длину от этой клетки до a . На первом шаге просматриваются и за-

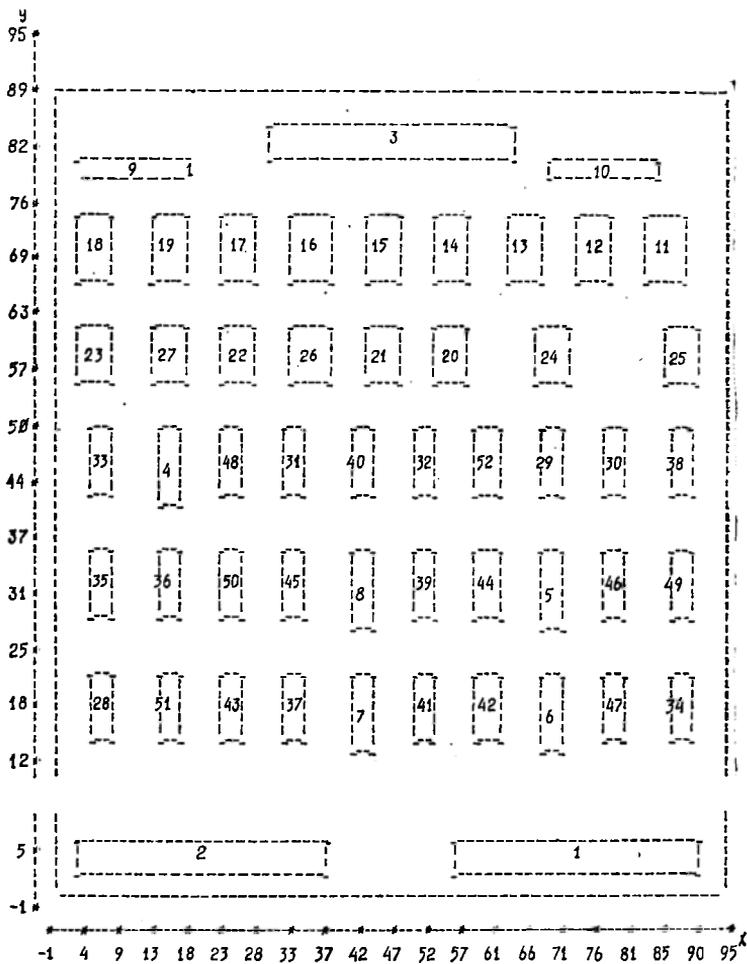


Рис. 62. Фрагмент эскиза размещения разногабаритных элементов на плате.

документации. Такой контроль включает и уточнение ряда параметров моделей верхних уровней (например, функциональных с учетом паразитных эффектов в конструкции), повторное моделирование и возврат на предшествующие стадии. Конструкторская документация включает информацию для управления программных автоматов для изготовления и контроля изделий.

Одним из возможных примеров подсистемы разработки плоских конструкций является пакет программ автоматической компоновки и размещения элементов на двухсторонних печатных платах ПАРК, входящий в состав функционального программного обеспечения АРМ2-01.

Пакет предназначен для покрытия проектируемой логической схемы стандартными микросхемами из заданного набора. Пакет преобразует логическую схему, содержащую до 1000 логических элементов,

10 АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА (ТПП)

10.1. СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ ТПП

Технологическая подготовка производства — второй этап после проектирования в цикле разработки нового изделия. Целью его является создание проекта производственного процесса и его технологического обеспечения на основе проекта изделия. Информация, создаваемая в инженерных службах ТПП, должна отвечать на вопрос — как должно изготавливаться изделие, чтобы оптимизировать технико-экономические показатели деятельности предприятия, его выпускающего. Эта информация создает базис нормативно-технических данных, необходимых для организации управления предприятием. Поэтому от качества информации, создаваемой в ТПП и отражаемой в технологической документации, в значительной степени зависит эффективность производства и качество продукции.

Технологическая подготовка производства — это сложный вид инженерной деятельности, включающей решение ряда взаимосвязанных инженерно-технических задач в сфере технологии и организации производства, среди которых основное место занимают проектно-технологические задачи. Отметим некоторые особенности ТПП как системной деятельности.

Технологический проект производства разрабатывается как компромисс между требованиями конструкции изделия и возможностями производства. В связи с этим уже с начальных стадий разработки проекта объекта технологи должны начинать обработку его на технологичность.

Технологическое оборудование и способы его использования являются наиболее динамичными, подверженными быстрым изменениям компонентами производства. В связи с этим и технологические решения, принимаемые при подготовке производства, должны отражать не только специфику конструкции данного изделия, но и прогнозировать производственно-технологические условия на предприятии к моменту запуска его в производство.

Автоматизация производственных процессов на базе программно-управляемого от ЭВМ технологического оборудования (станки с ЧПУ, роботы, автоматизированные склады и т. д.) ставит перед ТПП новую задачу — разработку соответствующих управляющих программ для такого оборудования, воплощающих в себе результаты проектирования как самого изделия, так и технологической подготовки его производства.

Объем решаемых задач и специфика деятельности в ТПП определяет большую трудоемкость и длительные сроки проведения проектных работ на предприятии. Затраты времени на проектирование операционной технологии на одну деталь в зависимости от ее сложности составляет от нескольких часов до недель. В этих условиях необходи-

технологические разработки по изготовлению опытных образцов изделия; результаты технологических проб; ведомости наличного и заказного оборудования и его паспортные данные; указания плановых органов о типе, характере и масштабе производства изделий; ведомости о наличии универсальной, нормализованной и заказной специальной оснастки, групповых приспособлений; сведения о существующих предметно-поточных участках; классификаторы конструктивных элементов изделий; межцеховые ТУ на поставку полуфабрикатов; типовые и нормализованные техпроцессы, нормативы расхода материалов.

На стадии предварительного технологического проектирования выполняется: разработка перечня деталей, агрегатов, узлов, покупных изделий, полуфабрикатов, входящих в изделие; расцеховка всех деталей, узлов, изделий; первичное группирование и классификация деталей; график проектирования и изготовления специальной оснастки; заказы на проектирование специальной оснастки; расчет норм расхода материалов на детали, узлы, изделия и площади гальванопокрытий; предварительное нормирование изготовления деталей, узлов, изделий; расчет загрузки участков, цехов, расчет потребных мощностей; предварительное формирование партий запуска предметно-замкнутых участков.

При этом выходными технологическими документами служат: конструкторско-технологическая спецификация (КТС) — перечень деталей и узлов изделия с указанием для каждой детали межцехового маршрута, нормы материала, площади покрытия, размера партии запуска, длительности циклообработки или сборки в каждом цехе; табуляторы загрузки цехов; табуляторы расхода материала; карты группирования деталей.

На стадии укрупненного технологического проектирования осуществляется: проектирование укрупненных маршрутных технологий; проектирование заготовок; проектирование карт сборки; укрупненное нормирование обработки; уточненное группирование деталей; разработка типовых технологических документов; уточнение загрузки оборудования; уточнение расхода материала; проектирование конструкций и технологий изготовления оснастки.

Выходными технологическими документами на этом этапе являются: маршрутная технологическая карта; чертежи заготовок; карты (схемы) сборки изделий; ведомости расхода материалов, покупного инструмента, специального инструмента, оборудование и графики загрузки, нестандартного оборудования; расчет производственных площадей; чертежи оснащения и технические карты его изготовления; перечень необходимой специальной измерительной аппаратуры; ведомость необходимой рабочей силы и обслуживающего персонала.

Наконец, на стадии рабочего технологического проектирования выполняется: проектирование операционных технологий; расчет режимов обработки, нормирования, расценки; применение групповых методов обработки.

Основными выходными технологическими документами при этом служат: конструкторские операционные технические карты с эскизами; схема наладок, чертежи кулачков автоматов; технологические инструкции, карты контроля; ТУ на приемку операций и средств

контроля; карты раскроя листовых и полосовых заготовок; программа для станков с ЧПУ.

На рис. 64...66 приведены некоторые выходные технологические документы, формируемые подсистемой автоматизированного проектирования технологических процессов сборки узлов РЭА на печатных платах [70].

В целом техническая подготовка производства это: технологическая отработка конструкции изделия; проектирование и внедрение в производство технологических процессов изготовления, сборки и технического контроля качества деталей, узлов, агрегатов и изделия; проектирование, изготовление и отладка средств механизации и автоматизации производства, а также специальной оснастки режущего, вспомогательного и измерительного инструмента, приспособлений, штампов — необходимой для внедрения спроектированных технологических процессов;

разработка прогрессивных режимов обработки и норм времени на выполнение спроектированных технологических процессов, а также норм расхода материалов, инструментов и ресурсов для технологических целей;

проектирование и внедрение передовых форм организации производства — конвейерных и поточных линий, комплексно-механизированных и автоматизированных производственных участков, автоматизированных систем управления, научной организации труда.

Общий объем работ по ТПП, выполняемых на предприятии для обеспечения выпуска нового изделия, зависит от ряда факторов: конструктивно-технологических характеристик изделий; степени конструктивно-технологической преемственности нового изделия; степени конструктивно-технологической отработки изделия; серийности производства.

Доля машиностроительной продукции, выпускаемой в условиях мелкосерийного и серийного производства, во многих высокоразвитых странах достигает 80 % общего количества продукции машиностроения. Основными особенностями мелкосерийного и серийного типов производств являются: большая номенклатура одновременно изготавливаемых изделий; небольшие масштабы выпуска однотипных изделий; относительно частая смена объектов производства, связанная с изменением конструкции изделий и, как следствие, более сжатые сроки подготовки производства и освоения новых изделий. Эти особенности определяют характерные для мелкосерийного и серийного производств условия подготовки производства, главными из которых являются: большие затраты средств на ТПП в сравнении с затратами на специальную технологическую оснастку; применение недостаточно совершенных заготовок и, поэтому, большой объем последующей обработки; неустойчивость технологических маршрутов обработки деталей и узлов изделий, вызывающая частные изменения в производственной структуре и планировке цехов и участков предприятий.

Работы на ТПП, исходя из возможности их механизации и автоматизации, можно подразделить на следующие виды [40].

● *Информационные работы* — подбор сведений об имеющихся технологических решениях по изготовлению аналогичных изделий, новых технологических процессов, видах обработки, материалах, нестан-

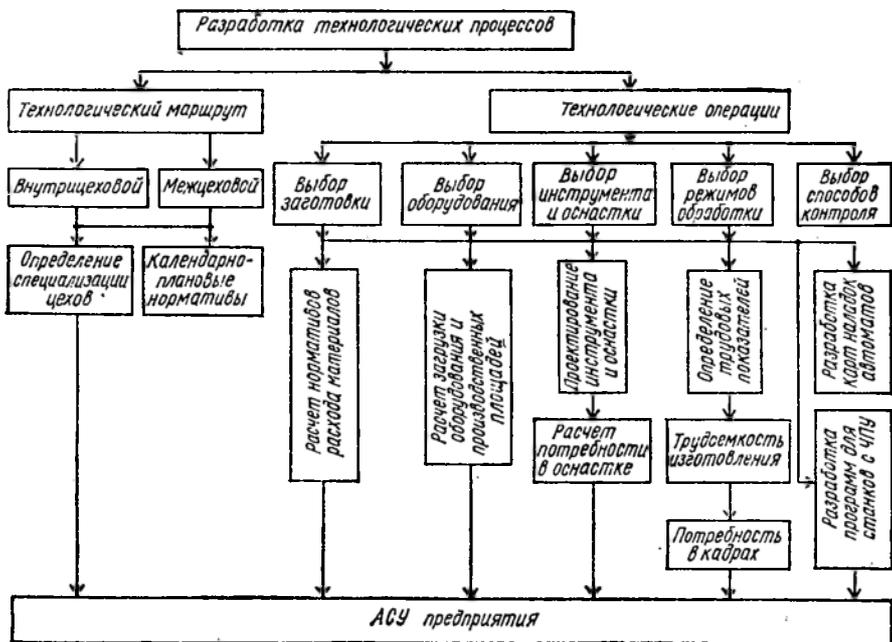


Рис. 67. Схема основных работ по проектированию технологических процессов.

видам обработки. Образуя последовательности, эти операции объединяются в технологические маршруты. Технологические операции имеют сложную структуру, элементами которой являются технологические переходы. Эти компоненты технологического процесса связаны между собой различными отношениями, основными среди которых являются временные, пространственные, логические и математические. Таким образом, технологический процесс как объект проектирования, обладая функциональной плотностью, может быть представлен иерархической структурой из четырех уровней: маршрута как последовательности видов обработки; операций как компонентов видов обработки; переходов внутри операций; рабочих и вспомогательных ходов.

Это обуславливает следующие особенности задачи автоматизации проектирования технологического процесса [15, 33]: большое число вариантов процесса; решения каждой проектной подзадачи во взаимосвязи с общей задачей проектирования процесса; последовательная детализация от уровня к уровню и определение количественных характеристик по всем компонентам процесса.

Возможность автоматического решения всей задачи зависит от сложности обрабатываемой детали, а глубина проектирования определяется тем, разрабатывается ли процесс для обычного станка, станка с числовым программным обеспечением или для робототехнологического комплекса. В последнем случае должны быть разработаны все четыре уровня технологического процесса.

Рассмотрим задачу проектирования с помощью ЭВМ технологических процессов для станков с ЧПУ [80]. Исходными данными является

Эта запись означает, что над заготовкой c_0 выполняется операция Φ_1 , переводящая ее в состояние c_1 . Далее выполняются операции Φ_2 и Φ_3 , порядок которых не определен. Проходя далее по графу, после операции Φ_8 , $\Phi_i \in \Phi$, получают готовую деталь C_8 .

Временная последовательность операций задается графом $S_B(\Phi, \Omega)$, где $\Phi = \{\phi\}$ — множество вершин — операций; $\Omega = \{\omega\}$ — множество ребер — временных отношений. Аналогично описывается пространственная структура системы станок — приспособление — инструмент — деталь.

Одним из наиболее разработанных методов автоматизированного проектирования технологических процессов является многоуровневый итерационный метод [80].

Основан он на том, что на каждом уровне генерируется множество вариантов. Из них по критерию эффективности выбирается один или несколько для детализации и оценки на следующем уровне, где создается свое множество вариантов и т. п. Так, для проектирования вариантов технологического маршрута исходной информацией помимо цифровой модели детали являются принципиальные схемы процесса, задаваемые технологом. В результате на этом этапе определяется последовательность операций, технологические базы и необходимое оборудование.

Сведения о маршруте являются исходными для проектирования операционной технологии, где определяются: форма заготовки, припуски на обработку, межоперационные размеры, тип станка, инструмента, приспособления, нормы времени и технологическая себестоимость. Рациональный вариант технологического процесса выбирается на графе процесса в виде пути с минимальной суммарной стоимостью обработки.

На заключительном этапе выбранный вариант технологического процесса превращается в совокупность команд системы числового программного управления станка. В основу синтеза траекторий инструмента положены технологические условия и математические методы аналитической геометрии.

На проектные решения в технологическом проектировании оказывают влияние ряд факторов. В зависимости от них для конкретной детали разрабатывается один из трех типов технологического процесса: индивидуальный, типовой или групповой. В мелкосерийном и серийном производстве, объем которого в общей продукции машиностроения составляет до 80 %, наиболее прогрессивным является метод групповых процессов механической обработки [60]. При этом методе проектируется один технологический процесс для группы деталей, объединенных по конструктивно-технологическим признакам и обрабатываемых на одном оборудовании с помощью общей оснастки и инструмента. Поэтому внедрению САПР-ТП должна предшествовать работа на предприятии по унификации технологических решений, классификации деталей, оборудования и оснастки. Эта работа проводится по результатам предпроектных обследований службы ТПП по уже описанной методике. Большое значение в системе имеет цифровая модель детали (D -модель), для которой разрабатывается технологический процесс. В состав этой модели наряду с геометрическими входят технологические данные,

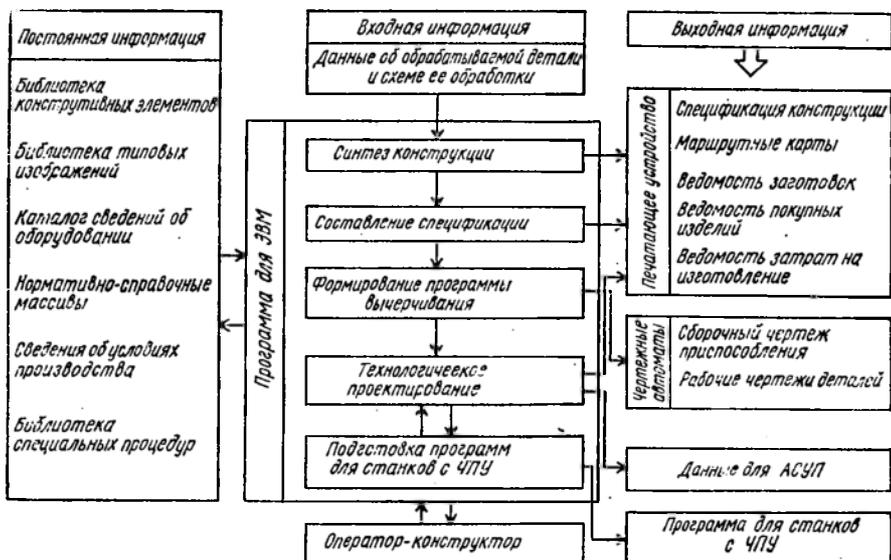


Рис. 70. Укрупненная функционально-информационная модель системы автоматизированного проектирования приспособлений.

талей и сборки приспособлений, нормирования операций, определения заготовок, покупных изделий, полуфабрикатов, оборудования и оснастки второго порядка, различные технико-экономические расчеты.

Разработка конструкции включает генерирование идеи, представление ее в виде эскиза, анализ идеи и ее графическую интерпретацию, выполнение минимально необходимых расчетов, компоновку конструкции и ее корректировку. Получение конструкторской документации — процесс графического воспроизведения конструкции в форме чертежей и составления спецификаций, выполненных в соответствии с требованиями ГОСТ.

Автоматизация проектирования технологического оснащения предполагает достижение следующих целей:

значительное снижение затрат материальных средств и времени на проектирование и изготовление оснастки; сокращение цикла подготовки производства оснащаемых изделий и снижение их себестоимости; повышение уровня нормализации конструкций технологического оснащения; улучшение качества проектируемых конструкций и получаемой технической документации; достижение алгоритмической стабилизации создаваемых конструкций и технологических решений; повышение качества управления технической подготовкой производства; расширение сферы применения станков с ЧПУ в производстве соответствующих деталей оснастки.

С учетом этих принципов в Институте технической кибернетики АН БССР разработана и внедрена в производство система автоматизации проектирования технологической оснастки (рис. 70). На основе цифровой модели обрабатываемой детали и схемы ее обработки на данной операции производится программный синтез конструкций, в результате чего генерируется информационное описание приспособ-

Программным обеспечением подсистемы решаются следующие задачи:

синтаксического контроля правильности подготовки исходных данных; расчета параметров элементов контура детали (дуг окружности, узловых точек) и приведения их к единой системе координат; вычисления основных геометрических характеристик наружных и внутренних контуров детали; вычисления центра штампа и усилия пресса; расчета размеров рабочих участков пуансонов и матриц; определения числа винтов и штифтов для крепления секционных матриц и координат места их установки; конструирования пуансонов (выбора варианта и определения размеров конструкции), прочностного расчета, проверки возможности взаимного столкновения деталей конструкций и др. компоновки узла выталкивания (выбора числа толкателей и координат места их установки, выбора типа и размеров траверсы); компоновки системы фиксации заготовки (выбора диаметра и координат места установки упора); формирования массивов с данными о варианте конструкции и размерах всех деталей пакета штампа; выбора пресса; формирования массива спецификации деталей штампа; печати спецификации штампа; печати табуляграмм с результатами конструирования штампов (в случае ручной доработки бланк-чертежей); подготовки данных для автоматического изготовления чертежей деталей штампа.

Последняя задача включает этапы: вычисления параметров, определяющих положение элементов размерной сетки чертежа штампуемой детали (размерных и выносных линий, полок, стрелок, изображений номинальных величин размеров и допускаемых отклонений); уточнения списка и габаритных размеров изображений, из которых будут компоноваться чертежи деталей штампа, рациональное размещение изображений на чертеже, выбор масштаба вычерчивания и формата чертежа; подготовки для каждой детали штампа на входном языке базового математического обеспечения чертежного автомата данных для вычерчивания изображений, включенных в список (основных проекций, видов, размеров, основной надписи); обработки описания чертежей деталей штампа и подготовки перфоленты для чертежно-графического автомата с помощью программ базового математического обеспечения.

Использование типовой автоматизированной подсистемы для проектирования штампов позволяет повысить производительность труда конструкторов в 1,5...2 раза и снизить себестоимость проекта на 30...40 %.

ческой структуры, включающей совокупность частных моделей, с выделением основных объектов, их параметров и свойств; в) диагностический анализ организационно-технической системы и ее подразделений для определения проблем, с которыми сталкивается организация на всех уровнях ее деятельности, и разработка мероприятий, направленных на повышение организационно-технологического уровня; г) разработку новой технологии рабочих процессов и процессов управления и реализацию этих процессов на базе систем автоматизации разработки изделий с помощью ЭВМ.

Для конкретизации изложения в качестве объекта автоматизации в дальнейшем будем рассматривать проектную организацию [68].

Современный подход к исследованию проектирования и проектной деятельности человека основан на понимании инвариантности этого процесса для любых областей проектной деятельности. В общем виде проектирование определяется как совокупность действий проектировщиков, создающих продукт этих действий — проект. Рассмотрение с этих позиций проектирования как системы обуславливает выделение в ней тех, кто проектирует, образующих проектирующую систему, и того, что проектируется, т. е. проектируемую систему. В свою очередь, процесс проектирования рассматривается как упорядоченное взаимодействие этих систем, приводящих к детальному описанию проектируемой системы, т. е. к достижению поставленной цели. Это упорядочение является следствием выполнения проектировщиком определенных действий в рамках одной методологии проектирования. Проектную организацию можно определить как совокупность пяти объектов: проектирующей системы; процесса проектирования; проектируемой системы (проекта); цели проектной организации; информационной базы.

Для удобства будем употреблять условные названия: ОРГАНИЗАЦИЯ, ПРОЦЕСС, ПРОЕКТ, ЦЕЛЬ, БАЗА. Объекты ОРГАНИЗАЦИЯ, ПРОЦЕСС, ПРОЕКТ в совокупности определяют понятие ПРОЕКТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ. Модель предметной области представляет собой множества объектов-понятий и отношений между ними и свойствами (атрибутами) объектов, конкретизирующих понятия и отношения.

Для описания проектной организации введем новые понятия: ПРОБЛЕМА, СИСТЕМА, СРЕДА и ЗАДАНИЕ. Семантика их определяется отношением к введенным выше базовым понятиям.

