

УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра Устройства
и системы радиосвязи

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО КУРСУ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И РАЗРАБОТКА
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Составитель: Д.Давронбеков

Ташкент 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Введение.....	3
Лекция 2. Основы автоматизированного проектирования конструкций и технологических процессов производства РЭС.....	8
Лекция 3. Основы автоматизированного проектирования конструкций и технологических процессов производства РЭС (окончание).....	13
Лекция 4. Системы автоматизированного проектирования (САПР) РЭС.....	17
Лекция 5. Технические средства САПР и их развитие.....	21
Лекция 6. Технические средства САПР и их развитие (продолжение).....	27
Лекция 7. Технические средства САПР и их развитие (окончание).....	32
Лекция 8. Методическое обеспечение САПР. Математический и лингвистический виды обеспечений.....	37
Лекция 9. Программное обеспечение САПР.....	43
Лекция 10. Информационное обеспечение САПР.....	48
Лекция 11. Информационное обеспечение САПР (окончание).....	52
Лекция 12. Методы автоматизированного проектирования конструкции и технологического процесса различного уровня иерархии.....	57
Лекция 13. Математические модели (ММ) на различных иерархических уровнях.....	61
Лекция 14. Математические модели объектов проектирования РЭС.....	65
Лекция 15. Разработка математических моделей при проектировании технологии.....	70
Лекция 16. Математические модели РЭС на метауровне.....	75
Лекция 17. Анализ, верификация и оптимизация проектных решений средствами САПР.....	80

Лекция 1. Введение

1.1. Информационные технологии — новая отрасль знаний

Человечество вступило в эру *информатизации*, и это проявляется в следующем:

- *информация* и информационные ресурсы на мировом рынке становятся важнейшим высокотехнологичным продуктом;
- фирмы, разрабатывающие *автоматизированные информационные технологии*, занимают ведущие позиции в мировой экономике, определяют дальнейшие направления развития конкурентоспособной продукции;
- без *информатизации* невозможно создание высоких *технологий*;
- *информационные технологии* (ИТ) открывают новые возможности в повышении эффективности производственных процессов, в сфере образования и быта, они выводят на новый уровень автоматизацию *технологических процессов* и управленческий труд, обеспечивают групповое ведение проектных работ, Интернет-технологии, CALS-технологии, дистанционное образование и т. д.;
- *информатизация* общества ведет к интернационализации производства.

Показателем научно-технической мощи страны становится внешнеторговый баланс профессиональных знаний, который реализуется рынком лицензий производственных процессов, "ноу-хау" и консультациями по применению наукоемких изделий. Например, США около 80% нововведений передают дочерним предприятиям в других странах. Пока эти предприятия осваивают предложенную *технологю*, в США готовят новые, т. е. реализуется опережающий технологический цикл высокоразвитой страны. К числу важнейших компонентов информационной мощи США относится глобальное лидерство в разработке, производстве и использовании *информационных технологий*.

Таким образом, эволюция мирового рынка дает преимущества стране, создающей у себя и передающей для производства другим странам наукоемкие изделия. Последние должны включать новые *технологии* и современные профессиональные знания. Идет торговля невидимым продуктом: знаниями, культурой; происходит навязывание высокоразвитыми странами стереотипа поведения. Именно поэтому в информационном обществе стратегическим ресурсом становятся *информация*, знание, творчество. Посредством дистанционного обучения, компьютерных игр, компьютерных видеофильмов и других ИТ компьютерные *технологии* оказывают огромное влияние на формирование условий и среды, в которых развиваются и процветают таланты. Предполагается, что социальное влияние информационной революции будет заключаться в синтезе западной и восточной мысли.