Объект-понятие ЗАДАНИЕ определяет директивное указание, сопровождаемое множеством сведений, с которых начинается процесс проектирования в организации. Объект-понятие СРЕДА определяет те внешние по отношению к рассматриваемой организации системы, процессы и организации, с которыми она взаимодействует или является их частью. Наконец, РЕСУРСЫ представляют собой знания, которые вводятся в СИСТЕМУ для компенсации отрицательного воздействия ПРОБЛЕМ на ПРОЕКТНУЮ ОРГАНИЗАЦИЮ.

В процессе достижения цели проектная организация имеет дело с двумя видами ПРОБЛЕМ. Во-первых, теми, которые возникают как результат воздействия внутренней и/или внешней сред и выражают действие мешающих, дестабилизирующих факторов. Примерами яв

информационные ресурсы, определяемые выявленными ПРОБЛЕМАМИ. Реализация ресурсов происходит в виде создания новой СИСТЕМЫ или развития существующей таким образом, чтобы обеспечить требуемые качественные показатели ПРОЦЕССА и ПРОЕКТА оказанием нейтрализующего воздействия на ПРОБЛЕМЫ.

Отметим ряд факторов, положенных в основу этой модели.

Во-первых, модель обладает иерархической структурой, отражающей возможность дальнейшей вертикальной декомпозиции проект-

Таблица 21. Матрица отношений в информационно-логической модели

Объекты x	Объекты y						СИСТЕМА	СРЕДА	ЗАДАНИЕ	РЕСУРСЫ
	ОРГАНИЗАЦИЯ	ПРОЦЕСС	ПРОЕКТ	ЦЕЛЬ	БАЗА	ПРОБЛЕМА				
ОРГАНИЗАЦИЯ	R_{11}	R_2	R_3	R_1	—	R_7	—	R_{12}	—	—
ПРОЦЕСС	—	R_{11}	—	R_4	—	—	—	R_{12}	—	—
ПРОЕКТ	—	R_6	R_{11}	—	R_{12}	—	—	—	R_{13}	—
ЦЕЛЬ	—	—	—	R_{11}	—	—	—	R_{12}	—	—
БАЗА	—	—	—	—	R_{11}	—	—	R_{12}	—	—
ПРОБЛЕМА	R_8	R_9	R_9	—	—	R_{11}	—	—	—	R_{10}
СИСТЕМА	—	R_4	—	—	—	R_9	R_{11}	R_{12}	—	—
СРЕДА	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЗАДАНИЕ	R_5	—	—	—	—	—	R_5	—	—	—
РЕСУРСЫ	—	—	—	—	—	R_{13}	R_4	—	—	—

ной организации по основным выделенным объектам — понятиям, раскрывающей их смысл через множество отношений.

Во-вторых, в модель включен контур, управляющий развитием ПРОЕКТНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ через РЕСУРСЫ и СИСТЕМУ, рассматриваемые в данном случае как средства создания новой технологии ПРОЦЕССА и ПРОЕКТА. Именно эту роль и призвана выполнять САПР в ПРОЕКТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ.

В-третьих, информационно-логическая модель, являясь формализованным описанием структуры и процессов в организационно-технических системах, можно представить в цифровой форме в памяти ЭВМ и подвергнуть анализу с помощью различных логико-вычислительных методов. Процесс создания такой модели, требующий получения и переработки экспертами большого объема исходной информации, также возможно автоматизировать с помощью ЭВМ. Будучи соз-

низованы, чтобы повысить организационно-технологический уровень проектной организации (рис. 72). Анализ проектной организации проводится сверху вниз до тех пор, пока не будут выделены компоненты, дальнейшее деление которых не приводит к повышению знания об этой организации. Созданная на основе такого анализа детальная информационно-логическая модель проектной организации является не только средством выявления проблем в этой организации, но и упорядоченной совокупностью исчерпывающих сведений, необходимых для проектирования САПР. Информационно-логическая модель является основой для создания автоматизированной базы данных о самой проектной организации, содержащей описания объектов-понятий, их устойчивых свойств, информационных процессов и отношений между ними, что позволяет решить другую важную задачу — автоматизировать управление проектной организацией на всех ее уровнях [33].

При построении модели проектной организации уже выделяли три главные системообразующие компоненты: проектирующую систему, проектируемую систему и процесс проектирования. Проведем их последующую декомпозицию в форме указаний на то, какие данные и по каким классам должны быть собраны при обследовании организации.

1. Определить проектирующую систему: структуру организации (структуру управления, типы отношений в структуре управления, ответственность персонала в процессе управления, процедуру управления, показатели качества управления); функции подразделений в процессе проектирования (входные воздействия, результаты деятельности, процесс преобразования входных воздействий в результат деятельности, показатели качества деятельности подразделений); организационную структуру процесса проектирования (ответственность подразделений при проектировании, отношения между подразделениями, состав управленческих документов, обеспечивающих проектирование, процедуры управления, показатели качества процесса проектирования).

2. Определить проектируемую систему: объекты (типы проектируемых объектов, компоненты проектируемых объектов, отношения между ними, функции проектируемых объектов и показатели их качества),

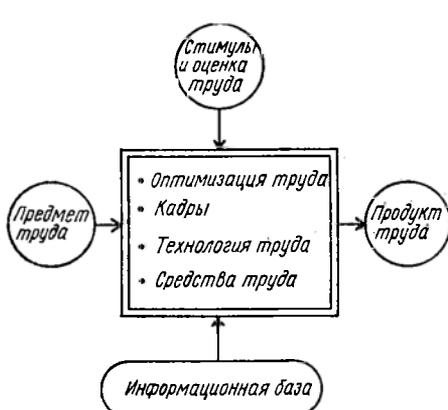


Рис. 72. К описанию и оценке составляющих трудового процесса в проектной организации.

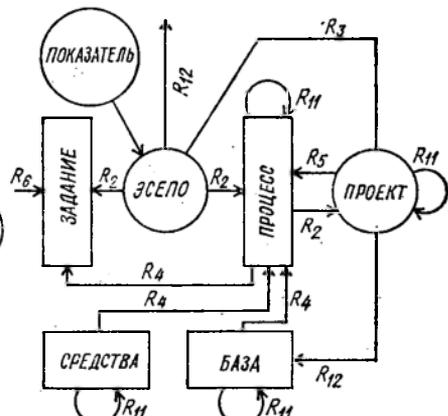


Рис. 73. Информационно-логическая модель элементарной структурной единицы проектной организации.

- *Информационная база ЭСЕПО*, включающая следующие основные разделы информационного обеспечения: библиотеку стандартных и нормативных данных, эталоны структур и элементов проектируемых объектов, эталоны проектных документов, нормативы выполнения проектных работ и их оценки; источники научно-технической информации; библиотеку типовых проектных решений; библиотеку проекта.

- *Исходные данные* для процесса проектирования, содержащие описания поступающих извне документов с проектными заданиями, а также состав и структуру исходных данных, имеющихся в созданных проектных документах.

- *Результат деятельности (ЭСЕПО)*. В этом документе содержатся сведения о результате проектирования и нормативных формах его представления, а также критерии, по которым производится его оценка.

- *Кадры*. Данный раздел документа описывает должностной состав ЭСЕПО и распределение функциональных обязанностей проектировщиков в выполняемых проектных работах.

- *Стимулирование труда и оценка деятельности проектировщиков*. Описываются критерии и методы оценки, морального и материального стимулирования сотрудников.

При описании ЭСЕПО используется терминология и понятия, регламентированные ГОСТ 22487—77.

Выделение и описание всех ЭСЕПО является завершением построения иерархической структуры проектной организации в форме информационно-логической модели, где в роли частных моделей выступают подразделения проектной организации всех уровней иерархии. Как исходные данные, так и результат проектирования в ЭСЕПО должны быть представлены в нормативных формах, характерных для данного этапа процесса проектирования. Этим обеспечивается унификация информационных связей между ЭСЕПО, что важно для обеспечения коллективной работы проектировщиков над общим проектом. При этом выделение проектных процедур как элементов процесса проектирования получает логическое обоснование: проектная процедура есть та часть процесса проектирования, которая переводит проектируемый объект из одной нормативной формы в другую. Последовательность проектных работ и актов принятия проектных решений, присущих данной организации, отображается в форме документа «Логическая схема построения проекта» (ЛСПП).

Собранные сведения о каждой структурной единице представляются в форме унифицированного документа «Описание ЭСЕПО»:

Рубрика документа	Содержание
ИМЯ	Название ЭСЕПО
ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	Перечень частей проекта, за которые отвечает ЭСЕПО
ЯВЛЯЕТСЯ ЧАСТЬЮ	Указывается подчиненность другим подразделениям
ВЫПОЛНЯЕТ	Описание содержания типовых заданий на проектные работы
СРЕДСТВА	Перечень и характеристика инструментальных средств для выполнения проектных процедур
БАЗА	Спецификация информационных фондов по проектным процедурам

ВКЛЮЧЕНИЕ агрегируют две или более частных моделей в общую модель. При этом происходит не просто слияние массивов данных, а такое их структурное преобразование, что агрегированная модель приобретает новые свойства. Операции этой группы позволяют также установить новые связи между уже имеющимися в модели компонентами. Эти операции используются при поэтапном развитии и детализации информационно-логической модели по мере сбора, первичной обработки и ввода в ЭВМ собираемых в ходе обследования данных, описывающих структуру и свойства компонентов и связей модели.

Группа операций **ВЫДЕЛЕНИЕ** позволяет выделить из общей модели отдельные частные подмодели по структурному или функциональному признаку. Это дает возможность проводить анализ структурных единиц проектной организации на любом уровне, работая только с необходимыми данными и не затрагивая остальную часть модели. С другой стороны, обращаясь к общей модели с запросами по тому или иному типу отношений, представленных в ней, возможно получить данные, характеризующие различные структурные и функциональные аспекты проектной организации. Так, ввод в модель запроса по отношению **СОСТОИТ ИЗ** (R_{11}) с указанием на проект раскрывает структуру проекта.

Использование гибких механизмов современных систем управления базами данных (СУБД) для отображения в памяти ЭВМ информационно-логической модели проектной организации при ее создании и анализе позволяет существенно повысить качество и достоверность информации, получаемой на этапе предпроектного обследования.

Целью диагностического анализа является выявление проблем, с которыми сталкивается проектная организация, а также проблем других организаций, на решение которых она оказывает влияние. Завершается анализ разработкой плана мероприятий, направленных на повышение организационно-технологического уровня проектной организации с целью подготовки ее для создания системы автоматизированного проектирования.

Диагностический анализ проводится в два этапа. На первом данные, собранные и агрегированные в информационно-логической модели, используются для получения дифференцированных оценок по следующим основным аспектам деятельности проектной организации [30]: уровню управления; уровню научно-технического потенциала; выполнению тематического плана; научно-техническому уровню разработок; экономическим результатам; социальному развитию коллектива.

Полученные дифференциальные оценки агрегируются в обобщенный показатель, на основании которого дается оценка деятельности в проектной организации за оцениваемый период. Дифференциальные и агрегированные оценки являются лишь индикатором степени воздействия проблем на показатели деятельности. Для решения этих проблем проводится второй этап анализа, на котором эксперты выявляют и идентифицируют проблемы, относящиеся к трем базовым компонентам системы проектирования — организации, процесс и проект (рис. 74). Каждая проблема оказывает влияние на качество, стоимость и сроки разработки проектов, которые в совокупности и определяют эффективность работы проектной организации. Поэтому разработка плана ме-

вания, а также выполнение плана мероприятий по созданию организационно-технологических предпосылок для разработки системы, включая финансовое, техническое и организационное обеспечение работ. Помимо собственных подразделений проектная организация привлекает к работам головные отраслевые НИИ, организации Академии наук и Минвуза. Основное внимание уделяется заимствованию и адаптации к условиям применения максимального количества готовых программных, информационных и технических компонентов.

Координацию работ, проведение единой технической политики, формирование фонда компонентов САПР проводит головная организация отрасли.

Для проведения работ в самой проектной организации создается специальное подразделение, ответственное за поэтапное внедрение САПР. Возглавляет работу по созданию САПР первый руководитель организации или его заместитель. Руководство же работами поручается Главному конструктору САПР, назначаемому из числа наиболее квалифицированных специалистов. В зависимости от объема и сложности создаваемой САПР могут назначаться главные специалисты, несущие ответственность за отдельные виды обеспечения: техническое, информационное, организационное и др. В целом порядок разработки и внедрения САПР в проектных организациях определяется общеотраслевыми руководящими методическими материалами (ОРММ).

Функции подразделения предприятия, ответственного за САПР, включают [23]: анализ последовательности и особенностей обработки информации при проектировании для определения возможности, целесообразности и очередности автоматизации отдельных проектных работ; подготовку технического задания на систему; согласование технического задания на проектируемую специализированную САПР с будущими пользователями системы (например, КБ) и с головной организацией отрасли по САПР; разработку проекта специализированной САПР; получение в головной организации по САПР специализированных общесистемных программных средств (в том числе входного языка) системы, подходящих прикладных программных модулей из числа ранее разработанных и инструкций, которые должны соблюдаться при разработке дополнительных модулей для САПР; подготовку предложений по составу технических средств, необходимых для внедрения САПР; подготовку с привлечением специализированных подразделений технических заданий на подлежащие разработке прикладные программные модули, а также на массивы информации, которые должны быть подготовлены для системы, согласование этих заданий с головной организацией отрасли по САПР; согласование разработанных специализированными подразделениями (или сторонними организациями по их заказу) алгоритмов с соответствующими базовыми организациями; координацию работ специализированных подразделений по подготовке массивов информации, подлежащих вводу в банк данных системы, и их согласование с соответствующими базовыми организациями; разработку программных модулей по согласованным алгоритмам и контроль за программированием, осуществляемым в других организациях по заказам; ввод разработанных программных модулей и подготовленных массивов информации соответственно в библиотеку программ и

- ГОСТ 23501.13—81 «Системы автоматизированного проектирования. Мониторная система. Общие требования»;
- ГОСТ 23501.14—81 «Системы автоматизированного проектирования. Изготовление, отладка и испытания»;
- ГОСТ 23501.15—81 «Системы автоматизированного проектирования. Ввод в действие»;
- ГОСТ 23501.16—81 «Системы автоматизированного проектирования. Диалоговые средства»;
- ГОСТ 23501.17—82 «Системы автоматизированного проектирования. Общие требования к техническому обеспечению».

Пример предпроектных исследований при создании САПР. В качестве объекта предпроектных исследований выбрано конструкторское бюро технологической оснастки (КБТО), являющееся одним из подразделений отдела главного технолога предприятия (ОГТ). Предпроектные исследования выполняются в соответствии с ГОСТ 23501.7—80 «Системы автоматизированного проектирования. Предпроектные исследования».

Целью проведения работ на стадии предпроектных исследований является определение необходимости автоматизации проектирования и оценка возможности создания САПР в организации. В случае положительной оценки формируются исходные данные для разработки технического задания на создание САПР.

Предпроектные исследования включают: сбор данных о КБТО и его внешних связях; оценку качества функционирования КБТО; выявление системы внешних связей КБТО; диагностику системы внешних связей КБТО и определение внешних факторов, влияющих на качество функционирования КБТО; уточнение системы проектирования (СП), сложившейся в КБТО; диагностику СП КБТО и определение внутренних факторов, влияющих на качество функционирования КБТО; определение перечня процессов проектирования и проектных процедур, подлежащих автоматизации; оценку возможности создания САПР в КБТО; формирование исходных данных для разработки технического задания на создание САПР.

Результатами функционирования КБТО являются проекты комплексов оснастки, качество которых определяется степенью соответствия предъявляемым к ним требованиям, среди которых основными являются своевременность получения результата проектирования и его качество.

Своевременность получения результата проектирования означает, что проекты комплексов оснастки были выполнены в установленные планом сроки. Отклонение фактических сроков от плановых свидетельствует об ухудшении качества функционирования КБТО, если отклонение положительное. Чем больше положительное отклонение, тем ниже качество функционирования.

В КБТО осуществляется ежемесячное планирование и отчетность. В течение месяца в КБТО проектируется не один, а несколько комплексов оснастки. Поэтому в плановом периоде может наблюдаться несколько отклонений, имеющих различную длительность. Таким образом, своевременность получения результата проектирования характе-

i -й месяц периода обследования составляет

$$Q_i = \sum_{j=1}^{m_i} q_{ij}, \quad (11.1)$$

где q_{ij} — количество отклонений длительностью d_{ij} в i -м месяце периода обследования; m_i — количество групп отклонений различной длительности в i -м месяце периода обследования.

Таблица 23. Показатели, характеризующие уровень функционирования КБТО в периоде обследования

Месяц	Количество отклонений, Q_i	Средняя длительность отклонений, D_i	Объем отклонений, V_i
Январь	33	14,12	465,96
Февраль	30	18,4	582
Март	34	12,68	431,12
Апрель	19	11,63	220,97
Май	44	17,32	762,08
Июнь	15	23,6	354,0
Июль	10	5,9	59
Август	14	9	126
Сентябрь	25	9,70	242,50
Октябрь	33	9,10	300,3
Ноябрь	27	9,15	247,05
Декабрь	19	7,63	145
Январь	20	3,8	76
Февраль	28	4,26	119,3
Март	51	6,98	357,0
Апрель	22	5,36	117,92
Май	27	5,37	145
Июнь	30	6,23	186,90
Июль	19	4,42	83,98
Август	24	4,79	114,96

Средняя длительность отклонений D_i и объем отклонений V_i в i -м месяце соответственно будут

$$D_i = \left(\sum_{j=1}^{m_i} d_{ij} q_{ij} \right) / \sum_{j=1}^{m_i} q_{ij}; \quad (11.2)$$

$$V_i = Q_i D_i, \quad (11.3)$$

где d_{ij} — длительность отклонения j -й группы в i -м месяце периода обследования.

Объем отклонений измеряется в человеко-днях. Этот показатель характеризует дополнительные трудовозатраты, которые потребовались в связи с несвоевременностью получения результатов проектирования. Значения показателей Q_i , D_i , V_i для каждого месяца периода обследования приведены в табл. 23, по данным которой с помощью метода наименьших квадратов

определены уравнения линий трендов:

$$\hat{Q}_t = 29,61 - 1,61 \ln t; \quad (11.4)$$

$$\hat{D}_t = 17,89 \cdot (0,929)^t; \quad (11.5)$$

$$\hat{V}_t = 582,36 - 153,78 \ln t, \quad (11.6)$$

где \hat{Q}_t , \hat{D}_t , \hat{V}_t — тенденции (тренды) изменения показателей Q_i , D_i , V_i во времени t .

Графики изменения показателей Q_i , D_i , V_i в течение периода обследования и графики трендов показаны на рис. 75.

Количество отклонений остается на одном уровне — около тридцати отклонений в месяц (рис. 75, а). Средняя длительность отклонений имеет тенденцию к уменьшению. Об этом свидетельствует график линии

качества существующих связей от требуемых и определения степени влияния этих отклонений на качество функционирования КБТО.

Анализ данных о системе внешних КБТО позволяет выявить следующие факторы, оказывающие отрицательное влияние на качество функционирования КБТО: нарушения синхронного поступления в КБТО чертежей оснастки и ведомостей оснащения, приводящие

Таблица 24. Данные о технологической оснастке, проектирование которой необходимо автоматизировать

Наименование оснастки	Количество единиц оснастки, проектируемых за год	Наличие ППП-аналогов	Ожидаемый коэффициент ускорения процессов проектирования
Кондукторы к сверлильным станкам	167	Есть	5
Кондукторы к расточным станкам	167	Есть	5
Приспособления к токарным станкам	156	Есть	5
Фрезерный инструмент	22	Есть	50
Резцы	79	Есть	10
Зуборезный и протяжной инструмент	9	Есть	20
Калибры гладкие и круглые	31	Есть	3,5
Калибры конусные	42	Есть	3,5
Штампы разделительные	6	Есть	2,2

к большим потерям времени конструкторов КБТО; количество заданий на проектирование комплексов оснастки значительно превышает возможности КБТО (плановая трудоемкость заданий выше максимально возможных трудозатрат КБТО); сведения о материально-технической базе инструментального производства систематически не актуализируются; внеочередное проектирование оснастки, в связи с изменением технологических конструкций изделий, приводящее к значительным дополнительным трудозатратам и нарушению ритмичности работы КБТО.

Подобные внешние факторы могут быть устранены при улучшении организации функционирования технологических служб ОГТ и системы планирования в масштабе ОГТ и предприятия, повышении производительности труда КБТО и повышении оперативности работы служб стандартизации и информации ОГТ. Из числа возможных мероприятий

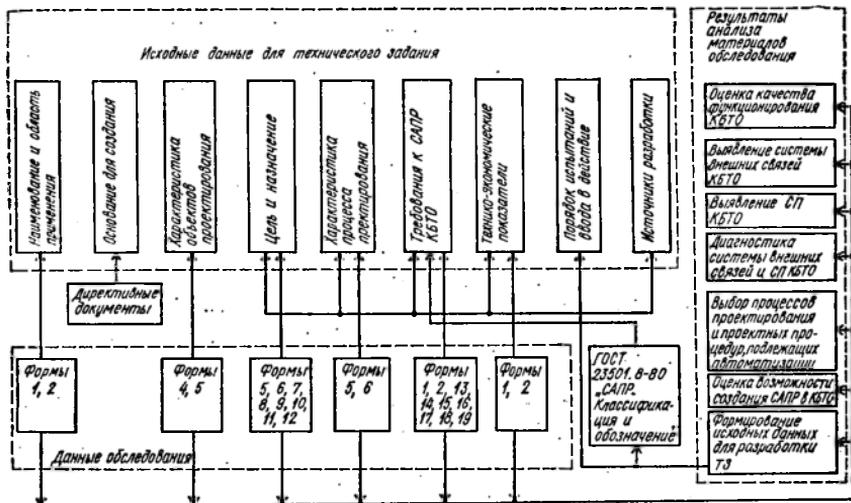


Рис. 76. Схема формирования исходных данных для ТЗ на создание САПР в КБТО.

данные для разработки технического задания на создание САПР КБТО формируются в соответствии со схемой, приведенной на рис. 76. Исходные данные группируются в соответствии с разделами технического задания, установленными ГОСТ 23501.2—79 и заносятся в табл. 25. При формировании исходных данных в основном использованы готовые данные, содержащиеся в материалах обследования, таблицах, полученных в результате анализа материалов обследования, директивных документах. Для получения исходных данных к разделу «Технико-экономические показатели» выполнены несложные расчеты:

1. Определено значение средневзвешенного коэффициента ускорения проектирования в результате автоматизации

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^{i=9} O_i K_i}{\sum_{i=1}^{i=9} O_i},$$

где K_y — средневзвешенный коэффициент ускорения проектирования; O_i — количество оснастки по подлежащим автоматизации процессам i -го вида; K_i — коэффициент ускорения проектирования в результате автоматизации процессов i -го вида.

С учетом имеющихся данных получаем

$$K_y = \frac{167 \cdot 5 + 167 \cdot 5 + 156 \cdot 5 + 22 \cdot 50 + 79 \cdot 10 + 9 \cdot 20 + 31 \cdot 3,5 + 6 \cdot 2,2}{679} = 6,83 \approx 7.$$

Стоимость всех работ, выполняемых проектировщиками КБТО, оценивается суммой в 90 тыс. руб. Годовая трудоемкость работ, выполняемых проектировщиками КБТО, составляет примерно 45000 нормо-ч, при этом стоимость 1 нормо-ч равна 2 руб. Данные обследования пока-

Наименование раздела ТЗ в соответствии с ГОСТ 23501.2—79	Сформированные данные	Характер использования данных при разработке ТЗ	
		непосредственно	в качестве основы для формирования требований
	<p>группа пресс-форм — один класс оснастки для обработки давлением;</p> <p>группа приспособлений проектирует все приспособления класса приспособлений, кроме сборочных;</p> <p>группа сборки и испытаний проектирует сборочные приспособления класса приспособлений</p>		
Цель и назначение	<p>4.1. Обеспечить устойчивое выполнение плановых заданий КБТО за счет повышения производительности труда проектировщиков на основе создания САПР в КБТО.</p> <p>4.2. В качестве критерия эффективности функционирования САПР КБТО выбирается отклонение:</p> $\Phi_c = \frac{\Phi(C)}{C},$ <p>где Φ_c — общий критерий эффективности функционирования САПР КБТО; $\Phi(C)$ — экономический эффект от создания САПР, получаемый за счет достижения такой производительности труда, которая обеспечивает устойчивое выполнение планов КБТО; C — стоимость создания САПР КБТО.</p> <p>4.3. Создаваемая САПР КБТО предназначена для автоматизированного проектирования около 40 типов оснастки различных классов из 367 устанавливаемых классификатором КБТО, относящихся к простым объектам</p>	+	+
Характеристика процесса проектирования	<p>5.1. Процессы проектирования технической оснастки в КБТО выполняются в одну стадию с получением рабочей документации.</p> <p>5.2. Проектирование каждой единицы оснастки выполняется одним конструктором.</p> <p>5.3. Формирование подкомплексов оснастки осуществляется на уровне групп, а комплексов — на уровне КБ.</p> <p>5.4. За год КБТО выпускает около 40 тысяч проектных документов в пересчете на формат И1.</p>	+	+

Наименование раздела ТЗ в соответствии с ГОСТ 23501.2—79	Сформированные данные	Характер использования данных при разработке ТЗ	
		непосредственно	в качестве основы для формирования требований
Требования к САПР КБТО	6.2. САПР КБТО является комплексной, так как предназначена для выполнения всех этапов процессов проектирования, подлежащих автоматизации.	+	+
	6.3. САПР КБТО обеспечивает выпуск конструкторской документации всех установленных видов.	+	+
	6.4. САПР КБТО относится к системам малой производительности, выпускающей до 10^5 проектных документов в год в пересчете на формат 11.	+	+
	6.5. САПР КБТО должна разрабатываться как двухуровневая система, построенная на основе ЭВМ ЕС-1035 и нескольких терминалов.	+	+
	6.6. Для создаваемой САПР в соответствии с ГОСТ 23501.8—80 устанавливается следующее кодовое обозначение: САПР — 1.1.1.3.2.1.2	+	+
Технико-экономические показатели	7.1. Источниками экономической эффективности от создания САПР КБТО являются: экономия от сокращения трудоемкости поиска проектов-аналогов в размере 15,6 тыс. руб; экономия от повышения производительности труда при проектировании оснастки в размере 66,1 тыс. руб; экономия от повышения качества проектной документации в размере 10,4 тыс. руб.	+	+
	7.2. Средняя зарплата конструктора — 150 руб. в месяц.	+	+
	7.3. Накладные расходы — 100 %.	+	+
	7.4. Нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений $E_n = 0,15$.	+	+
	7.5. Стоимость доработки и привязки к условиям КБТО программ-аналогов составляет около 90 тыс. руб.	+	+
Стадии и этапы	8.1. Стадии и этапы работ по стадиям распределяются в соответствии с ГОСТ 23501.1—79.	+	
	8.2. Перечень документации, предъявляемой после окончания каждой стадии создания САПР КБТО в соответствии с ГОСТ 23501.10—81.	+	

зывают, что до 10 % времени тратится на поиск информации и работу с извещениями, что соответствует 4500 нормо-ч и 9000 руб. Остальное время тратится на проектирование оснастки. Трудоемкость ее проектирования — 37 000 нормо-ч, стоимость — 74 000 руб. Трудоемкость единицы оснастки в среднем оценивается 18,5 нормо-ч, а стоимость ее 37 руб.

По материалам обследования известно, что КБТО не успевает спроектировать оснащение примерно для 150 изделий, т. е. €000 единиц оснастки. Таким образом, необходимое количество оснастки в год — около 8000 единиц. Для оснастки, процессы проектирования которой подлежат автоматизации:

$$\frac{679}{2000} \cdot 8000 = 2716 \text{ ед.}$$

Трудоемкость проектирования этой оснастки оценивается

$$\frac{18,5}{7} \cdot 2716 = 7178 \text{ нормо-ч.}$$

Трудоемкость поиска единицы оснастки в среднем до автоматизации составляет

$$\frac{4500}{2000} = 2,25 \text{ нормо-ч.}$$

Такова же трудоемкость работ, выполняемых по извещениям до автоматизации в расчете на одну единицу оснастки.

После автоматизации поиска проектов-аналогов трудоемкость поиска сократится в 9...10 раз и в расчете на одну единицу оснастки становится равной:

$$\frac{2,25}{9} = 0,25 \text{ нормо-ч.}$$

Трудоемкость поиска при проектировании 2716 единиц оснастки с помощью ЭВМ

$$2716 \cdot 0,25 = 679 \text{ нормо-ч.}$$

Учитывая, что при автоматизации проектирования значительно повышается качество проектной документации, принимаем, что работ по извещениям на 2716 единиц оснастки не будет. Общая трудоемкость работ при проектировании 2716 единиц оснастки

$$7178 + 679 = 7857 \text{ нормо-ч.}$$

Оставшаяся годовая трудоемкость работ КБТО

$$45\,000 - 7857 = 37\,143 \text{ нормо-ч.}$$

Считая, что работы по поиску после автоматизации составляют $\frac{10\%}{9} = 1,1\%$, а по извещениям в неавтоматизированной части проектирования — 10 %, определим количество оснастки, которое будет спроектировано неавтоматизированным способом:

$$\frac{37\,143 - 37\,143 \cdot 0,1 - 37\,143 \cdot 0,011}{18,5} = 1244 \text{ ед. осн.}$$

вложений в отрасли, определяются следующим образом:

$$\frac{K}{\mathcal{E} - E_n K} = \frac{1}{E_n};$$
$$K = \frac{\mathcal{E}}{2E_n} = \frac{92160,2}{2 \cdot 0,15} = 307720,6 \text{ руб.}$$

12 ПРИМЕРЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ САПР В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

12.1. САПР В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Типовая САПР РЭА. Автоматизированным проектированием в области радиоэлектроники занимаются около 15 лет. В процессе разработки отдельных систем, таких как АВТОГРАФ, АВТОМАТ, САПФИД, ЕСАП и другие, накапливался опыт создания больших комплексов программ, создавались коллективы специалистов по автоматизированному проектированию, вырабатывались требования к вычислительным средствам, исследовались и внедрялись новые технологические методы изготовления электронной аппаратуры, ориентированные на автоматизированное проектирование и производство, разрабатывались ОСТы и ГОСТы на техническую и эксплуатационную документацию.

Все это позволило начать и осуществить разработку типовой САПР, ориентированной на использование широко распространенных ЭВМ типа ЕС и автоматизированных рабочих мест проектировщиков (АРМ).

Типовая САПР РАПИРА предназначена для автоматического и автоматизированного проектирования РЭА широкого назначения: функционального и технического проектирования аналоговой и цифровой аппаратуры, СВЧ-устройств, микросборок, плоских конструктивов, управляющих перфолент для станков с ЧПУ.

В ее состав включены следующие пакеты прикладных программ (ППП): анализа электронных схем; функционального и технического проектирования в сквозном цикле полосковых схем СВЧ; выпуска технической документации; банка данных; ГРИФ для ввода и преобразования графической информации; связи АРМ-ЕС; моделирования алгоритмов и структур цифровых систем; схемного проектирования цифровых устройств; конструкторского проектирования цифровых, цифро-аналоговых и аналоговых ячеек на двухслойных печатных платах (ДПП); технологического проектирования цифро-аналоговых и аналоговых ячеек на ДПП; конструкторского проектирования микросборок; конструкторского проектирования цифровых ячеек на многослойных печатных платах (МПП); проектирования плоских конструктивов; проектирования управляющих перфолент для станков с ЧПУ.

Для обеспечения внедрения ППП разработаны системные документы: типовой состав технических средств; состав документации на

• внедрение и расширение возможностей программных комплексов автоматизированного проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ на базе использования АРМ 2.

Программа ПРАМ предусматривает создание следующих подсистем:

Шифр проблемно-ориентированной системы	Наименование системы
П0	Функционально-техническое проектирование радиоэлектронной аппаратуры
П1	Проектирование и изготовление механических конструкций РЭА и двусторонних печатных плат широкого назначения
П2	Моделирование многоуровневых цифровых систем в диалоговом режиме
П3	Конструкторско-технологическое проектирование узлов с двусторонними печатными платами и использованием диалоговых методов
П4	Моделирование диалоговых устройств на уровне функциональных узлов, проектирование нелинейных аналоговых схем, разработка настраиваемых систем для автоматизированного проектирования программ микропроцессоров на базе АРМ
П5	Разработка принципов проектирования тестов, тестового контроля и диагностики цифровых микропроцессорных устройств, система проектирования и технологической подготовки производства микросборок
П6	Проектирование коммутационных элементов монтажа быстроредействующей аппаратуры
П7	Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры с обеспечением выпуска конструкторской документации
П8	Проектирование печатно-проводных плат по типу «Мультивай» без адгезивного слоя
П9	Моделирование тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры
П10	Развитие языков высокого уровня (Алгол, Фортран, ПЛ-1, Альфа) для решения задач машинной графики в обеспечении режима диалога АРМ с центральным процессором.

Таким образом, в результате дальнейшего развития системы РАПИРА и завершения ПРАМ будет создана САПР для широкого использования на промышленных предприятиях, разработаны и внедрены новые эффективные средства для организации удобного доступа пользователя к САПР, расширены области использования методов автоматизированного проектирования, обеспечены условия для использования в разработках новой элементной базы, ориентированной на снижение габаритов и массы аппаратуры, стоимости и повышение ее надежности и качества.

САПР СБИС. В настоящее время наблюдается процесс перехода электронной аппаратуры на применение больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС), что связано с улучшением основных технико-экономических характеристик аппаратуры. При этом необходимы заказные БИС и СБИС, объем производства которых не превышает нескольких тысяч в год в отличие от стандартных (коммерческих) БИС, выпускаемых миллионами штук в год.

Если предшествующие поколения интегральных схем (малой, средней и частично большой степени интеграции) на приборном уровне еще могли проектироваться на АРМ, то для СБИС такой подход неосостоятелен. Действительно, если исходить из достигнутой производительности процесса автоматизированного проектирования (в сред-

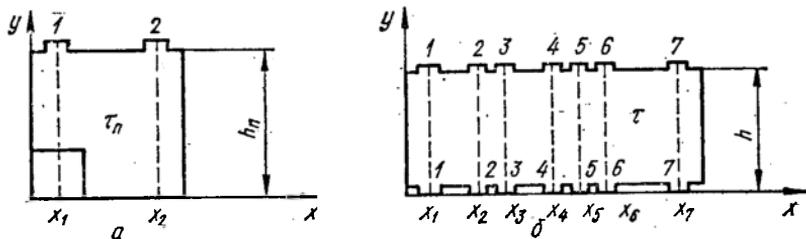


Рис. 78. Типовые элементы СБИС:
а — периферийный; б — логический.

в горизонтальных рядах (линейках). Позиции для размещения элементов в матричных СБИС соответствуют узлам прямоугольной сетки. Причем в каждой позиции располагаются от одного до четырех элементов, площадь элемента может иметь одно из четырех значений: 1 , $3/4$, $1/2$ и $1/4$ общей площади позиции.

Для реализаций связей 3 между элементами используется свободная область кристалла, которая в линейчатой конструкции состоит из горизонтальных каналов 4 , а в матричной — из горизонтальных 4 и вертикальных 5 . Кроме того, на линейчатом кристалле допускается проведение трасс 6 между соседними элементами одной и той же линейки, удаленными друг от друга на достаточное расстояние. Такие трассы называются транзитными (они переходят из одного канала в другой).

Графические изображения периферийного и логического элементов для линейчатого кристалла приведены соответственно на рис. 78, а и 78, б. У периферийного элемента имеются два контакта (1 и 2) для подключения внутренних межсоединений и внешняя контактная площадка, расположенная в левом нижнем углу. Приведенный логический элемент содержит семь контактов (1, 2, ..., 7), продублированных на верхней и нижней сторонах. Логические элементы реализуют функции НЕ, И-ИЛИ-НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ на несколько входов, соответствуют триггерам, схемам сравнения, регистрам на 4...8 и более разрядов, счетчикам и т. д.

Фрагмент совмещенной топологии стандартной части базового кристалла приведен на рис. 79, где 1 — транзисторы для реализации логических элементов в линейках 5; 2 — транзисторно-диодные структуры для реализации периферийных элементов; 3 — внешние контактные площадки; 4 — горизонтальные каналы; 6 — шины питания; 7 — угловые контакты для подачи питающих напряжений.

Рассмотрим процедуру проектирования СБИС на базовом кристалле с помощью системы АРТИС, разработанной в Киевском политехническом институте и предназначенной для автоматического проектирования топологии СБИС. В систему АРТИС входят программы, осуществляющие решение следующих задач: ввода и контроля исходной информации; выбора базового кристалла для реализации проектируемой схемы; формирования конструкторско-иерархического описания СБИС; размещения логических и периферийных элементов СБИС; трассировки соединений; построения эскиза топологии.

Входная информация системы АРТИС включает: описание логи-

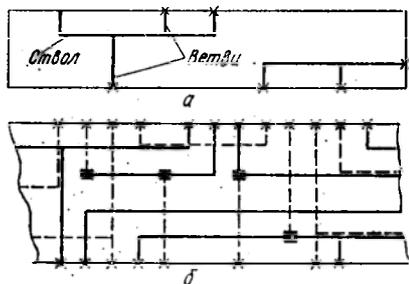


Рис. 80. Трассировка соединений в канале:
 а — конфигурация трассы; б — совмещенные участки трасс на различных слоях САПР ЭВМ.

параметр эффективности размещения, как заполнение линеек элементами. Ее значение, установленное на основании опыта эксплуатации системы, содержится в исходных данных.

Далее из системной библиотеки последовательно читается описание каждой подсхемы и проводится формирование блоксв. Блок может быть одного из двух типов: внутренний, состоящий только из логических элементов подсхемы, и внешний, содержащий периферийный элемент. В блок включаются элементы, связанные между собой электрическими цепями, причем их суммарная длина не превосходит значения, определенного из предыдущего этапа. Фактически осуществляется компоновка (разбиение) подсхемы, состоящей из логических и периферийных элементов, по блокам. Полученные описания блоков заносятся в системную библиотеку.

Затем производится преобразование входного иерархического описания в конструктивное. В результате строится описание всей СБИС относительно блоков. Критерием оптимальности на этом этапе является минимум числа связей между элементами каждого уровня иерархии. Выполняется перенумерация блоков для того, чтобы номер любого внешнего блока превышал номер каждого внутреннего, причем формируется двухуровневое описание СБИС, заносимое в системную библиотеку.

Процесс размещения состоит в распределении внутренних блоков по линейкам и внешних — по сторонам кристалла, при этом учитывается требование расположения периферийных элементов в указанных позициях. При размещении минимизируется число транзитных трасс (соединяющих блоки, которые расположены выше и ниже некоторой линейки, и не подключенных к элементам этой линейки); линейки равномерно заполняются блоками и в каждой линейке сохраняется возможность размещения распределенных блоков и реализации образовавшихся транзитных цепей. Далее размещаются элементы внутри каждого блока. После окончания этого этапа проектируемая схема получает трехуровневое иерархическое представление: линейка — блок — элемент.

Трассировка соединений осуществляется в двух слоях с использованием межслойных переходов. При этом оптимизируются следующие показатели: число реализованных соединений, количество меж-

типовых логических элементов, до пускающих изменение их содержимого.

После ввода исходных данных определяются интегральные характеристики проектируемой СБИС для выбора базового кристалла и вычисления параметров формируемого иерархического представления схемы (конструктивного иерархического представления).

Выбор базового кристалла выполняется из имеющихся в библиотеке, причем учитывается такой

циональной схемы устройства; микропрограммы в символическом виде (для микропрограммных устройств).

Разработана единая форма машинного представления информации о проекте, единая база данных накапливает информацию, необходимую для последующих этапов проектирования. Подсистемы автоматизации проектирования komponуются вокруг базы данных, являющейся стержнем всей системы и реализованной на ЕС ЭВМ. Пакеты прикладных программ, выполняющие определенные операции технологического процесса проектирования, функционируют независимо друг от друга и связаны только с центральным банком данных (ЦБД). Они решают функционально законченные задачи проектирования ТЭЗов (типовых элементов замены), передних панелей, объемного монтажа, синтеза микропрограмм, синтеза логических схем и моделирования на всех уровнях.

Взаимосвязь ППП с ЦБД осуществляется через интерфейсы, обеспечивающие эффективное функционирование программ и взаимосвязь ЦБД с автоматизированными рабочими местами. Однако каждый ППП имеет и автономный вход, позволяющий ему функционировать независимо от системы, решать свою задачу проектирования.

Управляющая программа вызывает необходимые для принятого варианта технологии проектирования программные средства, организует их выполнение, следит за состоянием и использованием данных, обменом информации в системе, контролирует процесс проектирования, возможность выполнения того или иного этапа, выдает справки о состоянии проектируемого объекта.

Программные средства САПР разделяются на две подсистемы автоматизации логического проектирования и конструкторского проектирования.

В связи с тем что методы микропрограммного управления широко применяются в ЭВМ третьего поколения, автоматизация проектирования микропрограммной логики стала весьма актуальной проблемой. В рассматриваемой САПР введены программный комплекс, позволяющий произвести настройку на произвольную структуру микрокоманды, произвольный входной язык типа АССЕМБЛЕРА и произвольный формат выходной документации. Этим устраняется необходимость разработки новых трансляторов для каждой новой модели проектируемой ЭВМ. Предусмотрен также комплекс программ для реализации логической структуры в заданном элементном базисе с последующей декомпозицией логической схемы проектируемого устройства на ТЭЗы, в частности, для перехода от функционального описания к логическим схемам. Проектируемое устройство представляется в виде операционной (функциональной) схемы и описывается на специальном языке ОСС. Результатом работы программ является логический проект устройства в виде описания ТЭЗов и таблиц соединений между ТЭЗами. В настоящее время устройства могут быть спроектированы на базе использования интегральных логических элементов типа ТТЛ и ЭСЛ.

Автоматизировано построение тестов для логических ТЭЗов, позволяющих проверить их работоспособность на специальных стендах. Имеется комплекс программ, помогающий синтезировать контролирующие тесты с помощью вероятностных методов для ТЭЗов, содержащих до 100 микросхем и до 150 контактов на разъеме.

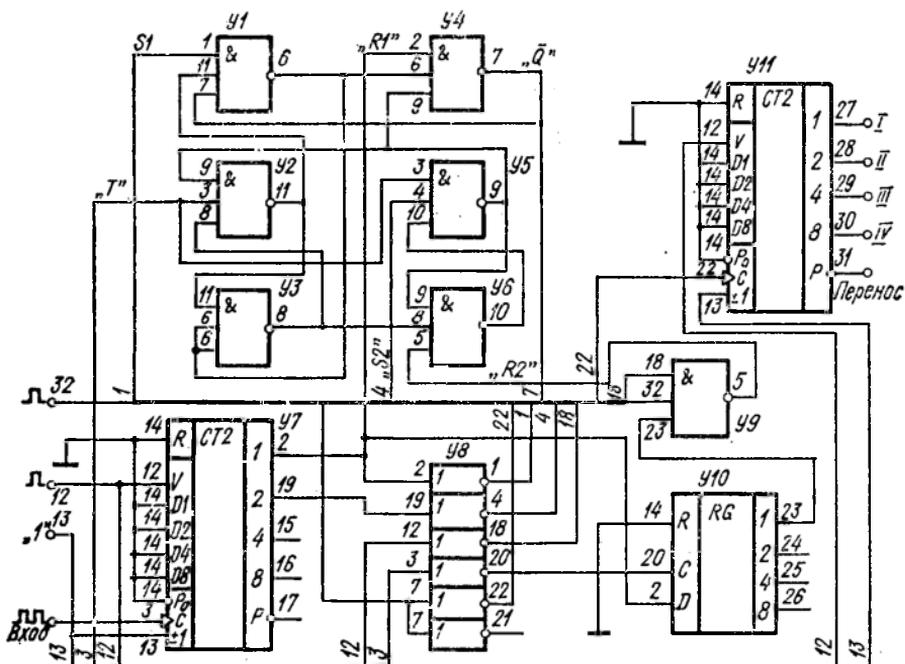


Рис. 82. Принципиальная электрическая схема счетчика импульсов.

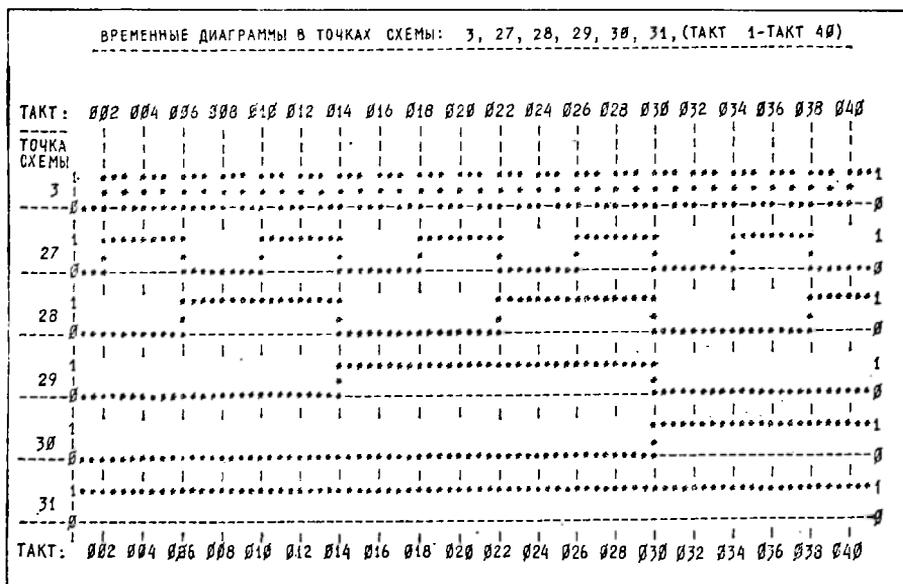


Рис. 83. Временные диаграммы в точках счетчика импульсов.