ИТ играют серьезную стратегическую роль в развитии каждой страны. Их значение быстро увеличивается за счет того, что ИТ:

- активизируют и повышают эффективность использования информационных ресурсов, обеспечивают экономию сырья, энергии, полезных ископаемых, материалов и оборудования, людских ресурсов, социального времени;
- реализуют наиболее важные и интеллектуальные функции социальных процессов;
- занимают центральное место в процессе *интеллектуализации* общества, в развитии системы образования, культуры, новых (экранных) форм искусства, популяризации шедевров мировой культуры и истории развития человечества;
- обеспечивают информационное взаимодействие людей, способствуют распространению массовой *информации*;
- быстро ассимилируются культурой общества, снимают многие социальные, бытовые и производственные проблемы, расширяют внутренние и международные экономические и культурные связи, влияют на миграцию населения по планете;— оптимизируют и автоматизируют информационные процессы в период становления информационного общества;

- играют ключевую роль в процессах получения, накопления, распространения новых знаний по трем направлениям.

Первое из них — информационное моделирование, позволяющее проводить "вычислительный эксперимент" даже в условиях, которые невозможны при натуральном эксперименте из-за опасности, сложности и дороговизны.

Второе направление основано на методах искусственного интеллекта, оно позволяет находить решения плохо формализуемых задач, задач с неполной *информацией* и нечеткими исходными данными по аналогии с созданием метапроцедур, используемых человеческим мозгом.

Третье направление базируется на методах когнитивной графики, т.е. совокупности приемов и методов образного представления условий задачи, которые позволяют сразу увидеть решение либо получить подсказку для его нахождения. Оно открывает возможности познания человеком самого себя, принципов функционирования своего сознания. Кроме того, в этом случае становится возможным реализовать методы информационного моделирования глобальных процессов, что обеспечивает возможность прогнозирования многих природных ситуаций в регионах повышенной социальной и политической напряженности, экологических катастроф, крупных техногенных аварий.

1.2. Основные определения

Ежегодно терминология в области ИТ пополняется новыми понятиями, аббревиатурами и т. п., поэтому в настоящем разделе приводятся лишь определения самого общего характера.

Сам термин *информация* происходит от латинского слова *information* — "разъяснение, осведомление, изложение". Понятие "*информация*" достаточно широко используется в обычной жизни современного человека, поэтому каждый имеет интуитивное представление о том, что это такое. Но когда наука начинает применять общеизвестные понятия, она уточняет их, ограничивает использование термина строгими рамками его применения в конкретной научной области. Так, понятие *информации*, становясь предметом изучения многих наук, в каждой из них конкретизируется и обогащается. Понятие *информации* является одним из основных в современной науке. Значение *информации* в жизни общества стремительно растет, меняются методы работы с *информацией*, расширяются сферы применения новых *информационных технологий*. Сложность явления *информации*, его многоплановость, широта сферы применения и быстрое развитие отражаются в постоянном появлении новых толкований понятий *информации* и *информационных технологий*. Поэтому имеются разные определения понятия *информации*, от наиболее общего, философского — "*Информация* есть отражение реального мира", — до узкого, практического — "*Информация* есть все сведения, являющиеся объектом хранения, передачи и преобразования". Приведем для сопоставления также некоторые другие определения и характеристики.

- *Информация* является одной из фундаментальных сущностей окружающего нас мира (акад. Г. Пospelов).

- *Информация* — сведения, передаваемые одними людьми другим людям устным, письменным или каким-нибудь другим способом (БСЭ).

- *Информация* является одним из основных универсальных свойств материи.

Под *информацией* необходимо понимать не сами предметы и процессы, а их отражение или отображение в виде чисел, формул, описаний, чертежей, символов, образов. Сама по себе *информация* может быть отнесена к области абстрактных категорий, подобных, например, математическим формулам, однако работа с ней всегда связана с использованием каких-нибудь материалов и затратами энергии. *Информация* хранится в наскальных рисунках древних людей в камне, в текстах книг на бумаге, в картинах на холсте, в музыкальных магнитофонных записях на магнитной ленте, в данных оперативной памяти компьютера, в наследственном коде ДНК в каждой живой клетке, в памяти человека в его мозгу и т. д. Для ее записи, хранения, обработки, распространения

нужны материалы (камень, бумага, холст, магнитная лента, электронные носители данных). Кроме того, нужна энергия — например, для того, чтобы приводить в действие печатающие машины, создавать искусственный климат для хранения шедевров изобразительного искусства, питать электричеством электронные схемы калькулятора, поддерживать работу передатчиков на радио- и телевизионных станциях.