в реальном времени (внутрисхемная эмуляция); выпуск документов и носителей на программы; запись в БИС ПЗУ (электрическое программирование) отлаженных программ.

12.2. САПР В МАШИНОСТРОЕНИИ

САПР сложных технических объектов. Примером САПР в машиностроении является система автоматизированного проектирования и научных исследований сложного технического объекта (ТО) в составе подсистем [64]: формирования (синтеза) облика ТО на этапе технического предложения; проектирования внешних обводов ТО; расчета стационарных и нестационарных характеристик упругости (ТО); расчета внешних нагрузок ТО с учетом деформированного состояния; расчета и контроля масс-инерционных характеристик ТО; согласования характеристик ТО с силовой установкой; расчета основных характеристик ТО; автоматизации технологической подготовки производства; автоматизированного конструирования основных типовых элементов корпуса ТО; автоматизации подготовки, проведения и обработки результатов испытаний конструкции ТО на статическую прочность (при 5000 одновременно опрашиваемых тензодатчиков); имитационного моделирования функционирования ТО; обработки, хранения и поиска информации общего и специального назначения; автоматизации расчета сетевого графика проектирования и настройки ТО и управления процессом разработки.

Разрабатывалась система в отраслевых НИИ, академических институтах (ВЦ АН СССР, ИПМ АН СССР, ИТК АН БССР) и вузах (МГУ, МФТИ).

Основным звеном САПР является подсистема формирования облика (ФО) ТО. Реальное проектирование современного ТО не допускает однозначного оптимального (в классическом смысле) решения, проектировщик обязан найти среди конкурирующих требований надлежащий компромисс, отвечающий назначению ТО. Первым шагом конструктора при разработке нового ТО является формирование его облика.

Эта задача сводится к определению основных конструктивных параметров ТО, обеспечивающих достижение заданной цели, причем под основными конструктивными параметрами (ОКП) понимаются параметры, которые в совокупности определяют компоновочную схему, размеры и массу ТО.

Подсистема ФО в САПР осуществляет связь между этапами внешнего и внутреннего проектирования, являясь отправной точкой этапа внутреннего проектирования, существенно влияющей на доводочные работы по проекту. Для ее реализации необходимо: построить согласованную с общим критерием эффективности $\Phi(x)$ систему частных критериев эффективности $\varphi_i(x)$, описывающих отдельно выделенные качества ТО; описать множество вариантов компоновочных схем X_0 для ТО, для чего необходимо разработать компоновочные ограничения, т. е. систему равенств и неравенств, связывающую компоновочную схему ТО с вектором основных конструктивных параметров (ОКП) X ; разра-

Минимальная полная система ОКП, определяющая размерность вектора X и необходимая для разработки компоновочной схемы ТО рассматриваемого класса, составляет $n = 50$. Использовать их все одновременно в качестве варьируемых невозможно из-за ограничений по быстройдействию современных ЭВМ и возможностям конструктора. Конструктор может работать и принимать решения лишь с небольшим количеством варьируемых параметров ($n_{\text{эф}} = 8-10$), которые, как правило, являются функциями-агрегатами.

Для многомерных задач осуществляется декомпозиция проектируемого объекта по уровням иерархии, агрегирование и выделение существенных ОКП на каждом уровне иерархии этапа ФО. При этом необходимо иметь в виду, что одни и те же параметры, являясь на одном уровне иерархии несущественными, могут на следующем уровне стать существенными.

Программа комплекса ФО разработана для ЭВМ БЭСМ-6, необходимый объем оперативной памяти 50 тыс. слов, среднее время генерации одного варианта компоновочной схемы ТО, включая его оценку через расчет основных характеристик ТО, составляет 10 с для каждого уровня иерархии.

Система ПРОЕКТ-1. Система разработана применительно к задаче проектирования морских транспортных судов, характеризуется она следующим [23]:

1. Формированием в памяти вычислительного комплекса информационных моделей проектируемых судов, пополняемых в процессе решения отдельных проектных задач вновь полученными сведениями.

2. Использованием информационной модели в качестве единого источника исходных данных по объекту проектирования при решении всех проектных задач.

3. Наличием в памяти вычислительного комплекса упорядоченных сведений нормативно-справочного характера, необходимых для решения задач при проектировании однотипных объектов и составляющих постоянную часть единого банка данных систем.

4. Специализированным входным языком, позволяющим пользователю формировать проектные задачи и указывать форму представления получаемых результатов.

5. Специализированным общесистемным программным обеспечением, с помощью которого генерируются исполнительные программы и взаимодействие пользователя с банком данных.

6. Обеспечением возможности автоматизированного выполнения общепроектных, проектно-конструкторских и проектно-технологических задач.

7. Модульным построением программных средств системы, заключающимся в единообразном оформлении входов и выходов прикладных и служебных программ.

8. Использованием заранее разработанных типовых технических и технологических решений, сведения по которым введены в банк данных.

Структурная схема САПР ПРОЕКТ-1 представлена на рис. 86. Здесь 1 — отбор программных модулей, с использованием которых может быть решена сформированная на входном языке системы задача; 2 — компоновка из отобранных программных модулей испол-

готовления носителей проектной информации; 13 — подача исходных данных из информационной модели на вход программы управления изготовлением носителей информации; 14 — ввод недостающих данных пользователем; 15 — выдача фиксируемой информации для визуального контроля пользователем; 16, 19 — выборка запрашиваемых пользователем сведений из банка данных и информационной модели; 17 — ввод дополнений или изменений в банк данных; 18, 20 — выдача пользователю запрошенных сведений; 21 — ввод в информационную модель результатов неавтоматизированного решения задач.

Система ПРОЕКТ-1 ориентирована на преимущественное использование ЕС ЭВМ и их периферийных устройств.

Первая очередь САПР ПРОЕКТ-1 включает программные средства для решения с помощью ЭВМ более 140 стандартных (обычно встречающихся при разработке различных проектов) задач, относящихся к выбору наилучших характеристик проектируемых судов, определению их оптимальных элементов, генерированию согласованного теоретического чертежа, обеспечению индифферентности, устойчивости, непотопляемости, ходкости, управляемости и плавности качки, проектированию гребных винтов, корпусных конструкций, энергетической и электроэнергетической установки, судовых систем и судовых устройств, определению стоимости постройки и эксплуатации судов. Примерно 50 из этих задач решаются с использованием общесистемных программных средств и с обращением к базе данных.

Опыт практического выполнения проектных работ с помощью первой очереди системы, реализованной на ЕС-1033 (ЕС-1022) с оперативной памятью 512 Кбайт, показывает, что после завершения намеченных работ система ПРОЕКТ-1 обеспечит:

- повышение эксплуатационно-экономических показателей проектируемых судов за счет оптимизации принимаемых решений (улучшение показателей при создании судов нетрадиционных типов может достигнуть 3...5 %);
- уменьшение трудоемкости проектирования на 40...50 % и значительное сокращение времени разработки проектов;
- рациональную степень внутри- и межпроектной унификации, достигаемой за счет применения типовых решений, введенных в банк данных системы;
- резкое уменьшение количества ошибок и несогласованностей в проектной организации.

В создании первой очереди САПР ПРОЕКТ-1 принимало участие около пятнадцати организаций. Общая трудоемкость проведенных работ составила более 600 человеко-лет.

Разработан и успешно эксплуатируется ряд САПР механических систем различного вида (например, для проектирования дорожных машин, металлообрабатывающего оборудования). Несмотря на существенное различие создаваемых технических объектов эти САПР содержат общие инвариантные подсистемы такие, как ГЕОМЕТРИЯ для решения геометрических задач; ПРОЧНОСТЬ, обеспечивающая надежное функционирование деталей под заданной нагрузкой; ДИНАМИКА, предназначенная для моделирования процессов разгона, торможения и колебаний механических систем; КОМПОНОВКА, обеспе-

двух многогранников; вывода изображений на графический дисплей (в том числе с автоматической корректировкой выводимых изображений); расчета координат характеристик точек и векторов моделей объектов по заданным значениям свободных параметров; редактирования семиотических моделей; автоматического формирования модели чертежа геометрического объекта; выполняющих задание и вычерчивание выносных и размерных линий.

В настоящее время стало возможным объединить в едином производственном цикле собственно проектно-конструкторские работы, технологическую подготовку производства и автоматизацию управления изготовлением отдельных деталей и объекта в целом. Результаты проектирования, полученные на выходе САПР, непосредственно используются при формировании управляющих программ для обрабатывающих центров с ЧПУ или другого гибкого автоматического производства (ГАП). При этом в САПР управляющих программ (САПР-УП) можно выделить следующие функциональные подсистемы:

- формирования цифровой модели заготовки и детали, в которой языковые модели преобразуются в принятые канонические формы представления;

- формирования маршрута, определяющую типоразмер спутника и характеристики маршрута, распределяющую обрабатываемые элементы детали по установкам и станкам;

- координатного расчета, в которой определяются параметры привязки системы координат элементов детали, находящихся в зоне обработки, к рабочей системе координат, константы согласования указанных систем координат, рассчитываются координаты опорных точек элементов;

- проектирования технологии обработки элементов, определяющую характеристики элементарных переходов, порядок чередования зон обработки, формирующую инструментальные переходы и определяющую последовательность их выполнения;

- проектирования траектории движения инструмента, в которой определяется структура элементарных переходов, минимизируются холостые перемещения, рассчитываются координаты опорных точек траектории;

- формирования модулей управляющей программы, технологической карты, графического изображения траектории, данных для АСУ ГАП;

- графического контроля, в которой обеспечивается вывод на чертежный автомат ИТЕКАН траектории рабочих движений обработки плоских элементов, траектории холостых перемещений для инструментальных переходов.

В эксплуатации на предприятиях страны находится ряд САПР управляющих программ для станков с ЧПУ: САПР-УП — для автоматической линии с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточного типа; СПС-К — для станков сверлильно-расточной группы; СПС-ТАУ — для токарных станков; ЕСПС-ТАУ — для программирования любых станков с ЧПУ (фрезерных, токарных, сверлильных и многооперационных). Системы СПС-К, СПС-ТАУ и Е СПС-ТАУ разработаны

Входной язык СПАРС позволяет оперировать с «вложенными» моделями, в качестве которых может быть принята любая комбинация элементов, рассматриваемая относительно ее внешних полюсов. Уровень вложенности не ограничен, т. е. выделенные модели могут содержать модели более низкого уровня и т. д. Наличие системной библиотеки и режима автоматического поиска в процессе трансляции с входного языка дают возможность пользователю применять как имеющийся набор моделей, так и оперативно создавать новые применительно к конкретным условиям.

В пакете имеется набор нелинейных функций, описывающих наиболее часто используемые нелинейные элементы, а также процедура пополнения этого набора функциями пользователя.

В настоящей версии пакета используются следующие нелинейные функции [55]:

- задания гармонического воздействия;
- определения расхода через постоянный дроссель;
- расхода через щель золотника;
- определения расхода через конусный дроссель;
- расхода через дроссель с цилиндрическим отверстием;
- определения расхода через шариковый клапан;
- гидравлических потерь по длине трубопровода (для ламинарного и турбулентного течения и переходного участка);
- гидравлических потерь на местном сопротивлении;
- учета сжимаемости жидкости в переменной полости цилиндра;
- моделирования пульсации насоса и крутящего момента гидромотора;
- моделирования элементов с гармонически изменяющимся параметром;
- зоны нечувствительности;
- идеальной релейной характеристики;
- насыщения;
- жесткого упора с упругим ударом;
- описание пружины с предварительным натягом;
- зазора в механической передаче;
- жесткого упора с пластическим ударом;
- сухого трения;
- определения силы воздействия жидкости на запорный орган конусного клапана;
- гидравлической силы на золотниковом дросселе с прямоугольной щелью;
- гидравлической силы на четырехкромочном золотнике;
- гидравлической силы на золотниковом дросселе с круглыми окнами.

Использование в пакете прикладных программ СПАРС методов оперирования с разреженными матрицами, методов неявного интегрирования дифференциальных уравнений с автоматическим выбором шага и порядка аппроксимирующего полинома, методов формирования и упорядочивания математической модели в зависимости от вида анализа обеспечивают высокое быстродействие и точность при анализе сложных технических систем.

туры, а также некоторых объектов машиностроения. Пользуясь приведенным перечнем литературы, можно ознакомиться с применением ЭВМ в других областях: для проектирования электрических машин и электрических устройств [2, 36], тепловых сетей и теплоэнергетических установок [9, 16], строительных и дорожных машин [62], химических производств [31], информационных систем управления [5, 78], архитектурно-строительных сооружений [44].

Автоматизация проектирования, основанная на комплексном применении ЭВМ и современных математических методов в проектировании, является одной из наиболее эффективных и перспективных областей науки и техники. Обусловлено это не только тем, что с помощью ЭВМ многие вычислительные, расчетно-графические и информационно-поисковые работы выполняются более успешно, чем вручную. Изменяется сама технология выполнения проектно-конструкторских работ, обеспечивается единство проекта на всех этапах создания технического объекта: от генерации альтернативных идей построения объекта, выбора и анализа альтернативных из них до автоматического изготовления комплекса технической проектной документации и управляющих программ для гибких автоматических производств (обрабатывающих центров, станков с ЧПУ).

Проводимые на основе используемой цифровой модели проектируемого объекта вычислительные эксперименты позволяют решать принципиально новые задачи, недоступные ручным методам проектирования.

Становлению новой технологии проектирования способствовал ряд факторов. Прежде всего, интенсивное развитие «математизации» прикладных наук позволило создать эффективные модели объектов и процессов, включая процесс проектирования. Прогресс в области вычислительной техники, переход ее на интегральную технологию обусловил создание мини- и микро-ЭВМ, периферийного оборудования различного назначения, позволяющего реализовать диалоговое взаимодействие конструктора с ЭВМ на наиболее естественном языке графических образов. Успехи в области математического программирования обеспечили создание оптимизационных процедур для всех стадий развития проекта изделия. Все это в совокупности позволило применить ЭВМ не только для решения отдельных задач, но и осуществить переход к системам автоматизированного проектирования (САПР), своеобразным автоматизированным линиям проектных процедур и операций со строго регламентированной технологией.

25. *Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л.* Методы сплайн-функций.— М.: Наука, 1980.— 352 с.
26. *Зайцев В. Д.* Теория и методы автоматизированного проектирования химических производств.— К.: Наук. думка, 1981.— 306 с.
27. *Зенкевич О.* Методы конечных элементов в технике.— М.: Мир, 1975.— 312 с.
28. *Зазулевич Д. М.* Машинная графика в автоматизированном проектировании.— М.: Машиностроение, 1976.— 240 с.
29. *Йодан Э.* Структурное проектирование и конструирование программ.— М.: Мир, 1979.— 410 с.
30. *Казанцев А. К.* Экономический анализ в управлении исследованиями и разработками.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1981.— 173 с.
31. *Кафаров В. В., Мешалкин В. П., Перов В. Л.* Математические основы автоматизированного проектирования химических производств.— М.: Химия, 1979.— 278 с.
32. *Кликов Ю. И., Горьков Л. Н.* Банки данных для принятия решений.— М.: Сов. радио, 1980.— 208 с.
33. *Кохан Д., Якобс Г. Ю.* Проектирование технологических процессов и переработка информации.— М.: Машиностроение, 1981.— 312 с.
34. *Кузнецов Ю. Н., Кузубов В. И., Волощенко А. Б.* Математическое программирование.— М.: Высш. школа, 1976.— 351 с.
35. *Лопато Г. П.* Некоторые проблемы разработки комплексной системы автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры.— В кн.: II Всесоюзное координационное совещание по автоматизации проектирования в отраслях машиностроения.— Минск: Изд-во ИТК АН БССР, с. 12—20.
36. *Математические методы и программные средства проектирования электротехнических изделий с помощью ЭВМ/Геминтерн В. И., Каган Г. М., Розенкноп В. Д., Стрельбицкий Э. К.*— М.: Информэлектро, 1980.— 101 с.
37. *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики.— М.: Наука, 1980.— 534 с.
38. *Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Курейчик В. М.* Применение графов для проектирования дискретных устройств.— М.: Наука, 1974.— 304 с.
39. *Методы поиска новых технических решений / Под ред. А. И. Половинкина.*— Йошкар-Ола: Марийское книжное изд-во, 1976.— 192 с.
40. *Михалев С. Б.* Автоматизация процессов подготовки производства.— Минск: Белорусь, 1973.— 286 с.
41. *Михалевич В. С.* Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение.— Кибернетика, 1965, № 1, с. 21—27; № 2, с. 18—26.
42. *Моделирование и оптимизация радиоэлектронных устройств на ИС / Под ред. З. М. Бененсона.*— М.: Сов. радио, 1981.— 356 с.
43. *Мясников В. А., Бойко В. В.* О некоторых проблемах автоматизации конструирования в машиностроении.— В кн.: I Всесоюзное совещание по автоматизации проектирования в машиностроении. Минск: Изд-во ИТК АН БССР, 1978, с. 57—67.
44. *Нагинская В. С.* Автоматизация архитектурно-строительного проектирования.— М.: Стройиздат, 1979.— 301 с.
45. *Норенков И. П.* Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем.— М.: Высш. школа, 1980.— 311 с.
46. *Осипов В. А.* Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей.— М.: Машиностроение, 1974.— 248 с.
47. *Общая характеристика пакета прикладных программ для решения задач схемотехнического проектирования / Петренко А. И., Власов А. И., Тимченко А. П., Мачуговский В. С., Ладогувец В. В.*— Электронное моделирование, 1979, т. 1, № 2, с. 68—79.
48. *Павлов В. В.* Математическое обеспечение САПР.— М.: МФТИ, 1978.— 66 с.
49. *Петренко А. И.* Основы автоматизации проектирования.— К.: Техніка, 1982.— 293 с.
50. *Петренко А. И., Власов А. И., Тимченко А. П.* Табличные методы моделирования электронных схем на ЭЦВМ.— К.: Вища школа, 1977.— 200 с.
51. *Петренко А. И., Цурин О. Ф., Киселев Г. Д.* Автоматизация проектирования цифровых схем.— К.: Вища школа, 1978.— 150 с.
52. *Петренко А. И., Тетельбаум А. Я., Шрамченко Б. Л.* Автоматизация конструирования электронной аппаратуры. Топологический подход.— К.: Вища школа, 1980.— 173 с.

78. Тищенко Н. М. Введение в проектирование сложных систем автоматики.— М. : Энергия, 1976.— 304 с.
79. Химмельблау Д. Прикладное математическое программирование.— М. : Мир, 1975.— 510 с.
80. Цветков В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов.— Минск : Наука и техника, 1981.— 289 с.
81. ЭВМ в проектировании и производстве / Под. ред. Г. В. Орловского.— Л. : Машиностроение, 1983.— 296 с.
82. Ярмаш И. А. Информационное обеспечение процессов проектирования / Под ред. Ю. М. Шамаева.— Минск : Наука и техника, 1975.— 264 с.
83. *The mathematics of finite elements and applications — III* / ed. by J. R. Whitman.— Academic Press, 1979, p. 19—34.
84. Mitchell A., Wait R. The finite element method in partial differential equations.— John Wiley and Sons, 1977.— 198 p.
85. Ruehli A., Lelarasmee E. A new relaxation technique for simulating MOS digital integrated circuits.— Proc. 1982 IEEE Int. Symp. Circuits Systems, 1982, p. 1202—1205.
86. Dube R. Preliminary specification of spline curves.— IEEE Trans on computers, 1979, C—28, № 4, p. 286—290.

В Головном издательстве
издательского объединения «Вища школа»
в 1985 году
выйдет в свет учебное пособие «Промышленные роботы
(конструирование, управление и эксплуатация)».
Авторы: В. И. Костюк, А. П. Гавриш,
Л. С. Ямпольский, А. Г. Карлов

В книге рассмотрены принцип действия и устройство современных промышленных роботов, дано систематизированное описание основных функциональных систем промышленного робота. Изложены принципы конструирования и управления промышленных роботов; описаны методы системного анализа роботизируемого производства и приведено формализованное представление производственных процессов и морфологическое описание робототехнических систем для таких процессов. Рассматриваются этапы технологической подготовки производства при внедрении промышленных роботов. Приведены примеры агрегатированного построения промышленных роботов, дано описание конструкций отечественных и зарубежных промышленных роботов, их классификация и элементная база: исполнительные механизмы, приводы, элементы информационного обеспечения и управления, захватные устройства. Даны анализ условий и примеры взаимодействия промышленных роботов с объектами роботизации. Приведена методика расчета отдельных функциональных элементов робототехнических систем. Изложены методы и рассмотрены средства обеспечения основных показателей качества промышленных роботов и проведения испытания ПР.

Предназначена в качестве учебного пособия для студентов робототехнических специальностей (0654, 0636, 0501, 0510, 0528 и др.) высших учебных заведений, а также для студентов соответствующих специальностей средних специальных учебных заведений. Может быть полезна инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием, изготовлением и внедрением промышленных роботов в производство.

УВАЖАЕМЫЕ ТОВАРИЩИ!

Эту книгу можно заказать в магазинах облкниготоргов и облпотребсоюзов, а также в специализированных магазинах «Книга—почтой».

в схему связей между микросхемами (принципиальную схему), в которых имеются все логические элементы.

Покрытие логической схемы микросхемами рассматривается как многокритериальная оптимизационная задача, при решении которой оптимизируются следующие частные критерии: общее число микросхем в формируемой принципиальной схеме; суммарное количество межкорпусных парных соединений; суммарная стоимость микросхем; суммарная площадь, занимаемая микросхемами; число неиспользованных (избыточных) логических элементов в микросхемах; степень параллельности соединений между микросхемами.

В процессе решения задачи последовательно формируются (заполняются) микросхемы, пока не будут покрыты все элементы. Этап формирования очередной микросхемы сводится к наращиванию группы K элементов включением в нее на каждом шаге i нового непокрытого элемента l_i . На первом шаге $k = k_1 = \{l_1\}$. Группа K наращивается до тех пор, пока существует хотя бы одна покрывающая ее микросхема. На каждом i -м шаге определяется лучшая с точки зрения перечисленных частных критериев микросхема M_i , покрывающая группу K_i ($K_i \subseteq M_i$). После того, как на некотором шаге n выясняется, что группа K_n не может быть дополнена ни одним элементом, наращивание группы прекращается. Микросхема M_i ($1 \leq i \leq n$), для которой достигаются лучшие значения критериев, включается в формируемую принципиальную схему, а элементы K_i исключаются из множества непокрытых элементов.

Сформированная на этапе покрытия принципиальная схема является исходной информацией для решения задач размещения наряду с описанием конструкций и размеров платы, микросхем и электрорадиоэлементов.

По желанию пользователя размещение элементов выполняется в одном из трех режимов: размещения элементов в регулярно расположенных позициях; свободное размещение элементов в произвольных точках плоскости платы; размещение микросхем в регулярных позициях и свободное размещение электрорадиоэлементов.

В процессе решения многокритериальной задачи размещения оптимизируются следующие частные показатели: суммарная длина соединений; равномерность заполнения платы элементами и соединениями; минимальное расстояние между двумя элементами из сосредоточиваемой группы.

Программы размещения применимы к схемам с числом элементов до 500. Для наиболее распространенных по числу элементов схем (на 150 элементов) время проектирования двухсторонней печатной платы на АРМ2-01 составляет 8...10 мин.

Фрагмент эскиза размещения разногабаритных элементов на плате показан на рис. 62.

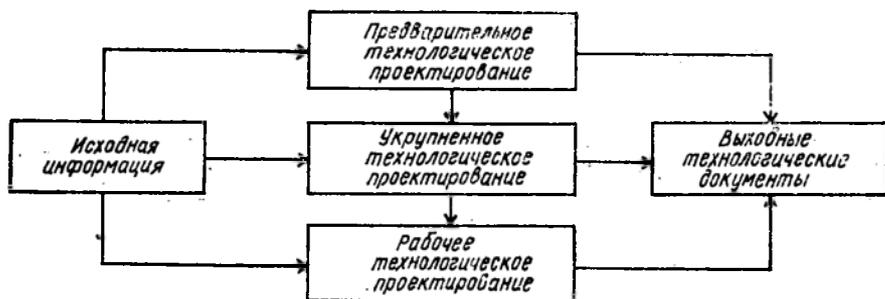


Рис. 63. Укрупненная схема функционирования задач ТПП.

мостью явилась автоматизация технологического проектирования на базе ЭВМ.

Методологической основой создания систем автоматизации технологического проектирования (САПР ТП) на конкретных предприятиях является комплекс государственных стандартов, регламентирующих Единую систему технологической подготовки производства (ЕС ТПП) как совокупность правил и положений по организации и управлению процессом ТПП на основе применения современных методов организации производства, унификации технологических процессов и средств оснащения, методов и средств вычислительной техники для автоматизации процессов ТПП.

ЕСТПП основана на следующих принципах:

1. Широкая унификация и типизация элементов ТПП.
2. Оптимизация применительно к конкретным условиям производственно-технологических решений.
3. Рационализация документации и документооборота.
4. Совершенствование и повышение уровня стандартизации элементов и процессов ТПП.
5. Рациональная механизация и автоматизация объектов и процессов в ТПП.

Методологический характер ЕС ТПП состоит в том, что с учетом основополагающих принципов и соответствующих стандартов разрабатываются конкретные стандарты отраслей и предприятий, конкретизирующие положения ЕС ТПП применительно к условиям производств.

На рис. 63 приведена укрупненная схема функциональных задач, составляющих содержание работ по ТПП. Исходной информацией являются: технические условия к ТЗ на САПР (производственная программа); характеристики изделий; основные направления технологии в целом и по отдельным процессам заготовки, обработки, отделки и сборки; основные направления по проектированию технологического оснащения; намечаемое оформление технической документации; степень механизации и автоматизации производственных процессов; намечаемая специализация и производственная структура основных цехов; задания по основным технико-экономическим показателям; чертежи объектов производства; классификации, существующие на заводе; состав и краткая характеристика цехов, участков завода; чертежи деталей и узлов изделия, ТУ и указания отдела главного конструктора;

дартном оборудовании, инструменте, оснастке, действующих стандартах, нормалях, РТМ в области технологии и организации производства.

● *Научные и инженерно-технические расчеты и проектирование* — проектирование и расчеты, связанные с выбором технологии, оснастки, инструмента, нестандартного оборудования, создание поточных линий, участков.

● *Статистическая обработка данных* — группировка данных, их математическая обработка и анализ результатов лабораторных технологических испытаний, анализ применимости деталей, узлов, материалов, оснастки, инструмента, видов обработки, допусков, посадок, заготовок и т. д., технологическая классификация деталей и технологических процессов при их типизации и унификации.

● *Инженерно-экономические расчеты* — выполнение расчетов по экономическому обоснованию целесообразности принятых технологических решений, эффективности технологии и организации производства новых изделий.

● *Документационные работы* — составление сводной технологической и нормативной документации на изделие: табуляграммы, таблицы, ведомости о составе изделия, трудоемкости, потребных материалах, оснастке, оборудовании и т. д.

● *Разработка нормативов* — систематизация и обобщение фактических данных о сроках, трудоемкости и стоимости проведенных работ по технологической подготовке производства, расчеты нормативов трудоемкости изготовления изделия, норм расхода материалов, оснастки.

● *Плановые работы* — выполнение расчетов, составление планов и графиков технологической подготовки производства, планирование сроков и объемов технологических работ.

● *Учетные работы* — учет и анализ выполнения планов технологической подготовки производства, учет разработки, поступления и отправки технологической документации, выполнение изменений.

10.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В САПР-ТП

Технологической подготовке производства присущи характерные черты сложной кибернетической системы. Отметим следующие наиболее существенные: система ТПП имеет четко выраженную цель — построение знаковой модели производственного процесса для изготовления определенного изделия; для достижения этой цели система располагает информационными ресурсами; система обладает свойствами адаптирования к изменяющимся производственным условиям и самоорганизации в части целесообразного изменения своей структуры и процессов функционирования под влиянием внешней среды.

Содержание работ ТПП представлено на рис. 67 [40]. Регламентированные в стандартах ЕС ТПП функции представляют собой исходную основу для решения задач автоматизации процессов ТПП. Многообразие этих задач можно представить на основе технологического классификатора деталей машиностроения и приборостроения, в котором зафиксировано свыше 500 наименований технологических операций по

цифровая модель обрабатываемой детали и объем ее изготовления. Технологическими ограничениями, определяющими допустимые варианты технологического процесса изготовления на данном предприятии, являются:

Множество допустимых методов обработки

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

где M — множество известных методов обработки;
состав технологического оборудования

$$CT = \{CT_1, CT_2, \dots, CT_k\} \subseteq SO,$$

где SO — каталог выпускаемого оборудования;
набор установочно-зажимных приспособлений

$$ПР = \{ПР_1, ПР_2, \dots, ПР_m\};$$

набор инструментов

$$ИН = \{ИН_1, ИН_2, \dots, ИН_l\};$$

набор типо размеров заготовок

$$З = \{З_1, З_2, \dots, З_D\}.$$

Информационная база процесса проектирования включает справочно-нормативные данные и технико-экономические показатели.

Все множества данных являются компонентами общей технологической модели предприятия, в условиях которого будет реализован данный технологический процесс.

Задача проектирования состоит в том, чтобы при заданных технических ограничениях определить системные характеристики технологического процесса и его элементов, обеспечивающие получение заданных чертежом форм, точностных параметров и физико-механических свойств детали с наименьшей технологической себестоимостью:

$$E_T = E_M + \sum_{i=1}^N E_i \rightarrow \min,$$

где E_M — стоимость материала детали; E_i — себестоимость отдельных операций; N — количество операций в технологическом маршруте.

Цифровая модель детали строится технологом в памяти ЭВМ описанием ее на формализованном технологическом языке, либо она может быть получена непосредственно по данным этапа автоматизированного конструирования.

Результат проектирования технологического процесса представляется в форме графа $S(C, \Phi)$, где C — множество вершин, соответствующих состояниям обрабатываемой детали, Φ — множество ребер, отображающих операции и переходы.

Например, какой-то технологический процесс представлен в виде

$$S(C, \Phi) = c_0 \Phi_1 c_1 \begin{cases} \Phi_2 c_2 \\ \Phi_3 c_3 \Phi_4 c_5 \begin{cases} \Phi_5 c_5 \\ \Phi_6 c_6 \\ \Phi_7 c_2 \end{cases} \Phi_8 c_8 \end{cases}$$

необходимые для решения совокупности технологических задач. Пример D-модели детали приведен на рис. 68.

Автоматизация проектирования металлорежущих инструментов. На крупных машиностроительных заводах ежегодно изготавливается около 10000 типоразмеров различных режущих и измерительных инструментов, 30 % из которых являются новыми [72]. От уровня инструментального оснащения во многом зависит качество, сроки освоения новых изделий и экономические показатели предприятия. Поэтому одной из важнейших задач является создание автоматизированных систем инструментальной подготовки производства (АСИПП).

Требование улучшения эксплуатационных характеристик режущих инструментов связано с оптимизацией геометрических параметров конструкции, выполняемой путем многовариантного решения различных задач в процессе проектирования. Следовательно, основная задача разработки алгоритма проектирования заключается в составлении определенной строгой последовательности плана необходимых действий, обеспечивающего наилучший по принятым критериям оценки вариант решения.

В Институте технической кибернетики АН БССР разработана и применяется в промышленности система автоматизации проектирования инструментальной подготовки производства, позволяющая решать задачи (рис. 69): оснащения технологических процессов основного производства инструментами из имеющейся номенклатуры (нормализованный и специальный инструмент); проектирования новых специальных инструментов; разработки технологических процессов изготовления новых специальных инструментов; подготовки технико-экономических данных для планирования инструментального производства.

Основное требование, предъявляемое к данной системе инструментальной подготовки производства, — возможность внедрения ее на машиностроительных предприятиях с различным характером и масштабом производства, разными видами выпускаемой продукции. Система строится на основе максимальной стандартизации отдельных программ, обеспечивающих поэтапный ввод в эксплуатацию с возможностью расширения системы для проектирования новых видов инструментов, а также технологического проектирования.

Особенностью данной системы является проектирование не отдельных инструментов, а всего набора, необходимого для полного формообразования и контроля отдельных поверхностей обрабатываемой

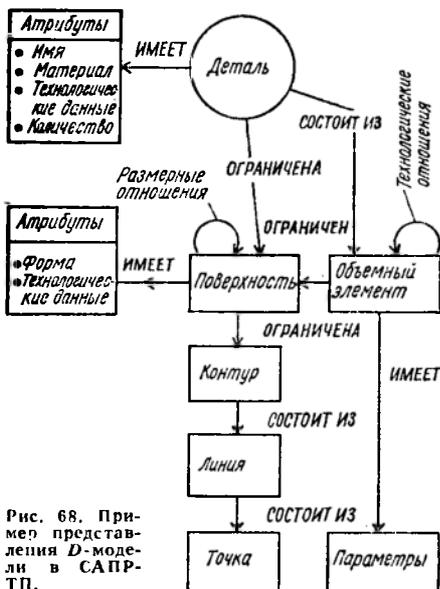


Рис. 68. Пример представления D-модели в САПР-ТП.

показателей, содержащих марку и профиль материала инструмента, нормы расхода материала и его стоимость, длительность изготовления инструмента в часах, себестоимость в рублях механической, кузнечной и термической обработки и отпускную цену.

Накопление в базе данных каталога инструментов, а также различных технико-экономических данных открывает большие возможности для включения АСУ ПП в общую автоматизированную систему управления предприятием (АСУП). Опыт внедрения проектирования инструментов показывает большие преимущества этого метода в сравнении с обычным проектированием. Применение ЭВМ для расчетов сложных инструментов позволило не только сократить сроки проектирования в десятки раз, но и осуществить многовариантные расчеты для нахождения оптимального конструктивного решения.

При неавтоматизированном проектировании конструктор затрачивает на расчет одного-двух вариантов сложного инструмента 5...30 ч, а многовариантное машинное проектирование требует 1...5 мин. Подготовка исходных данных для расчета инструмента на ЭВМ занимает 10...20 мин, а на подготовку информации на машинных носителях затрачивается оператором 3...5 мин. Преимущество этого метода состоит в том, что при его применении исключаются выпуск дефектных чертежей и дублирование инструментов.

Если учесть, что около 30 % себестоимости специальных инструментов составляют затраты на проектные работы, а трудоемкость их при машинном проектировании значительно сокращается, то потенциальный эффект в целом в промышленности только на примере зуборезного инструмента составляет 5 млн. руб. В общей же экономической эффективности автоматизации инструментального проектирования преобладает эффект, получаемый при эксплуатации инструментов.

Автоматизация проектирования технологической оснастки. Проектирование и изготовление технологической оснастки — лимитирующее звено в цикле технологической подготовки производства машин. Это объясняется [61]: ростом объемов производства изделий, частой сменяемостью и непрерывным усложнением конструкции, приводящим к интенсивному росту проектных работ по технологическому оснащению; высокими затратами материальных средств и времени на проектирование и изготовление оснастки, существенно увеличивающими себестоимость изделий и удлиняющими цикл их подготовки к запуску в производство; недостатком высоким уровнем нормализации технологического оснащения, затрудняющим повышение серийности производства технологического оснащения; недостатком времени на выполнение обязательных расчетов при конструировании технологического оснащения, а также низкой технической оснащенностью процессов проектирования, что отрицательно сказывается на качестве получаемых проектных решений.

Процесс технической подготовки производства технологического оснащения включает два вида проектной деятельности: конструирование и технологическое проектирование. Конструирование охватывает процессы разработки конструкции и получения конструкторской документации. Технологическая подготовка производства оснастки содержит процессы проектирования маршрутных технологий изготовления де-

ления в виде соответствующих цифровых массивов. Управление передается блоку составления спецификации, результаты работы которого выдаются на печатающее устройство ЭВМ.

Далее реализуется блок формирования программ вычерчивания, которые впоследствии управляют чертежно-графическим автоматом при построении сборочного и детализированных чертежей конструкции. Процесс завершается в блоке технологического проектирования и подготовки программ для станков с ЧПУ для изготовления деталей приспособления. В результате печатается необходимая технологическая документация, формируются сведения для СУП, а на перфоратор выдаются программы управления станками с ЧПУ для обработки деталей.

Система обеспечивает снижение трудоемкости проектных работ, повышение уровня нормализации конструкций, ускорение процессов технической подготовки производства основных изделий, повышение качества получаемых решений и технической документации.

Автоматизация проектирования штампов. В современном производстве с помощью листовой штамповки изготавливают разнообразные по форме детали с минимальными затратами. Объем производства штампованных деталей достигает 50..70 % [21]. В некоторых отраслях промышленности ежегодно объемы проектирования штампов исчисляются десятками и сотнями тысяч наименований.

Автоматизация конструирования штампов позволяет сократить сроки подготовки технической документации, снизить себестоимость проектных работ, повысить качество проектов, дать возможность конструктору решать наиболее творческие задачи, создать условия для автоматизированной подготовки программ изготовления деталей штампов на станках с ЧПУ. Важными предпосылками для разработки и промышленного использования нового способа конструирования штампов являются: достаточно высокий уровень типизации и стандартизации их конструкций, узлов и деталей; возможность формализации процесса принятия решений при конструировании наиболее широкоприменяемых типов штампов; создание методов цифрового кодирования машиностроительных чертежей; развитие методов геометрического моделирования деталей; разработка программно-управляемых чертежей устройств.

Исходные данные для автоматизированного конструирования штампов включают сведения об операционном чертеже штампуемой детали, номер детали и штампа, параметры раскроя заготовки, указание о предпочтительном варианте конструкции штампа. Эти сведения в соответствии со специальной инструкцией преобразуются в цифровую форму.

При реализации программного комплекса исходные данные перерабатываются в спецификации деталей штампа, определяющие для каждой из деталей вариант типовой конструкции, размеры, материал.

Полученное цифровое описание конструкции штампа преобразуется в общепринятую техническую документацию двумя способами. Первый способ — распечатка результатов проектирования в виде табуляграмм и использование их при ручной доработке специальных бланк-чертежей общего вида и деталей штампа; второй — автоматическое изготовление чертежей на чертежно-графическом автомате «ИТЕКАН-2М».

11 ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ САПР

11.1. ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Современное предприятие, разрабатывающее и создающее новые сложные машины, приборы, по сути является сложной организационно-технической системой со своими проблемами и задачами, обладающей ограниченными трудовыми, материальными и информационными ресурсами. Процесс создания нового изделия на таком предприятии представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных работ, в котором различают такие крупные функциональные системы: проектирование и конструирование изделий; технологическую подготовку производства опытных образцов; управление процессами изготовления; управление испытаниями опытных образцов изделий.

Повышение эффективности и качества разрабатываемых изделий и процессов их производства обеспечивается проведением в каждой из перечисленных систем исследовательских и экспериментальных работ с целью совершенствования методов и средств проектирования, технологической подготовки производства, изготовления и испытаний изделий, а также совершенствования управления всем комплексом. Принцип системного подхода требует рассмотрения этого комплекса как единой системы, обеспечивающей проектирование и управление жизненным циклом изделия в целом, с одной стороны, и управление собственным развитием, с другой. Этим обуславливается необходимость создания в рамках предприятия специальных служб, осуществляющих непрерывное проектирование функциональных систем и предприятия в целом для оптимизации их деятельности в условиях постоянно изменяющихся требований и условий внешней среды. Эти изменения происходят по двум направлениям: постановке и реализации в системе новых функциональных задач и их интеграции с существующими на единой технической и информационной основе; перестройке организационной и функциональной структуры предприятия под влиянием новых задач и новой технологии выполнения работ, которую создают автоматизированные системы разработки изделий.

Поскольку новые задачи и средства их решения возникают непрерывно, процесс развития и совершенствования организационно-технической системы должен быть составной частью процесса управления.

В настоящее время уже сложилась определенная схема реализации действий (операций) по совершенствованию организационно-технических систем. Она включает: а) обследование существующей системы с целью построения единой картины материальных, трудовых и информационных процессов, а также схем принятия решений, анализ организационной и функциональной структур, потоков и состава сырья, материалов и информации, схем принятия управленческих и проектных решений, построение информационно-логической модели обследуемой системы; б) декомпозицию модели и представление ее в виде иерархи-

ляются низкий уровень квалификации определенной категории сотрудников, недостаточная достоверность получаемой извне информации, большие затраты времени на согласование проектных решений. Вторых, с проблемами других организаций или подразделений, связанных с данной проектной организацией общими целями или единым технологическим процессом. На проблемы, решаемые ими, проектная организация оказывает свое влияние.

Реализация процесса проектирования в проектной организации осуществляется при помощи СИСТЕМЫ, представляющей собой совокупность организованных должным образом методов и средств, с помощью которых организация решает свои проблемы и достигает цели.

Для организации выделенных объектов в информационно-логическую модель проектной организации необходимо дополнительно к словарю объектов составить словарь отношений между ними.

Исходя из логики функционирования моделируемого объекта будем оперировать следующим набором отношений:

- xR_{1y} — объект x ДОСТИГАЕТ объект y ;
- xR_{2y} — объект x ОСУЩЕСТВЛЯЕТ объект y ,
- xR_{3y} — объект x ОТВЕТСТВЕНЕН за объект y ,
- xR_{4y} — объект x ОБЕСПЕЧИВАЕТ объект y ,
- xR_{5y} — объект x ЯВЛЯЕТСЯ ВХОДОМ объекту y ,
- xR_{6y} — объект x ЯВЛЯЕТСЯ ВЫХОДОМ объекту y ,
- xR_{7y} — объект x ВЛИЯЕТ на объект y ,
- xR_{8y} — объект x ВОЗНИКАЕТ в объекте y ,
- xR_{9y} — объект x ВОЗДЕЙСТВУЕТ на объект y ,
- xR_{10y} — объект x ОПРЕДЕЛЯЕТ объект y ,
- xR_{11y} — объект x СОСТОИТ ИЗ объектов y ,
- xR_{12y} — объект x ЯВЛЯЕТСЯ ЧАСТЬЮ объекта y ,
- xR_{13y} — объект x СООТВЕТСТВУЕТ объекту y .

Имея набор объектов-понятий и множество отношений между ними, составим информационно-логическую модель понятия ПРОЕКТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ. Форма записи модели приведена в табл. 21, а ее графическое изображение показано на рис. 71.

Рассмотрим на этой модели процессы, протекающие в проектной организации. Исходным для начала процесса проектирования является поступление ЗАДАНИЯ на вход системы ПРОЕКТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ. Осуществляя ПРОЦЕСС, проектирующая система ставит своей задачей достижение ЦЕЛИ. При этом возникает ряд ПРОБЛЕМ, которые влияют на ПРОЦЕСС и ПРОЕКТ. ОРГАНИЗАЦИЯ несет ответственность за ПРОЕКТ как результат своей деятельности. Для нейтрализации воздействия отрицательных факторов на ПРОЦЕСС и ПРОЕКТ проектная организация выявляет и распознает собственные ПРОБЛЕМЫ, создавая новые и/или привлекая извне существующие

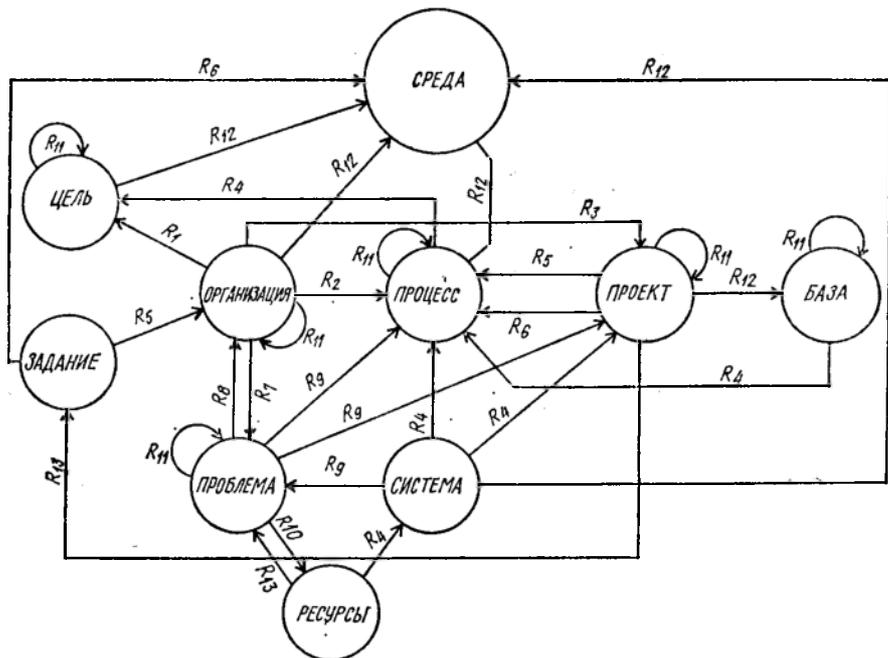


Рис. 71. Информационно-логическая модель ПРОЕКТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ.