Термин **информатизация** может расшифровываться как эффективное использование обществом *информации* и средств вычислительной техники во всех сферах деятельности, как комплекс мер, направленных на обеспечение полного и своевременного использования достоверных знаний во всех общественно значимых видах человеческой деятельности. Основная цель *информатизации* — обеспечение решения актуальных проблем общества, удовлетворение спроса на информационные продукты и услуги. Важность *информатизации* подчеркивается ее местом в "концепции четырех И", т. е. *информатизация, интеллектуализация, интеграция и индивидуализация*.

Под **интеллектуализацией** понимается создание и использование систем, решающих интеллектуальные задачи (накопление знаний и вывод новых, распознавание образов, общение с пользователем на естественном языке и т. д.). Интеграция предполагает комплексное решение научных, технических и социальных задач в целях развития общества.

Индивидуализация проявляется в развитии сегмента функциональных и личностных услуг во всех сферах человеческой деятельности.

Термин **технология** произошел от греческого *teche* + *logos*, т. е. "мастерство + учение". В производственном процессе под *технологией* понимают систему взаимосвязанных способов обработки материалов и приемов изготовления продукции. В общем случае *технология* — это правила действия с использованием каких-либо средств, которые являются общими для целой совокупности задач или задачных ситуаций. Если реализация *технологии* направлена на выработку управляющих воздействий, то это *технология управления*.

В узком смысле *технология* — это набор способов, средств выбора и осуществления управляющего процесса из множества возможных реализаций этого процесса. Под процессом (*processes* (лат.) — продвижение) здесь понимается функционально законченная, планируемая последовательность типовых операций со структурами данных, совершаемых за конечный промежуток времени в определенной среде, свойства которой диктуются требованиями и свойствами динамики процесса. В свою очередь, процесс может быть применен и к *информации* с целью ее преобразования.

В последнее время широкое распространение получили термины *бесбумажная технология, интерактивная технология, технология программирования, технология проектирования баз данных, CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support)-технология, сетевая технология, Internet-технология, технология анализа и реинжиниринга бизнес-процессов* и др. Все они предполагают использование *информации*, т.е. любого вида сведений о предметах, фактах, понятиях предметной области.

Современная *технология* должна отвечать следующим требованиям:

- высокая степень расчлененности процесса на стадии (фазы);
- системная полнота (целостность) процесса, который включает все элементы, обеспечивающие необходимую завершенность действий в достижении поставленной цели;
- регулярность процесса и однозначность его фаз, позволяющие применять средние величины при характеристике этих фаз, а следовательно, их стандартизацию и унификацию.

В понятии "*технология*" важно выделить два аспекта. Во-первых, *технология* неразрывно связана с процессом, т. е. совокупностью действий, осуществляемых во времени. Во-вторых, *технологический процесс* протекает в искусственных системах, созданных человеком для удовлетворения каких-либо потребностей.

В широком смысле под *технологией* понимают науку о законах производства материальных благ. В это понятие вкладывают три основные части:

- идеологию, т. е. принципы производства;
- орудия труда, т. е. станки, машины, агрегаты;
- кадры, владеющие профессиональными навыками.

Эти составляющие называют, соответственно, информационной, инструментальной и социальной. Другими словами, *информационный* аспект включает описание принципов и методов производства, *инструментальный* — орудия труда, с помощью которых реализуется производство, *социальный* — кадры и их организацию.

В более узком промышленном смысле *технология* рассматривается как последовательность действий над предметом труда в целях получения конечного продукта, например, *технология* получения интегральных схем или изготовления РЭС.

Для конкретного производства *технологию* понимают в узком смысле как совокупность приемов и методов, определяющих последовательность действий для реализации производственного процесса. Уровень *технологий* связан с научно-техническим прогрессом общества и влияет на его социальную структуру, культуру и идеологию. Для любой *технологии* могут быть выделены цель, предмет и средства.