данной, модель будет развиваться вместе с проектной организацией, отражая все изменения, происходящие в ней, и представляя необходимые данные экспертам для выработки решений по совершенствованию системы проектирования.

В-четвертых, модель отражает структуру и типы данных, которые должны собрать специалисты по анализу систем при проведении предпроектного обследования. Каждый объект-понятие, входящий в модель, необходимо конкретизировать, присвоив ему блок данных, описывающих его свойства. Эти данные образуют структуру на новом, более детальном уровне, раскрывающую семантику исходного объекта-понятия.

Эти свойства информационно-логической модели позволяют применять ее для определения и обоснования требований к системе автоматизации проектирования как носителю новой технологии выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР).

11.2. АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ И ПЛАН ВНЕДРЕНИЯ САПР

Информационно-логическая модель является основой для анализа проектной организации путем ее декомпозиции, сбора сведений о компонентах и условиях их функционирования. Конечный результат анализа — исходная информация для группы экспертов, необходимая для выработки решений о том, какие информационные ресурсы должны быть введены в проектирующую систему и как они должны быть орга-

структуру проектов (структуру, состав и виды проектной документации по этапам процесса проектирования, отношения между частями проекта, процедуры контроля проектной документации, процедуры корректировки проектов, показатели их качества).

3. Определить процесс проектирования: многоальтернативную сеть, отображающую процесс проектирования (этапность, проектные процедуры по этапам процесса проектирования, типовые логические последовательности работ над проектом, входную информацию, промежуточную информацию, показатели качества процесса проектирования); информационные ресурсы, используемые при проектировании (типовые проектные решения, методики проектирования, информационные фонды, методы оценки качества проектных решений, процедуры управления информационными ресурсами); проектные операции (алгоритмы выполнения подготовительных и расчетных операций, операций контроля, а также операций по составлению проектных документов и поиску информации).

Для сбора этих данных и их интерпретации, конкретизирующих информационно-логическую модель проектной организации, используются два основных источника: нормативные и правовые документы, устанавливающие структуру организации, ответственность персонала, нормативную технологию процесса проектирования и критерии оценки результатов; интервью с руководителями подразделений всех уровней иерархии проектной организации. Систематизированные данные, полученные из первых двух источников, представляются на согласование руководству организации, в результате чего окончательно формулируются и уточняются основные цели, задачи и проблемы проектной организации.

Степень детализации собираемых при обследовании данных определяется следующим: повышением организационно-технологического уровня проектной организации и разработкой необходимых исходных данных для формирования технического задания на создание САПР. В результате обследования и анализа данных создаются описания элементарных структурных единиц проектной организации (ЭСЕПО) (рис. 73). Для каждой такой структурной единицы фиксируются в форме документов следующие сведения:

- *Организационные отношения* внутри данной ЭСЕПО и с другими подразделениями организации. Этот документ устанавливает состав и распределение ответственности между проектировщиками ЭСЕПО в рамках выполняемых проектных работ в соответствии со специализацией, а также соподчиненность ЭСЕПО в структуре проектной организации.
- *Технологические отношения* между компонентами ЭСЕПО в процессе проектирования. Эти отношения определяют состав и последовательность проектных работ, процедуры принятия проектных решений и проектные операции. Документ описывает основные функции, выполняемые ЭСЕПО в организационной структуре процесса проектирования.
- *Средства проектной деятельности*, представляющие собой инструментальную основу выполнения проектных процедур и операций и включающие средства обработки данных, моделирования проектных решений, документирования, информационного обеспечения.

ПРОЦЕСС	Спецификация проектных процедур и операций, выполняемых в ЭСЕПО
ПРОЕКТ	Спецификация создаваемых в ЭСЕПО проектных документов
ПОКАЗАТЕЛЬ	Перечень показателей, по которым оценивается работа ЭСЕПО
СОЗДАЕТ ЗАДАНИЕ	Спецификация выходов проектных процедур Спецификация директивных документов на выполнение проектных работ
КАДРЫ	Распределение должностей по выполняемым функциям в трудовом процессе

Данные об ЭСЕПО вводятся в ЭВМ, где и образуется база данных, описывающая информационно-логическую модель всей проектной организации. Использование ЭВМ для создания и введения автоматизированной базы данных о проектной организации позволяет использовать мощные программные средства для информационно-логического и численного анализа процессов и объектов в проектной организации. Укажем лишь некоторые:

- автоматизированная база данных позволяет накапливать и логически организовать большие объемы информации, что потенциально может обеспечить проведение более глубокого и всестороннего анализа деятельности проектной организации;
- периодическое проведение обследования организации с целью ее совершенствования в условиях существующей базы данных, содержащей информационно-логическую модель, позволяет использовать ее в имитационных экспериментах для обоснования решений по совершенствованию организационной структуры и технологии процесса проектирования;
- использование базы данных позволяет исключить дублирование данных, а наличие логических связей обеспечивает необходимый контроль за полнотой представленных в модели данных и их совместностью;
- накопление в базе данных текущих значений показателей деятельности подразделений и организации в целом позволяет автоматизировать многие этапы работы экспертов по диагностическому анализу, выработке исходных данных для проектирования САПР и оценке организационно-технологического уровня.

Основой для формального отображения информационно-логической модели в памяти ЭВМ является выделение в проектируемом объекте категорий ОБЪЕКТ, СВОЙСТВО и ОТНОШЕНИЕ. Такой подход является универсальным, поскольку любой объект, в том числе и проектная организация, может рассматриваться как система, состоящая из множества объектов со связями между ними. В каждом конкретном случае объекты представляют собой реальные компоненты данной предметной области. Связи и отношения между предметами служат для объединения их в единое целое, в систему.

Для программной реализации информационно-логической модели в памяти ЭВМ используются множества имен объектов-понятий (V), отношений над компонентами (C) и наборов данных (D_V и D_C), описывающих объекты V и отношения C соответственно. Программный комплекс управления моделью реализует две группы операций. Операции

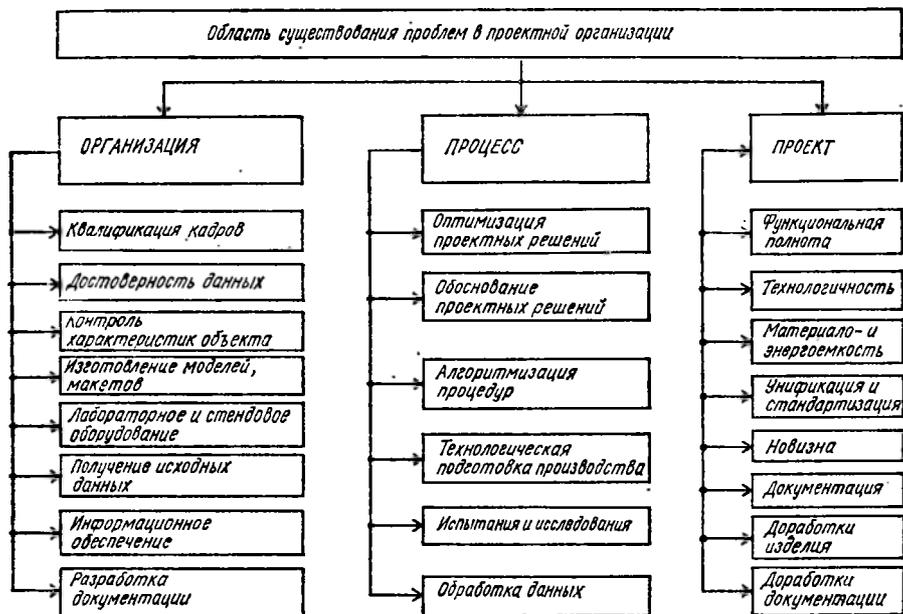


Рис. 74. Схема классификации проблем.

роприятий по повышению организационно-технологического уровня проводится с учетом приоритетов решения тех или иных проблем, определяемых степенью их влияния на конечные показатели деятельности.

Полный комплекс работ по проведению предпроектных исследований регламентируется ГОСТ 23501.7—80. Наиболее важным результатом исследования проектной организации, определяющим и ценность этого этапа в создании САПР, является повышение организационно-технологического уровня как необходимой предпосылки автоматизации проектирования. Это выражается в решении следующих задач, составляющих основу плана мероприятий: приведение в соответствие структуры проектной организации и организационной структуры процесса проектирования; структуризация и упорядочение информационной базы в части типизации проектных решений, описания и классификации эталонов, структур и компонентов объектов проектирования, нормативов выполнения проектных работ; идентификация проектных процедур и разработка алгоритмов их выполнения; структуризация процесса проектирования и разработка документа «Логическая схема построения проекта» (ЛСПП); инженерно-техническая и психологическая подготовка кадров к работе в условиях создания и внедрения САПР.

Результаты решения этих задач экспертами являются основой для разработки технического задания на создание САПР. Содержание и порядок разработки этого документа регламентируется ГОСТ 23501.2—79.

Остановимся на некоторых вопросах организации работ по созданию САПР в проектной организации. Необходимыми условиями для начала работ являются результаты и выводы предпроектного исследо-

банк данных систем; организацию централизованного хранения документации по программному обеспечению и собственно программ на машинных носителях, поддержание их в работоспособном состоянии; организацию обучения сотрудников работе с помощью САПР; получение ГОСТов, ОСТов и других руководящих документов по САПР, разработку стандартов предприятия и инструкций, устанавливающих порядок внедрения машинных методов выполнения проектных работ, контроль за их выполнением; получение в родственных организациях, уже внедривших САПР, массивов справочно-нормативной информации, необходимой для автоматизированного выполнения проектных работ, организацию с привлечением специализированных подразделений и корректировки этих массивов с учетом специфики организации; оценку эффективности использования САПР.

На создание одной САПР в проектной организации затрачивается 5...10 лет при участии в разработках от 50 до 500 специалистов высокой квалификации и расходах средств 1,5...15 млн. руб. Поскольку такие затраты не под силу многим организациям, особое значение приобретают вопросы типизации, стандартизации и тиражирования в области САПР, отраженные в следующих государственных стандартных и руководящих документах по САПР:

- ГОСТ 23501.0—79 «Системы автоматизированного проектирования. Основные положения»;
- ГОСТ 23501.1—79 «Системы автоматизированного проектирования. Стадии создания»;
- ГОСТ 23501.2—79 «Системы автоматизированного проектирования. Разработка, согласование и утверждение технического задания»;
- ГОСТ 23501.3—79 «Системы автоматизированного проектирования. Разработка, согласование и утверждение технического предложения»;
- ГОСТ 23501.4—79 «Системы автоматизированного проектирования. Общие требования к программному обеспечению»;
- ГОСТ 23501.5—80 «Системы автоматизированного проектирования. Эскизный проект»;
- ГОСТ 23501.6—80 «Системы автоматизированного проектирования. Технический проект»;
- ГОСТ 23501.7—80 «Системы автоматизированного проектирования. Предпроектные исследования»;
- ГОСТ 23501.8—80 «Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначение»;
- ГОСТ 23501.9—80 «Системы автоматизированного проектирования. Общие требования к автоматизированным банкам данных»;
- ГОСТ 23501.10—81 «Системы автоматизированного проектирования. Виды и комплектность документов»;
- ГОСТ 23501.11—81 «Системы автоматизированного проектирования. Рабочий проект»;
- ГОСТ 23501.12—81 «Системы автоматизированного проектирования. Организация создания и развития»;

ризуется двумя показателями: количеством и длительностью отклонений.

Анализ документов показывает, что основной проблемой для КБТО является своевременность проектирования комплексов оснастки,

Таблица 22. Данные о длительности и количестве отклонений по КБТО

Наименование месяца	Длительность и количество отклонений																			
	Длительность	4	5	6	9	11	12	13	14	15	16	19	21	22	58					
Январь	Длительность	4	5	6	9	11	12	13	14	15	16	19	21	22	58					
	Количество	1	2	1	3	1	4	9	2	1	1	1	5	1	1					
Февраль	Длительность	1	2	3	8	9	10	11	12	13	15	18	20	21	24	27	83			
	Количество	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	5	1	2	2	2	2			
Март	Длительность	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	16	17	18	20	21	30	54		
	Количество	1	6	2	5	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	3	2		
Апрель	Длительность	1	3	6	8	8	9	13	14	15	12	30	42							
	Количество	2	2	1	2	3	3	1	1	2	1	1	1							
Май	Длительность	1	2	4	6	7	5	9	10	13	14	18	19	26	28	29	33	39	42	60
	Количество	1	1	3	1	1	2	1	7	2	2	2	12	1	2	1	2	1	1	1
Июнь	Длительность	3	4	12	17	18	39	44	47											
	Количество	4	1	1	1	1	4	2	1											
Июль	Длительность	1	2	4	5	6	8	15												
	Количество	1	1	1	1	4	1	1												
Август	Длительность	2	3	6	10	11	14	25												
	Количество	3	2	3	1	2	1	2												
Сентябрь	Длительность	1	2	3	4	5	7	8	10	11	16	20	23	40	17					
	Количество	1	1	2	3	3	3	2	2	3	1	1	1	1	1					
Октябрь	Длительность	1	2	3	4	5	6	7	8	9	17	27	48	11	12	21	29			
	Количество	2	7	2	4	2	2	1	1	2	3	1	1	1	2	1	1			
Ноябрь	Длительность	1	3	4	6	7	8	10	11	12	13	15	16	21	24	29				
	Количество	3	2	4	3	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1				
Декабрь	Длительность	1	2	3	4	5	8	9	10	11	18	35								
	Количество	2	4	1	2	1	2	2	1	2	1	1								
Январь	Длительность	1	3	4	5	7	9	10	15											
	Количество	10	3	1	1	2	1	1	1											
Февраль	Длительность	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12								
	Количество	7	6	2	2	2	3	1	2	1	1	1								
Март	Длительность	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	16	20	23				
	Количество	9	5	5	2	6	2	4	1	2	3	1	7	1	1	2				
Апрель	Длительность	11	2	4	5	8	1	3	14	7	6	20	53							
	Количество	1	2	1	2	5	3	1	1	1	3	1	1							
Май	Длительность	1	24	2	20	6	3	9	10	16	21									
	Количество	7	1	7	1	1	6	1	1	1	1									
Июнь	Длительность	9	1	2	4	14	15	7	8	6	5	3	13							
	Количество	2	4	2	4	1	2	4	3	3	3	1	1							
Июль	Длительность	3	1	11	8	5														
	Количество	3	8	2	5	1														
Август	Длительность	5	13	8	1	6	10	15	9	3										
	Количество	3	2	1	11	1	1	1	2	2										

поскольку качество спроектированных комплексов удовлетворительное. Поэтому качество функционирования КБТО будем оценивать только по своевременности проектирования комплексов оснастки.

В табл. 22 приведены длительности d_{ij} и количества отклонений q_{ij} в течение 20-ти месяцев функционирования КБТО. Длительность отклонений измеряется в днях, при этом количество отклонений Q_i за

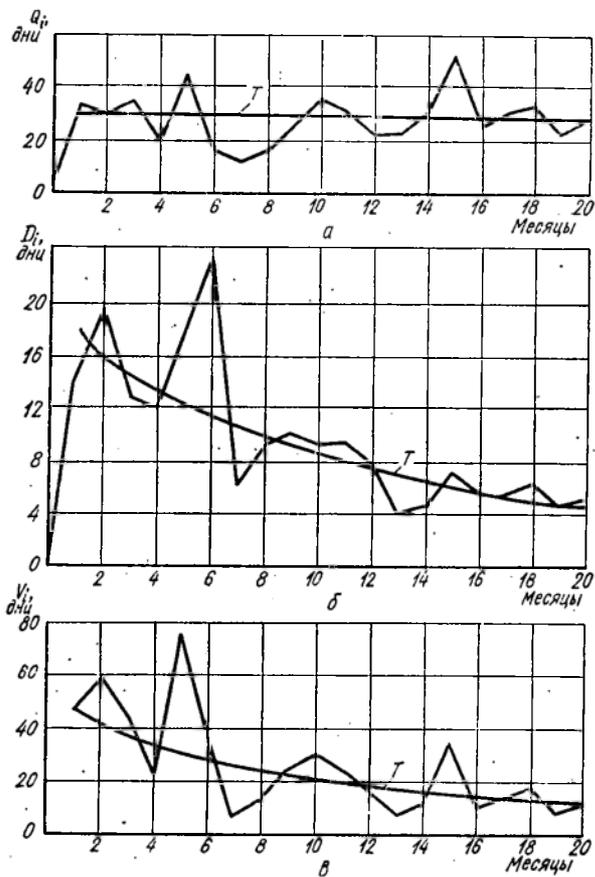


Рис. 75. Графики изменения количества (а), средней длительности (б) и объема (в) отклонений и их аппроксимации в виде трендов.

тренда в течение периода обследования (рис. 75, б), построенный на основе (11.5). Объем отклонений также имеет тенденцию к уменьшению (рис. 75, в).

Анализ качества функционирования КБТО показывает, что необходимо предпринять меры для уменьшения количества отклонений фактических сроков окончания проектирования комплексов оснастки от плановых, а также для уменьшения трудозатрат, вызванных этими отклонениями.

Для определения внешних факторов, влияющих на качество функционирования КБТО, исследуется система внешних связей плановой группы ОГТ, бюро инструментального хозяйства, ведущих технологов ОГТ, конструкторского бюро КБТО, производства и архива объединения. Эта система строится на основе анализа материалов обследования, положений о КБТО и других службах ОГТ, а также на основе интервью с руководителями ОГТ, КБТО и служб ОГТ. Диагностика системы внешних связей КБТО заключается в оценке отклонений

лишь одно непосредственно касается КБТО. Это мероприятие может рассматриваться как проблема повышения производительности труда КБТО.

Для определения факторов, влияющих на качество функционирования КБТО, уточняется система проектирования, сложившаяся в организации, в которой процесс проектирования комплексов оснастки выполняется на трех уровнях иерархии: начальника КБТО, руководителя группы и конструктора. Проектные решения генерируются на уровне конструктора, а оцениваются на уровне руководителя группы. В редких случаях в оценке проектных решений принимает участие начальник КБТО.

Анализ системы проектирования, сложившейся в КБТО, и данных о ее функционировании, полученных на основе изучения проектной, плановой и отчетной документации, а также интервью с руководителями организации и конструкторами, позволили определить присущие системе недостатки, причины их возникновения, последствия и характер влияния на качество функционирования КБТО. Оказалось, что основными факторами, влияющими на качество функционирования КБТО, являются: несовершенство системы информационного обеспечения проектирования и длительный период проектирования, обусловленный несовершенством средств и методов проектирования. В качестве основных задач по устранению недостатков выбираются: автоматизация поиска информации о проектах-аналогах по типу оснастки и чертежу детали; автоматизация проектирования тех типов оснастки, по которым имеется наибольшее количество срывов плановых сроков окончания проектирования.

Первую задачу можно переформулировать следующим образом: создать на предприятии автоматизированный банк данных о проектах-аналогах технологической оснастки. Для детализации второй задачи необходимо: установить типы оснастки, по которым наиболее часто наблюдаются отклонения от установленных сроков проектирования; из них выбрать те типы оснастки, которые можно автоматизировать на основе использования математических методов и средств вычислительной техники.

Типы оснастки, по которым наиболее часто наблюдаются срывы, устанавливаются на основе документации по тематическим группам КБТО. В результате выбираются типы оснастки, проектирование которых возможно автоматизировать (табл. 24).

Оценка возможности создания САПР в КБТО выполняется с помощью обработки экспертных данных (формы 17 и 18 методики сбора данных, ГОСТ 23501.7—80). Обработка выполняется в соответствии с разработанными методиками.

Возможность создания САПР в КБТО достаточно велика. На предприятии существует вычислительный центр, оснащенный двумя ЭВМ ЕС-1035 со штатным комплектом периферийного оборудования, имеются высококвалифицированные программисты и отдел автоматизации задач управления. Технический комплекс АСУ предприятия можно использовать также и для решения задач КБТО. Здесь необходимо установить терминальную систему ЕС-7920 и обеспечить средствами теледоступа к ресурсам вычислительного центра предприятия. Исходные

Таблица 25. Состав данных, сформированных для разработки ТЗ на создание САПР КБТО

Наименование раздела ТЗ в соответствии с ГОСТ 23501.2—79	Сформированные данные	Характер использования данных при разработке ТЗ	
		непосредственно	в качестве основы для формирования требований
Наименование и область применения	1.1. Созданию подлежит САПР КБТО ОГТ предприятия. 1.2. САПР распространяется на следующие группы КБТО: приспособлений, пресс-форм. 1.3. САПР подобного класса разрабатывается впервые. Аналоги известны	+	
Основание для создания	2.1. Работы по созданию САПР выполняются на основании решения Министерства № от _____ и приказа по предприятию № _____ от _____ 2.2. Финансирование работ по созданию САПР в размере 0,3 млн. руб. осуществляется централизованно	+	
Характеристика объектов проектирования	3.1. КБТО специализируется на проектировании технологической оснастки для оснащения производства основных изделий. 3.2. Номенклатура объектов проектирования имеет устойчивый характер и определяется классификатором оснастки, включающим 3 класса, 6 подклассов, 40 групп и 367 типов технологической оснастки. 3.3. Объекты проектирования несложные и содержат в основном от 10 до 100 составных частей. 3.4. Всего за год проектируется до 2000 единиц оснастки, в том числе: приспособлений — 600 инструмента — 1200 пресс-форм — 200 3.5. Объем проектных работ в КБТО составляет в год 200 млн. руб. 3.6. Среднегодовая численность конструкторов-проектировщиков — 24 человека. 3.7. Специализация проектных групп КБТО осуществлена по объектному признаку, в частности, по классам техоснастки: группа инструмента проектирует инструмент, включая режущий, мерительный, вспомогательный — один класс оснастки;	+	

Наименование раздела ТЗ в соответствии с ГОСТ 23501.2-79	Сформированные данные	Характер использования данных при разработке ТЗ	
		непосредственно	в качестве основы для формирования требований
Характеристика процесса проектирования	5.5. При разработке технологической оснастки используются следующие источники информации: альбом унифицированной оснастки — по 7 альбомов в каждой группе, всего 1300 проектов-аналогов (10 тыс. листов формата 11); информационный фонд архива ОГТ — 45 000 единиц; нормали — комплект; ГОСТы ЕСКД — комплект.	+	+
	5.6. Перечень процессов, подлежащих автоматизации, включает следующие процессы: поиска проектов-аналогов по обозначению типа оснастки и чертежу детали основного изделия — 2000 поисков в год, затраты времени до 2,25 нормо-ч; проектирования кондукторов к сверлильным станкам — 167 ед. в год, трудоемкость 2775 нормо-ч; проектирования кондукторов к расточным станкам — 167 ед. в год, трудоемкость 2775 нормо-ч; проектирования приспособлений к токарным станкам — 156 ед. в год, трудоемкость 1865 нормо-ч; проектирования фрезерного инструмента — 22 ед. в год, трудоемкость 138 нормо-ч; проектирования резцов — 79 ед., трудоемкость 92 нормо-ч; проектирования зуборезного и протяжного инструмента — 9 ед., трудоемкость 122 нормо-ч; проектирования калибров — 73 ед., трудоемкость 555 нормо-ч; проектирования штампов разделительных — 6 ед., трудоемкость 360 нормо-ч.	+	+
	5.7. Автоматизируемые процессы составят объем проектирования в КБТО: по трудоемкости — около 34 %; по номенклатуре — около 18 %	+	
Требования к САПР КБТО	6.1. Создаваемая САПР КБТО является системой низкоавтоматизированного проектирования с количеством автоматизированных процессов ниже 25 %.	+	+

Наименование раздела ТЗ в соответствии с ГОСТ 23501.2—79	Сформированные данные	Характер использования данных при разработке ТЗ	
		непосредственно	в качестве основы для формирования требований
	8.3. Ввод в действие САПР КБТО целесообразно осуществить в две очереди. В первую включить подсистемы: проектирования приспособлений; проектирование инструмента; проектирование штампов. Во вторую — ввод в действие автоматизированного банка данных КБТО	+	
Порядок испытаний и ввода в действие	<p>9.1. Испытание и отладку комплекса средств автоматизации проектирования и компонентов САПР КБТО выполнить в соответствии с ГОСТ 23501.14—81.</p> <p>9.2. Ввод в действие САПР КБТО выполнить в соответствии с ГОСТ 23501.15—81.</p> <p>9.3. Терминальные устройства, в частности, систему ЕС—7920 целесообразно приобрести и смонтировать на стадии разработки технического предложения или эскизного проекта.</p> <p>9.4. Программы-аналоги по проектированию приспособлений, инструмента и штампов после доработки и адаптации к условиям КБТО необходимо подвергнуть отдельным испытаниям с оформлением индивидуальных актов сдачи.</p> <p>9.5. Целесообразно направить на подготовку для приобретения необходимых навыков работы в условиях функционирования САПР КБТО руководителей групп конструкторов I и II категории КБТО — всего 18 человек.</p> <p>9.6. В качестве объектов, которые САПР КБТО должна спроектировать при опытном функционировании, целесообразно выбрать: кондуктор накладной типа 6301; штамп вырубной типа 6200; фрезу зуборезную типа 6170; протяжку типа 6175</p>	<p>+</p> <p>+</p> <p>+</p> <p>+</p> <p>+</p> <p>+</p>	
Источники разработки	10.1. Источниками разработки могут служить опыт других организаций и собственный опыт, накопленный при разработке АСУ предприятия.	+	

Общее количество оснастки, спроектированное в КБТО за год автоматизированным и неавтоматизированным способом, равно

$$2716 + 1244 = 3960 \text{ ед.}$$

Для проектирования этого количества оснастки будет затрачено:

$$3960 \cdot 18,5 = 73\,260 \text{ нормо-ч;}$$

на поиск информации

$$\frac{3960}{2000} \cdot 4500 = 8910 \text{ нормо-ч;}$$

на работу с извещениями

$$\frac{3960}{2000} \cdot 4500 = 8910 \text{ нормо-ч.}$$

Стоимость всех этих видов работ составит:
проектирования оснастки

$$73\,260 \cdot 2 = 146\,520 \text{ руб.};$$

поиска информации

$$8910 \cdot 2 = 17\,820 \text{ руб.};$$

работы с извещениями

$$8910 \cdot 2 = 17\,820 \text{ руб.}$$

В результате создания САПР в КБТО стоимость:
проектирования

$$(37\,143 - 37\,143 \cdot 0,1 - 37\,143 \cdot 0,011) + 7178 \cdot 2 = 80\,396 \text{ руб.};$$

поиска информации

$$(37\,143 \cdot 0,011 + 2176 \cdot 0,25) \cdot 2 = 2175,2 \text{ руб.};$$

работы по извещениям

$$37\,143 \cdot 0,1 \cdot 2 = 7428,6 \text{ руб.}$$

Экономия по видам работ:
проектированию

$$146\,520 - 80\,396 = 66\,124 \text{ руб.};$$

поиску информации

$$17\,820 - 2175,2 = 15644,8 \text{ руб.};$$

работам с извещениями

$$17\,820 - 7428,6 = 10391,4 \text{ руб.}$$

Суммарная годовая экономия от внедрения САПР составит:

$$66\,124 + 15644,8 + 10391,4 = 92160,2 \text{ руб.}$$

Максимально возможные затраты на создание САПР, исходя из установленного нормативного срока окупаемости капитальных

пакеты прикладных программ; структура информационного обмена системы технического проектирования; языки представления данных; рекомендации по организации подразделений по эксплуатации САПР и комплексов АРМ на предприятиях отрасли; типовое положение о головном предприятии по автоматизации проектирования.

Внедрение САПР РАПИРА предполагает проведение следующих работ: сдачу предприятиями-разработчиками разработанных комплексов программ на магнитных носителях и программной документации в отраслевой фонд алгоритмов и программ СНПО АЛГОРИТМ; тиражирование программ и документации организацией СНПО АЛГОРИТМ; подачу заявок предприятиями, внедряющими САПР РАПИРА, в «Союзэвмкомплекс» на поставку и сопровождение прикладных программ и подготовку специалистов для эксплуатации САПР РАПИРА и АРМ; переподготовку специалистов САПР через «Союзэвмкомплекс» и отраслевой Институт повышения квалификации инженерно-технических работников; подготовку предприятий к внедрению ППП на имеющихся в их распоряжении вычислительных средствах, а также организацию службы САПР согласно «Рекомендациям по организации подразделений по эксплуатации САПР и комплексов АРМ».

Внедрение САПР РАПИРА и АРМ позволило отработать алгоритмическую базу автоматического и автоматизированного проектирования на ЭВМ большой мощности; исследовать и апробировать методы создания многомашинных комплексов; создать новые технологические методы изготовления аппаратуры, выпустить руководящие документы, организовать тиражирование САПР, серийно выпускать АРМ.

В процессе создания САПР определены номенклатура и формы выдаваемой технической документации, выработаны унифицированные решения, применяемые при проектировании аппаратуры; разработаны и внедрены базовые несущие конструкции; блоки, ячейки, платы, внедрена базовая технология изготовления печатных плат методом металлизации сквозных отверстий, унифицированы элементы печатного монтажа, методы контроля плат и ячеек.

При разработке САПР созданы автоматические установки контроля плат и ячеек с универсальными контактными устройствами.

В настоящее время осуществляется развитие системы, утверждена программа создания САПР ПРАМ, разрабатываются АРМ второго поколения. Целью работы является:

- разработка автоматизированных рабочих мест второго поколения (АРМ 2), обеспечивающих одновременную независимую работу нескольких пользователей и связь с центральным процессором;
- совершенствование пакетов прикладных программ РАПИРА на основе их эксплуатации на предприятиях-разработчиках;
- развитие программных комплексов САПР РАПИРА на базе использования ЭВМ ЕС-1060 (1065, 1035) и АРМ 2;
- разработка и внедрение программных средств с использованием АРМ 2 в качестве терминального средства САПР для подготовки, редактирования и отображения информации;
- разработка пакетов прикладных программ для функционального и технического проектирования изделий и узлов радиоаппаратуры, ранее не обеспеченных средствами автоматизации;

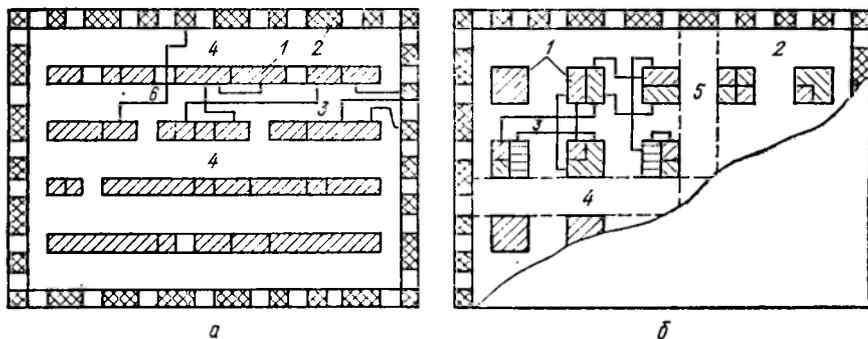


Рис. 77. Конструкции базовых кристаллов:
а — линейчатого; *б* — матричного.

нем фрагмент БИС объемом 5...15 транзисторов в день), то для проектирования микропроцессора сложностью 300 тыс. транзисторов потребуется 60 человеко-лет.

Проектирование СБИС по трудоемкости и сложности можно сравнивать с разработкой таких объектов, как ЭВМ и летательный аппарат. Общий подход к решению задач такого класса состоит в разбиении исходной задачи проектирования на подзадачи. Во-первых, выделяются этапы, на которых достигается лишь некоторое подмножество целей из всей исходной совокупности (например, на этапе разбиения схемы минимизируется число межблочных связей). Во-вторых, объект проектирования разделяется на фрагменты и проектирование каждого ведется самостоятельно. Реализация данного подхода к проектированию СБИС отражена в конструкции базового кристалла, представляющего собой заготовку для формирования заказной интегральной схемы.

Базовый кристалл изготавливается в виде прямоугольной полупроводниковой пластины площадью до (10×10) мм², на которой в заданных местах реализованы внешние контактные площадки, транзисторы, шины питания и другие унифицированные элементы конструкции. Проектирование топологии СБИС заключается в разработке двух слоев коммутации, позволяющих соединить транзисторы для образования логических элементов и реализовать связи между элементами в соответствии с описанием проектируемой схемы.

Для ускорения процесса проектирования и обеспечения унификации конструкции кристалла разрабатывается набор базовых логических элементов для определенного класса схем и определенной технологии, с помощью которого может быть реализована произвольная логическая схема. Топология логических элементов разрабатывается заранее и хранится в специальной библиотеке, причем каждый элемент имеет стандартные размеры.

В настоящее время используются два типа базовых кристаллов: линейчатой (рис. 77, *а*) и матричной (рис. 77, *б*) структур. В структуре этих кристаллов можно выделить две группы элементов: логические *1* и периферийные *2*. На кристалле линейчатого типа логические элементы, имея постоянный размер по вертикали, располагаются

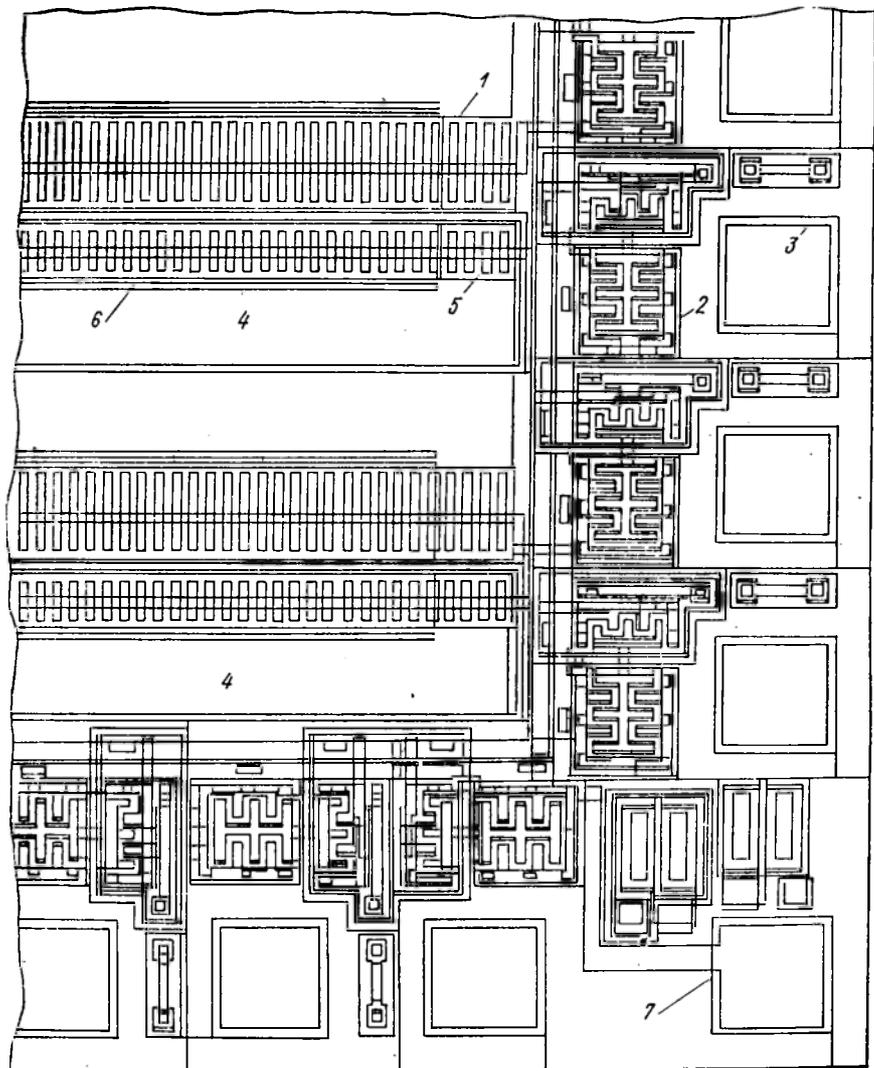


Рис. 79. Топология стандартной части базового кристалла.

ческой схемы; описание новых типов логических элементов (при отсутствии последних в библиотеке); описание новых типов базовых кристаллов (при необходимости); директивы, определяющие порядок выполнения частных заданий; параметры используемых алгоритмов, позволяющие настроить систему на задачу и получить улучшенные варианты проекта СВИС.

При вводе исходных данных имеется возможность осуществить мультипликацию подсхем (что исключает необходимость кодирования идентичных структур), их модификацию, а также переименование. В системе АРТИС используются библиотеки базовых кристаллов и

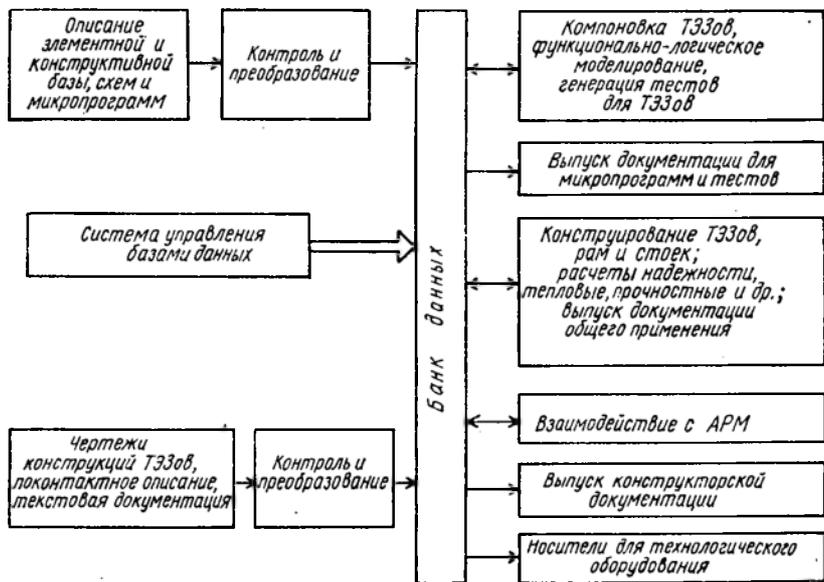


Рис. 81. Структурная схема САПР ЭВМ.

слоиных переходов в каждом канале и в области линейки, не занятой элементами.

В системе АРТИС для реализации цепи (или ее части) в канале используются трассы простейшей конфигурации. Такая трасса имеет одну горизонтальную (ствол) и вертикальные составляющие (ветви), количество которых равно числу контактов (рис. 80, а).

Построение трасс по итерационной схеме выполняется на непрерывном рабочем поле, что позволяет сократить время счета и требуемую оперативную память. При построении очередной трассы определяется Y — координата ее ствола и слой для ее проведения. Одна из основных особенностей данного подхода состоит в том, что он позволяет реализовать отрезки различных трасс, проекции которых совпадают. Примеры таких совмещенных участков трасс показаны на рис. 80, б, где отрезки одного слоя изображены непрерывной линией, а другого — штриховой.

Система АРТИС реализована на алгоритмическом языке ФОРТРАН, обеспечивает возможность проектирования СБИС, содержащих до 10^6 транзисторов, при использовании ЕС ЭВМ с оперативной памятью не менее 512 Кбайт.

САПР ЭВМ. Комплексная система автоматизации проектирования средств вычислительной техники [35], начинающаяся от функционального описания цифрового устройства на языке высокого уровня, обеспечивает переход к аппаратурной реализации логики устройства, позволяет осуществлять конструктивную реализацию (ТЭЗы, разъемы, панели, рамы, соединения), выпускать необходимую документацию и машинные носители для изготовления устройства на производстве.

Исходными данными для такой системы являются (рис. 81): описание элементной базы; описание конструктивной базы; описание функ-

Основными задачами подсистемы автоматизации конструкторского проектирования являются задачи автоматизированного конструирования типовых блоков и узлов вычислительных устройств, таких как ТЭЗ (20...70 интегральных схем), блок ТЭЗов (20...40 ТЭЗов), рама (до 6 блоков ТЭЗов), стойка (3 рамы). Процесс проектирования начинается от исходных данных, подготовленных подсистемой логического проектирования, и заканчивается выдачей комплекта конструкторской документации, пригодной для передачи непосредственно в производство и в архив, а также машинных носителей на ПЛ и МЛ для управления производственными автоматами с ЧПУ.

Для всех типов модулей конструктивной иерархии решаются такие задачи: распределение элементов схемы по конструктивно-функциональным модулям (компоновка модулей); размещение модулей низшего уровня в модули высшего уровня; трассировка межсоединений на всех уровнях; получение конструкторской документации и носителей информации, предназначенных для изготовления и контроля узлов и блоков изделия.

При создании программных средств подсистемы конструирования учитывались требования крупносерийного производства (надежность, высокие экономические показатели изделия), возможность настройки на различные технологические методы реализации межсоединений (печатный, проводной, тонкопроводной), использование средств интерактивного взаимодействия проектировщика с ЭВМ в процессе проектирования.

Созданные программные средства позволяют проектировать ТЭЗы с печатным и тонкопроводным монтажом, блоки ТЭЗов с печатным и тонкопроводным монтажом, блоки ТЭЗов с проводным монтажом при различных способах исполнения, рамы, стойки с проводным монтажом при различных способах исполнения; выводить текстовую документацию на узлы и блоки ЭВМ на АЦПУ, выводить управляющие носители информации для технологического оборудования по изготовлению и контролю узлов и блоков, генерировать тесты на спроектированные узлы и блоки.

Часть сложных, нестандартных печатных плат проектируется вручную в диалоговом режиме, причем графическая информация с эскизов чертежей вводится в ЭВМ с помощью устройства полуавтоматического кодирования чертежей «Минск-2004».

При изготовлении фотошаблонов печатных плат, количество которых исчисляется тысячами штук, используются фотокоординатографы с управляемым световым пучком типа «Минск-2000», «Минск-2004» и «Минск-2005», обеспечивающие точность изготовления фотошаблонов в сотые доли миллиметра. Массовый и трудоемкий процесс сверления отверстий в печатных платах осуществляется специальным автоматом «Минск-2003».

Контроль изготовления печатных плат выполняется визуально устройством «Минск-2007» и электрической проверкой соединений в изготовленных платах с помощью автомата «Минск-2101».

На смену трудоемким многослойным печатным платам приходят коммутационные платы с монтажом тонким изолированным проводом, укладываемым в слабо полимеризованный адгезив или закрепленным

в отверстиях (стежковый монтаж). Изготовление таких плат выполняется устройством «Минск-2008».

Разработка САПР ЭВМ ведется несколькими предприятиями под общим руководством НИЦЭВТ (Научно-исследовательского центра электронной вычислительной техники). Внедрение такой САПР позволяет в 2...3 раза сократить цикл проектирования и изготовления сложного радиэлектронного оборудования типа ЭВМ.

Остановимся на примере функционально-логического моделирования, применяемого в настоящее время при разработке цифровой аппаратуры (программы МОДИС, КОМОЛ, ЛОГИКА и др.). Рассмотрим счетчик импульсов (рис. 82), в котором используются следующие стандартные элементы: y_1, \dots, y_6, y_9 — 133ЛА4; y_7, y_{11} — 765 ИЕ11; y_8 — 765 ЛН2; y_{10} — 765 ИР2. На вход счетчика (точка 3) подается последовательность импульсов положительной полярности, а выходные сигналы снимаются в точках 27, 28, 29, 30 и 31. На рис. 83 представлены смоделированные временные диаграммы работы счетчика, по которым осуществляется анализ работы схемы без ее натурального макетирования (например, определяются времена задержек распространения в заданных узлах схемы, временные параметры выходных сигналов).

Появление СБИС и микропроцессоров привело к резкому снижению стоимости и уменьшению размеров вычислительных устройств, что превратило ЭВМ из средств расчетов в составную часть различного рода приборов и устройств, придающую им качественно новые, не достигаемые ранее свойства и возможности. Использование микропроцессоров и микро-ЭВМ имеет ряд особенностей, прежде всего в их программировании, поскольку микро-ЭВМ часто являются встроенными устройствами и не имеют собственных средств ввода/вывода и отладки программ. Поэтому программы для микропроцессорных систем отлаживаются на другой ЭВМ: либо универсальной (кроссовая система), либо специально предназначенной для разработки программного обеспечения микропроцессорной техники (резидентная система). Специальные вычислительные комплексы для разработки микро-ЭВМ и микропроцессорных систем позволяют разрабатывать параллельно аппаратную и программную части проектируемой системы, что значительно сокращает время на разработку. Примером такого комплекса является АРМ2—0,5, предназначенный для автоматизированного проектирования программируемой цифровой аппаратуры и, прежде всего, встроенных микропроцессорных устройств (МПУ). Комплекс АРМ2—05 построен на базе мини-ЭВМ СМ-4 с подключением к ней до четырех специализированных рабочих мест, снабженных интеллектуальным терминалом для подготовки программ. При этом обеспечивается работа пользователя за каждым рабочим местом в двух режимах:

- *режим 1* — разработка прикладных программ, специализирующих комплекс для проектирования конкретных МПУ (например, на базе микропроцессора К580, микропроцессорных секций К589 и К1804);
- *режим 2* — программирование и (или) микропрограммирование для МПУ, включая описание, вход, накопление и коррекцию программ; трансляцию программ; отладку программ методом моделирования или

ботать алгоритмы инженерного расчета основных характеристик ТО, не прибегающие к его детальной разработке.