Целью технологии в промышленном производстве является повышение качества продукции, сокращение сроков ее изготовления и снижение себестоимости.

Методология любой *технологии* включает в себя: декомпозицию производственного процесса на отдельные взаимосвязанные и подчиненные составляющие (стадии, этапы, фазы, операции); реализацию определенной последовательности выполнения операций, этапов и стадий производственного процесса в соответствии с целью *технологии*; технологическую документацию, формализующую выполнение всех составляющих.

Производство *информации* направлено на целесообразное использование информационных ресурсов и снабжение ими всех элементов организационной структуры и реализуется путем создания информационной системы. Информационные ресурсы являются исходным "сырьем" для системы управления любой организационной структурой. Конечным продуктом является принятое решение. Принятие решения в большинстве случаев осуществляется в условиях недостатка *информации*, поэтому степень использования информационных ресурсов во многом определяет эффективность работы организации.

В своем становлении любая отрасль, в том числе и информационная, проходила стадии от кустарного ремесленного производства к производству, основанному на высоких *технологиях*.

В развитии *технологии* выделяют два принципиально разных этапа. Один характеризуется непрерывным совершенствованием установившейся базисной *технологии* и достижением верхнего предельного уровня, когда дальнейшее улучшение является неоправданным из-за больших экономических вложений. Другой этап отличается отказом от существующей *технологии* и переходом к принципиально иной, развивающейся по законам первого этапа.

Под ***информационными технологиями*** понимается вся совокупность форм, методов и средств автоматизации информационной деятельности в различных сферах.

До настоящего времени не разработано общей теории *информационных технологий* (ИТ) как системы целостных взаимосвязанных приемов, методов и средств обработки *информации*, не определены основные понятия ИТ. Но достаточно понимать сущность ИТ, а также объяснить ее научное и практическое значение. Тем более что в проектировании и создании конкретных ИТ переплетается много задач из различных научных дисциплин.

Как наука ИТ включает методологические и методические положения, организационные установки, методы использования инструментально-технических

средств и т. д., — все то, что регламентирует и поддерживает информационное производство и деятельность людей, вовлеченных в это производство. Трансформация новых научных знаний в конкретную *информационную технологию* — основная задача ИТ как науки.

Ввиду дискуссионности предмета обсуждения приводится несколько понятий ИТ:

- ИТ — это совокупность научных методов и технических приемов производства информационных продуктов и услуг с применением всего многообразия средств вычислительной техники и связи;
- ИТ — это пограничная область, которая охватывает как вычислительную *технология*, так и конкретную социальную информационную практику, рационализирующую ее за счет широкого применения вычислительной техники;
- ИТ — это совокупность принципиально новых средств и методов, обеспечивающих создание, обработку, передачу, отображение и хранение *информации*.

Огромный толчок развитию *информационных технологий* принесла разработка мультимедийных средств.

Мультимедиа — это объединение нескольких средств представления *информации* в одной системе. Обычно под *мультимедиа* подразумевается объединение в компьютерной системе таких средств представления *информации*, как текст, звук, графика, мультипликация, видеоизображения и пространственное моделирование. Термин "*мультимедиа*" стал популярным сравнительно недавно, в связи с появлением мощных недорогих компьютеров.

В настоящее время имеются настольные компьютеры, способные работать со звуковой и видеоинформацией, манипулировать ею для получения специальных эффектов, синтезировать и воспроизводить звуки и видеоинформацию, создавать все виды графической *информации*, включая анимационные изображения, и объединять все это в едином представлении *мультимедиа*. Представления с использованием средств *мультимедиа* являются захватывающими, так как они многомодальны, т. е. одновременно воздействуют на несколько органов чувств и поэтому вызывают повышенный интерес и повышенное внимание у аудитории. Такое объединение сред обеспечивает качественно новый уровень восприятия *информации*: человек не просто пассивно созерцает, а активно участвует в происходящем. Именно этот феномен участия, а также технологические успехи производителей определил и мультимедийный бум последних лет.

Информационные технологии обеспечивают переход от рутинных методов к промышленным методам и средствам работы с *информацией* в различных сферах человеческой деятельности, давая возможность рационально и эффективно ее использовать

Лекция 2. Основы автоматизированного проектирования конструкций и технологических процессов производства РЭС

2.1. Сущность процесса проектирования

Сущность процесса *проектирования* РЭС заключается в разработке конструкций и технологических процессов производства новых радиоэлектронных средств, которые должны с минимальными затратами и максимальной эффективностью выполнять предписанные им функции в требуемых условиях.

Проектирование любого технологического объекта — создание, преобразование и представление в принятой форме образа этого еще не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. В любом случае инженерное *проектирование* начинается при наличии выраженной потребности общества в некоторых технических объектах, которыми могут быть объекты производства РЭС, промышленные изделия или процессы. *Проектирование* включает в себя разработку технического предложения и (или) технического задания (ТЗ), отражающих эти потребности, и реализацию ТЗ в виде проектной документации.

Обычно ТЗ представляют в виде некоторых документов, и оно является *исходным (первичным) описанием объекта*. Результатом *проектирования*, как правило, служит полный комплект документации, содержащий достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть *проект*, точнее *окончательное описание* объекта. Следовательно, *проектирование* — процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характеров.

Проектирование сложных объектов основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде теорий и подходов. Наиболее общим подходом является системный подход, идеями которого пронизаны различные методики *проектирования* сложных систем. В результате *проектирования* создаются новые, более совершенные РЭС, отличающиеся от своих аналогов и прототипов более высокой эффективностью за счет использования новых физических явлений и принципов функционирования, более совершенной элементной базы и структуры, улучшенных конструкций и прогрессивных технологических процессов.

По *степени новизны* проектируемых изделий различают следующие задачи *проектирования*:

- частичная модернизация существующего РЭС (изменение его параметров, структуры и конструкции), обеспечивающая сравнительно небольшое (несколько десятков процентов) улучшение одного или нескольких показателей качества для оптимального решения тех же или новых задач;
- существенная модернизация, которая предполагает значительное улучшение (в несколько раз) показателей качества;
- создание новых РЭС, основанных на новых принципах действия, конструирования и производства для резкого увеличения (на несколько порядков) показателей качества при решении тех же или существенно новых задач.

Проектирование является сложным многоэтапным процессом, в котором могут принимать участие большие коллективы специалистов, целые институты и научно-производственные объединения, а также организации заказчиков, которым предстоит эксплуатировать разработанную аппаратуру.

С точки зрения *последовательности* выполнения различают основные *стадии проектирования*:

- *предварительное проектирование*, результатом которого являются технические предложения (аван-проект). Эта стадия в наибольшей степени насыщена элементами научного поиска, теоретическими расчетами, экспериментальными исследованиями. Они завершаются обычно созданием лабораторных макетов;

- *эскизное проектирование*, результатом которого является эскизный проект. На этой стадии усилия разработчиков во многом направлены на поиски эффективных конструкторских решений. Она также связана с большим объемом теоретических изысканий, сложных расчетов и заканчивается созданием экспериментального образца проектируемого изделия и его тщательными экспериментальными исследованиями;

- *техническое проектирование*, при котором выполняется тщательная проработка всех схемных, конструкторских и технологических решений. На стадии технического проектирования создается техническая документация на разрабатываемую аппаратуру и процессы ее производства. Итогом являются *технический проект*, содержащий необходимую документацию, и опытный образец изделий, прошедший всесторонние испытания в реальных условиях эксплуатации.

Создание технической документации, на основе которой происходит в дальнейшем единичное, серийное или массовое производство РЭС — это особенно трудоемкий процесс.