Структурные схемы подсистемы ФО и программного обеспечения комплекса ФО ТО приведены на рис. 84 и 85.

Разработанная подсистема ФО ТО представляет собой мощный программный комплекс синтеза ТО, базирующийся на прикладных программах генерирования компоновочных схем и вычисления масс-инерционных, энергетических и других основных характеристик проектируемого ТО с организацией диалога.

Генерация компоновочных схем ТО осуществляется по 34 признакам, мощность рассматриваемого множества опорных альтернативных вариантов $|X_0| > 3000$. При этом внутри каждого опорного варианта компоновочной схемы может быть сгенерировано практически бесконечное множество конкретных вариантов компоновочных схем ТО, определяемое пределами и шагом вариации ОКП.

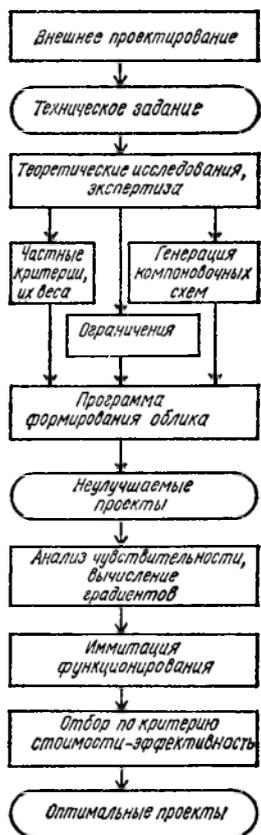


Рис. 84. Структура подсистемы формирования облика.

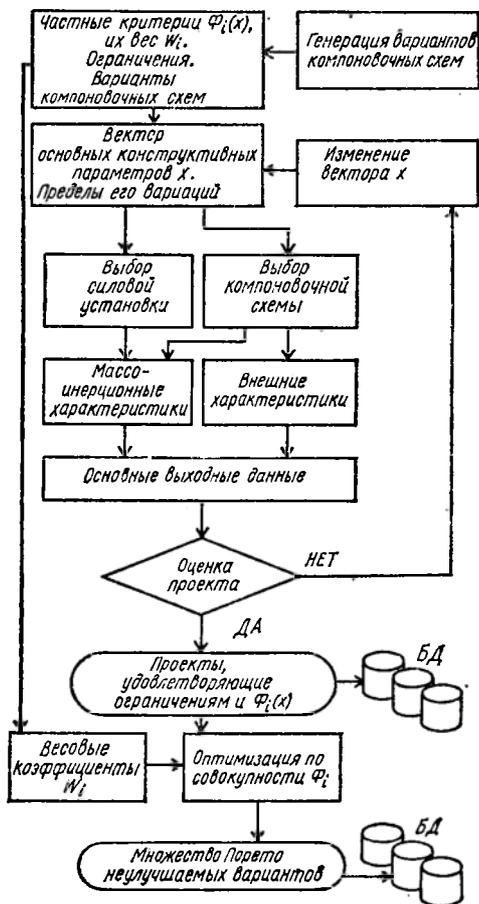


Рис. 85. Структурная схема программного комплекса формирования облика технического объекта.

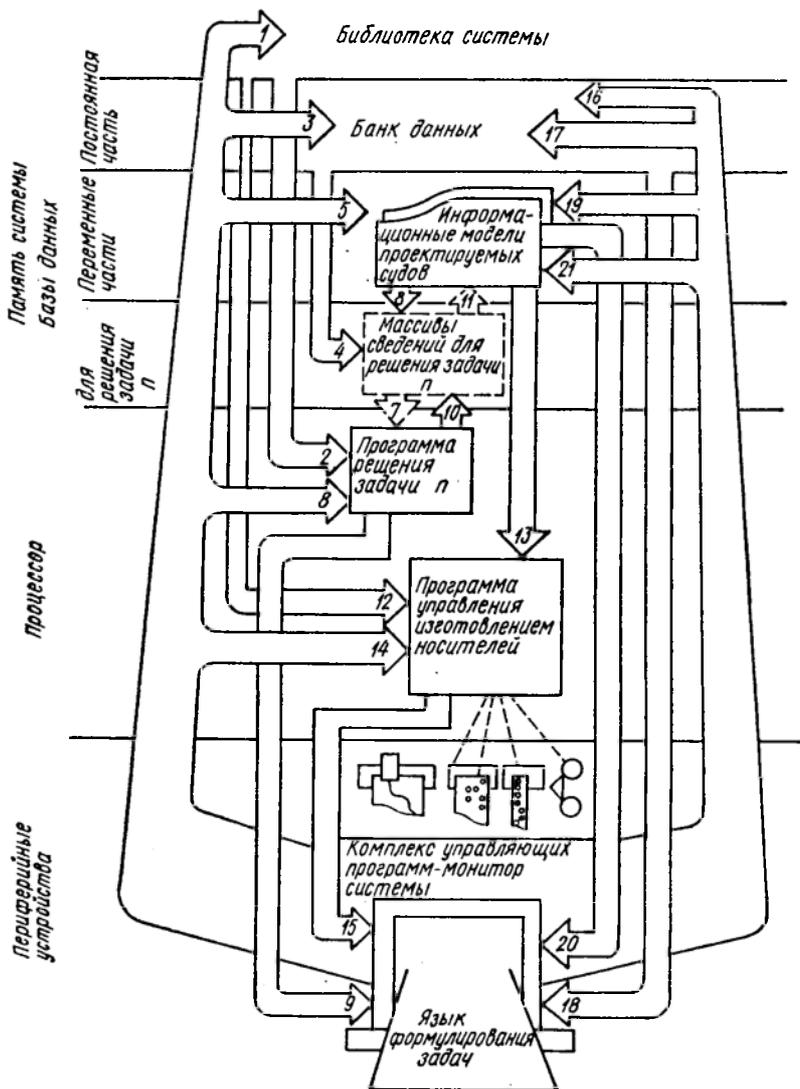


Рис. 86. Структурная схема САИР ПРОЕКТ-1.

нительной программы для решения сформулированной задачи; 3, 5 — выборка из банка данных и информационной модели массивов сведений, нужных для решения поставленной задачи; 4, 6 — передача массивов сведений для решения этой задачи; 7 — подача исходных данных из базы на вход программы; 8 — ввод недостающих данных пользователем и запрос результатов решения задачи для их неформализованной оценки; 9 — выдача результата пользователю; 10 — передача результата решения задачи в базу данных; 11 — возврат массивов сведений, пополненных результатами решения задачи, в информационную модель; 12 — компоновка программы для управления процессом из-

чивающая отыскание оптимального механизма со многими степенями свободы независимо от его функций; РАСКРОЙ, ОБРАБОТКА, ЧПУ для автоматического выбора параметров раскроя листов и прутковых заготовок, проектирования технологических переходов при механической обработке, литье и штамповке, составления управляющих программ для станков с ЧПУ.

Данные подсистемы используются на различных иерархических уровнях декомпозиции проектируемых объектов: машин в целом, приводов машин, деталей, механизмов, конструкций.

Межотраслевая САПР. Активно ведутся работы по созданию межотраслевой САПР общемашиностроительного применения. В частности, для нее разработаны пакеты прикладных программ проектирования [69]: деталей и сборочных единиц; зубчатых передач; технологических процессов механообработки; сложнорежущего инструмента; приспособлений; штампов.

Эти программные комплексы прошли опытно-промышленную проверку на многих предприятиях страны. Примером может служить разработанный ИТК АН БССР для Минского производственного объединения "Горизонт" программный комплекс, обеспечивающий автоматизированное проектирование: штампов разделительных последовательного действия; штампов разделительных совмещенного действия; сверлильных приспособлений; технологию изготовления деталей сверлильных приспособлений.

Автоматизация позволила сократить сроки проектирования в 2...3 раза, не увеличивая количество проектировщиков при росте объемов проектирования почти в два раза. Объем автоматизированного проектирования составляет около 500 проектов в год по каждому виду объектов.

В Минском производственном объединении по выпуску автоматических линий с помощью средств САПР проектируются:

маршрутные технологические процессы изготовления зубчатых колес; операционные технологические процессы для деталей типа втулки; технологические процессы на детали типа валы; технологические процессы для корпусных деталей шпиндельных коробок.

При этом время проектирования сокращено в 3...5 раз. Объем проектирования составляет 2...3 тысячи проектов по каждому виду объектов.

Экспериментальная диалоговая система автоматизированного конструирования машиностроительных объектов, построенная в ИТК АН БССР на базе цветного дисплея ГТ-80 и мини-ЭВМ, состоит из: банка семиотических моделей геометрических объектов; программных средств построения семиотических моделей объектов (в том числе средств кинематического задания объектов); программных средств, позволяющих выводить информацию о структуре модели и значениях координат характеристик точек и векторов; программ: ввода значений координат характеристик точек и векторов моделей и их редактирования; выполняющих перенос, поворот и масштабирование геометрических объектов в пространстве; формирующих плоские изображения трехмерных геометрических объектов; формирующих плоские изображения выпуклых многогранников с удалением невидимых линий; построения плоских сечений трехмерных объектов; построения линии пересечения

Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлообрабатывающих станков (ЭНИМС).

САПР технических систем. Неотъемлемой частью робототехнических систем, автоматизированных машин, станков с числовым программным управлением, систем управления летательными аппаратами и др. являются приводы, в общем случае включающие элементы разной физической природы: электронную систему управления, гидравлические и электрические исполнительные двигатели, механические передачи, чувствительные элементы, усилители и т. д.

Наиболее трудоемким этапом проектирования таких систем, в дальнейшем называемых техническими, является структурный (схемотехнический), на котором необходимо определить значения параметров элементов, показатели качества, провести сравнение возможных вариантов, выполнить оптимизацию по выбранному критерию.

Система автоматизированного проектирования технических систем создана в Киевском политехническом институте на базе пакета прикладных программ СПАРС (пп. 3.2, 7.2). Пакет позволяет производить анализ технических систем, которые могут быть представлены совокупностью компонентов со сосредоточенными параметрами и содержат элементы любой физической природы. С помощью СПАРС могут быть определены характеристики в установленных режимах, во временной и частотной областях, найдены символичные выражения передаточных функций, произведены параметрическая оптимизация и статистический анализ, оценена чувствительность к изменению заданного параметра схемы. СПАРС может быть поставлена на ЭВМ ЕС любой версии с минимальным объемом ОЗУ 128К.

Входной проблемно-ориентированный язык СПАРС (п. 3.2) разработан на основе предположения, что любая система может быть представлена в виде совокупности элементов, объединенных через полюсы. В качестве элементов могут выступать конструктивные или функциональные блоки систем, такие как усилители, корректирующие устройства, насосные установки, двигатели, а также компоненты более низкого уровня, выделяемые в технических системах на основе идентичности их компонентных уравнений относительно обобщенных переменных. С помощью таких элементов можно представить в виде схемы замещения любое физическое устройство, что эквивалентно графическому изображению его математической модели.

Возможность описания средствами входного языка, ориентированного на пользователя, произвольных схем замещения реальных устройств дает возможность выбирать в каждом конкретном случае модель элемента, наиболее подходящую по степени детализации и требуемой точности. Применение «встроенных» математических моделей элементов [10], как правило, не рационально, так как в широком диапазоне применений они часто оказываются или грубыми, или, наоборот, излишне точными, вызывая неоправданные затраты машинного времени и ухудшение сходимости алгоритмов решения уравнений.

Опыт эксплуатации пакета показал его высокую эффективность как на этапе проектирования, так и при экспериментальной доводке опытного образца. В последнем случае пакет позволяет моделировать широкий спектр возмущающих воздействий, которые трудно, а иногда и невозможно осуществить экспериментально. Например, влияние пульсации крутящего момента на выходном валу гидромотора, влияние зазоров в механических передачах, влияние отклонений параметров системы от номинальных значений и т. п. Пакет применялся при проектировании электрогидравлических приводов самолета и приводов подач металлорежущих станков.

Для автоматизированного проектирования исполнительных органов робототехнических систем разработана специальная САПР [7], основу которой составляют модели подсистем и устройств промышленного робота, к которым относятся:

- механическая модель исполнительного органа;
- модель упрощенного варианта электромеханического исполнительного органа;
- полная модель электромеханического исполнительного органа;
- модель датчиков информационной системы;
- модель верхнего уровня системы управления;
- модели и алгоритмы, реализующие методику проектирования исполнительных систем электромеханического органа.

Модели всех подсистем являются универсальными, они могут настраиваться на конкретную архитектуру робототехнической системы. В результате можно исследовать различные режимы работы исполнительной системы и изучить влияние на ее функционирование таких трудноподдающихся анализу факторов, как нелинейные упругости сочленений, люфты, сухое трение, дискретности датчиков и регуляторов и различных возмущений.

Оперативность использования всех возможностей САПР обеспечивается реализацией диалога конструктор — система на проблемно-ориентированном языке, в состав основных операторов которого входят:

- декларативные операторы, описывающие размерность исследуемой конструкции и ее компонент;
- операторы определения структур данных;
- операторы определения типа решаемой задачи;
- операторы, обрабатывающие решения;
- операторы, определяющие режим работы системы.

В рассматриваемую САПР входят три подсистемы: формирования программ на входном языке с последующим их запуском с экрана дисплея; проведения арифметических подсчетов; взаимодействия с банком данных.

Во многих областях техники успешно функционируют различные подсистемы САПР экспериментального или промышленного назначения. Выпускаемые серийно средства вычислительной техники позволяют уже в настоящее время строить программно-технические комплексы САПР для решения сложнейших научно-технических задач. В настоящем учебнике рассмотрены примеры использования САПР для проектирования радиоэлектронной и цифровой аппара-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрайтис Л. Б., Шейнаукас Р. И., Жилевичюс В. А.* Автоматизация проектирования ЭВМ.— М. : Сов. радио, 1978.— 266 с.
2. *Августян Д. А., Соколов В. С., Хан В. Х.* Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ.— М. : Энергия, 1976.— 208 с.
3. *Адамс Д., Роджерс Д.* Математические основы машинной графики.— М. : Машиностроение, 1980.— 240 с.
4. *Автоматизация* проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении / Под ред. О. И. Семенкова.— Минск : Вышэйшяя школа, 1976.— Т. 1. 351 с.; Т. 2. 330 с.
5. *Автоматизация* проектирования систем управления / Под общ. ред. В. А. Трапезникова.— М. : Финансы и статистика, 1981.— 206 с.
6. *Автоматизация* понковского конструирования / Под ред. А. И. Половинкина.— М. : Радио и связь, 1981.— 340 с.
7. *Автоматизация* проектирования и конструирования. II Всесоюзное совещание. Тезисы докладов. Часть I.— М. : Изд-во ИПУ, 1983.— с. 144—145.
8. *Алгоритмы* и программы расчета тепловых сетей / Под ред. В. А. Хасилева и А. П. Меренкова.— М. : Энергия, 1978.— 296 с.
9. *Алгоритмы* оптимизации проектных решений / Под ред. А. И. Половинкина.— М. : Энергия, 1976.— 184 с.
10. *Арайс Е. А., Дмитриев В. М.* Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ.— М. : Радио и связь, 1982.— 160 с.
11. *Баталов Б. В., Егоров Ю. Б., Русаков С. Г.* Основы математического моделирования больших интегральных схем на ЭВМ.— М. : Радио и связь, 1982.— 168 с.
12. *Батищев Д. И.* Поисквые методы оптимального проектирования.— М. : Сов. радио, 1975.— 216 с.
13. *Брановицкий В. И.* Диалог «человек — ЭВМ» и его роль в решении народнохозяйственных задач.— К. : Знание, 1982.— 25 с.
14. *Бункин Б. В.* Основные направления развития отраслевых САПР.— В кн.: Обмен опытом в радиопромышленности, 1981, № 2—3, с. 1—3.
15. *Вермишев Ю. Х.* Методы автоматизированного поиска решений при проектировании сложных технических систем.— М. : Радио и связь, 1982.— 152 с.
16. *Гавриш А. П., Евремов А. И.* Автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства.— К. : Техника, 1982.— 214 с.
17. *Гилей В.* Интерактивная машинная графика.— М. : Мир, 1981.— 384 с.
18. *Глушков В. М., Капитонова Ю. В., Летичевский А. А.* Автоматизация проектирования электронных вычислительных машин.— К. : Наук. думка, 1975.— 288 с.
19. *Горелик А. Г.* Автоматизация инженерно-графических работ с помощью ЭВМ.— М. : Высш. школа, 1980.— 208 с.
20. *Графические* средства автоматизации проектирования РЭА / Д. И. Томашевский, Г. Г. Масютин, А. А. Явич, В. В. Преснухин.— М. : Сов. радио, 1980.— 224 с.
21. *Гроп Д.* Методы идентификации систем.— М. : Мир, 1979.— 302 с.
22. *Дендобренко Б. Н., Малика А. С.* Автоматизация конструирования РЭА.— М. : Высш. школа, 1980.— 380 с.
23. *Дорин В. С.* САПР «Проект-1» — уроки разработки.— В кн.: II Всесоюзное координационное совещание по автоматизации проектирования в отраслях машиностроения. Минск : Изд-во ИТК АН БССР, 1981, с. 40—53.
24. *Единая* система ЭВМ / Под ред. А. М. Ларионова.— М. : Статистика, 1974.— 256 с.

53. *Петренко А. И., Тетельбаум А. Я.* Формальное конструирование электронно-вычислительной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1979.— 255 с.
54. *Петренко А. И., Тетельбаум А. Я., Забалуев Н. Н.* Топологические алгоритмы трассировки многослойных печатных плат.— М.: Радио и связь, 1983.— 150 с.
55. *Петренко А. И., Тимченко А. П., Чкалов В. В.* Пакет прикладных программ проектирования технических систем.— В сб. «Материалы Всесоюзного совещания. Проблемы развития АСУ».— Душанбе: Изд-во ДПИ, 1983, с. 98—109.
56. *Половинкин А. И., Дворянкин А. М.* Перспективы развития автоматизированных систем поискового конструирования.— В кн.: II Всесоюзное координационное совещание по автоматизации проектирования в отраслях машиностроения.— Минск: Изд-во ИТК АН БССР, 1981, с. 143—149.
57. *Прагт Т.* Языки программирования: разработки и реализации.— М.: Мир, 1979.— 574 с.
58. *Принципы формирования учебно-исследовательской САПР и основные результаты / Беляков И. Т., Кузнецов В. С., Падалко С. Н., Смирнов О. Л.*— В кн.: II Всесоюзное координационное совещание по автоматизации проектирования в отраслях машиностроения.— Минск: Изд-во ИТК АН БССР, 1981, с. 63—74.
59. *Принс М. Д.* Машинная графика и автоматизация проектирования.— М.: Сов. радио, 1975.— 260 с.
60. *Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства / Под ред. С. П. Минтсфанова.*— М.: Машиностроение, 1981.— 287 с.
61. *Ракович А. Г.* Применение вычислительной техники для автоматизации проектирования технологического оснащения.— М.: Машиностроение, 1977.— 120 с.
62. *Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / Под ред. Е. Ю. Малиновского.*— М.: Машиностроение, 1980.— 216 с.
63. *Роачев В. Л.* Геометрические приложения алгебры логики.— К.: Техніка, 1967.— 212 с.
64. *Самойлович О. С.* Разработка и внедрение 1-й очереди системы автоматизированного проектирования сложных технических объектов.— В кн.: II Всесоюзное координационное совещание по автоматизации проектирования в отраслях машиностроения.— Минск: Изд-во ИТК АН БССР, 1981, с. 29—39.
65. *Сеггерлинд Л.* Применение метода конечных элементов.— М.: Мир, 1979.— 388 с.
66. *Семенков О. И.* Введение в системы автоматизации проектирования.— Минск: Наука и техника, 1979.— 84 с.
67. *Семенков О. И., Васильев В. П.* Разработка и исследование математической модели поверхности на базе кубических сплайнов Шенберга.— Изв. АН БССР, сер. физ.-техн. наук, 1981, № 4, с. 90—97.
68. *Семенков О. И., Митяев И. С.* Диагностический анализ систем проектирования.— Минск: Наука и техника, 1975.— 136 с.
69. *Семенков О. И.* Некоторые итоги создания и задачи развития САПР общемашиностроительного применения.— В кн.: II Всесоюзное координационное совещание по автоматизации в отраслях машиностроения.— Минск: Изд-во ИТК АН БССР, 1981, с. 3—11.
70. *Сибиряков В. В., Ткач М. П., Тыныника А. Н.* Организация системы автоматизированного проектирования технологических процессов сборки человеко-машинных систем.— Воронеж: ВПИ, 1980, с. 137—143.
71. *Сигорский В. П., Петренко А. И.* Алгоритмы анализа электронных схем.— М.: Сов. радио, 1976.
72. *Синицын Б. И.* Автоматизация инструментальной подготовки производства с помощью ЭВМ.— М.: Машиностроение, 1973.— 242 с.
73. *Система математического обеспечения ЕС ЭВМ / Под ред. А. М. Ларионова.*— М.: Статистика, 1974.— 216 с.
74. *Скурихин В. И., Шифрин В. Б., Дубровский В. В.* Математическое моделирование.— К.: Техніка, 1983.— 360 с.
75. *Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Под ред. Д. Холла и Д. Уатта.*— М.: Мир, 1979.— 310 с.
76. *Стародетко Е. А.* Оптимизация формы и метрики локальных кривых и поверхностей.— В кн.: Теория и методы автоматизации проектирования.— Минск: ИТК АН БССР, 1980, вып. 4, с. 3—8.
77. *Стойа Ю. Г.* Размещение геометрических объектов.— К.: Наук. думка, 1975.— 239 с.

*Анатолий Иванович Петренко,
Олег Игнатьевич Семенков*

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Издание второе,
стереотипное

Редактор *Л. Н. Чмиль*
Переплет художника *В. А. Гурлева*
Художественный редактор *С. П. Духленко*
Технический редактор *И. И. Каткова*
Корректор *Н. В. Волкова*

Информ. бланк № 8841

Сдано в набор 29.03.83. Подп. в печать 07.02.84.
БФ 29686. Формат 60×90^{1/16}. Бумага типогр.
№ 2, Лит. гарн. Выс. печать. 18,5 печ. л.
18,5 кр.-отт. 21,27 уч.-изд. л. Тираж 11000 экз.
Изд. № 6380. Зак. № 3—1766. Цена 1 р.

Головное издательство издательского объеди-
нения «Вища школа», 252054, Киев-54, ул. Го-
голевская, 7

Отпечатано с матриц головного предприятия
РПО «Полиграфкнига», 252057, Киев-57,
ул. Довженко, 3 в Киевской книжной типо-
графии научной книги. 252004, Киев-4, ул. Ре-
пина, 4. Зак. 5-91.