С точки зрения содержания решаемых задач процесс проектирования разбивают на следующие этапы:

- *системотехническое проектирование*, при котором выбираются и формулируются цели проектирования, обосновываются исходные данные и определяются принципы построения системы. При этом формируется структура проектируемого объекта, его составных частей, которыми обычно являются функционально завершенные блоки, определяются энергетические и информационные связи между составными частями. В результате формируются и формулируются частные технические задания на проектирование отдельных составных частей объекта;

- *функциональное проектирование*, применительно к РЭС называемое также *схемотехническим*, имеет целью аппаратную реализацию составных частей системы (комплексов, устройств, узлов). При этом выбирают элементную базу, принципиальные схемы и оптимизируют параметры (осуществляют структурный и *параметрический синтез* схем) с точки зрения обеспечения наилучшего функционирования и эффективного производства. При выборе элементной базы и *синтезе* схем стремятся учитывать конструкторско-технологические требования;

- *конструирование*, называемое также *техническим проектированием*, решает задачи компоновки схем и размещения элементов и узлов, осуществления печатных и проводных соединений для РЭС всех уровней (модулей, ячеек, блоков, шкафов), а также задачи теплоотвода, электрической прочности, защиты от внешних воздействий и т. п. При этом стремятся оптимизировать принимаемые решения по конструктивно-технологическим, экономическим и эксплуатационным показателям. На этом *этапе проектирования* разрабатывают техническую документацию, необходимую для изготовления и эксплуатации РЭС;

- *технологическая подготовка* производства обеспечивает разработку технологических процессов изготовления отдельных блоков и всей системы в целом. На этом *этапе проектирования* создается технологическая документация на основе предшествующих результатов. Каждый *этап проектирования* сводится к *формированию описаний* проектируемого РЭС, относящихся к различным иерархическим уровням и аспектам его создания и работы.

Этапы проектирования состоят из отдельных *проектных процедур*, которые заканчиваются *частным проектным решением*. Типичными для проектирования РЭС процедурами являются *анализ* и *синтез* описаний различных уровней и аспектов.

Процедура *анализа* состоит в определении свойств заданного (или выбранного) описания. Примерами такой процедуры могут служить расчет частотных или переходных характеристик электронных схем, определение реакции схемы на заданное воздействие. *Анализ* позволяет оценить степень удовлетворения проектного решения заданным требованиям и его пригодность.

Процедура *синтеза* заключается в создании проектного решения (описания) по заданным требованиям, свойствам и ограничениям. Например, широко используются при *проектировании* РЭС процедуры *синтеза* электронных схем по их заданным характеристикам в частотной или временной области. При этом в процессе *синтеза* может создаваться структура схемы (*структурный синтез*) либо определяться параметры элементов заданной схемы, обеспечивающие требуемые характеристики (*параметрический синтез*).

Процедуры *анализа* и *синтеза* в процессе *проектирования* тесно связаны между собой, поскольку обе они направлены на создание приемлемого или оптимального проектного решения.

Типичной *проектной процедурой* является *оптимизация*, которая приводит к оптимальному (по определенному *критерию*) проектному решению. Например, широко используется оптимизация параметров электронных схем с целью наилучшего приближения частотных характеристик к заданным. Процедура оптимизации состоит в многократном *анализе* при целевом изменении параметров схемы до удовлетворительного приближения к заданным характеристикам. Оптимизация обеспечивает создание (*синтез*) проектного решения, но включает поэтапную оценку характеристик (*анализ*).

Проектные процедуры состоят из отдельных *проектных операций*. Например, в процессе *анализа* математических моделей РЭС приходится решать дифференциальные и алгебраические уравнения, осуществлять операции с матрицами. Такие операции могут иметь обособленный характер, но в целом они образуют единую *проектную процедуру*.

Проектные процедуры и операции выполняются в определенной последовательности, называемой *маршрутом проектирования*.

Маршруты проектирования могут начинаться с нижних иерархических уровней описаний (восходящее *проектирование*) либо с верхних (нисходящее *проектирование*).

Между всеми *этапами проектирования* существует глубокая взаимосвязь. Так, определение окончательной конструкции и разработка всей технической документации часто не могут быть выполнены до окончания разработки технологии. В процессе конструирования и разработки технологии может потребоваться коррекция принципиальных схем, структуры системы и даже исходных данных. Поэтому процесс *проектирования* является не только многоэтапным, но и многократно корректируемым по мере его выполнения, т. е. *проектирование* носит итерационный характер.

В процессе *проектирования* необходимо не просто создать аппаратуру, которая будет обеспечивать заданное функционирование, но и оптимизировать ее по широкому спектру функциональных, конструкторско-технологических, эксплуатационных и экономических показателей. На отдельных этапах для отдельных частных задач оптимизацию можно осуществить на основе разработанных формальных математических методов. Однако применительно к комплексным РЭС задача оптимизации часто не поддается формализации. Встречаясь с такой ситуацией, разработчики обычно рассматривают несколько вариантов решения поставленной задачи, подсказанных, как правило, предшествующим коллективным опытом, интуицией, и выбирают лучший из них. Такой подход называется эвристическим многовариантным анализом. Однако в связи с все возрастающей сложностью РЭС, с повышением требований к ним необходимые расчеты оказываются все более трудоемкими, а количество вариантов, целесообразных для рассмотрения, постоянно возрастает. Эта ситуация получила название "тирания альтернатив".

Часто на *этапе проектирования* трудно было предвидеть некоторые требования, вытекающие из условий эксплуатации. В результате всего этого создание нового РЭС затягивалось на долгие годы. Представляемые к испытаниям опытные образцы часто оказывались не удовлетворяющими заданным требованиям, а доводка аппаратуры происходила в процессе испытаний, что удорожало *проектирование* во много раз.

Подобное положение не было виной разработчиков. Это результат возникшего принципиального несоответствия традиционного подхода к *проектированию* и сложности современных радиоэлектронных средств. Указанное противоречие и вызвало интенсивное развитие новой технологии *проектирования РЭС*.

Такое развитие базируется на системном подходе и совершенствовании процессов *проектирования* с применением математических методов и средств вычислительной техники, комплексной автоматизации трудоемких и рутинных проектных работ, замены макетирования и натурного моделирования математическим моделированием, использованием эффективных методов многовариантного *проектирования* и оптимизации, а также повышением качества управления *проектированием*.

2.2. Методология системного подхода к проблеме проектирования сложных систем

Системный подход позволяет найти оптимальное, в широком смысле, решение задачи *проектирования* за счет всестороннего, целостного рассмотрения как проектируемого изделия, так и самого процесса *проектирования*, и способен привести к подлинно творческим новаторским решениям, включая крупные изобретения и научные открытия.

Главным средством автоматизации *проектирования* являются ЭВМ и управляемые ими другие технические средства, которые создают необходимую основу для полной реализации потенциальных возможностей системного подхода.

Системный подход получает все большее распространение при *проектировании* и управлении. Сущность системного подхода состоит в том, что объект *проектирования* или управления рассматривается как система, т. е. как единство взаимосвязанных элементов, которые образуют единое целое и действуют в интересах реализации единой цели. Системный подход требует рассматривать каждый элемент системы во взаимосвязи и взаимозависимости с другими элементами, вскрывать закономерности, присущие данной конкретной системе, выявлять оптимальный режим ее функционирования. Системный подход проявляется прежде всего в попытке создать целостную картину исследуемого или управляемого объекта. Исследование или описание отдельных элементов при этом не является самодовлеющим, а производится с учетом роли и места элемента во всей системе.

Методическим средством реализации системного подхода к исследованию, *проектированию* или управлению сложным процессом служит системный *анализ*, под которым понимается совокупность приемов и методов исследования объектов (процессов) посредством представления их в виде систем и их последующего *анализа*.

Всякая система общается с внешней средой, имеет входы X и выходы P из нее (рис. 2.1).

Входами могут быть: состав комплектующих элементов с их параметрами; параметры пленки при производстве транзисторов и т. д.; выходами могут быть показатели качества готовой продукции (надежность РЭС, процент выхода годных приборов и т. п.).

Система обычно подвержена *возмущениям* Z ; для их компенсации, для того чтобы система работала в нужном режиме, используют *управляющие воздействия* U (электрические непрерывные и дискретные сигналы, различные механические воздействия и т. д.).

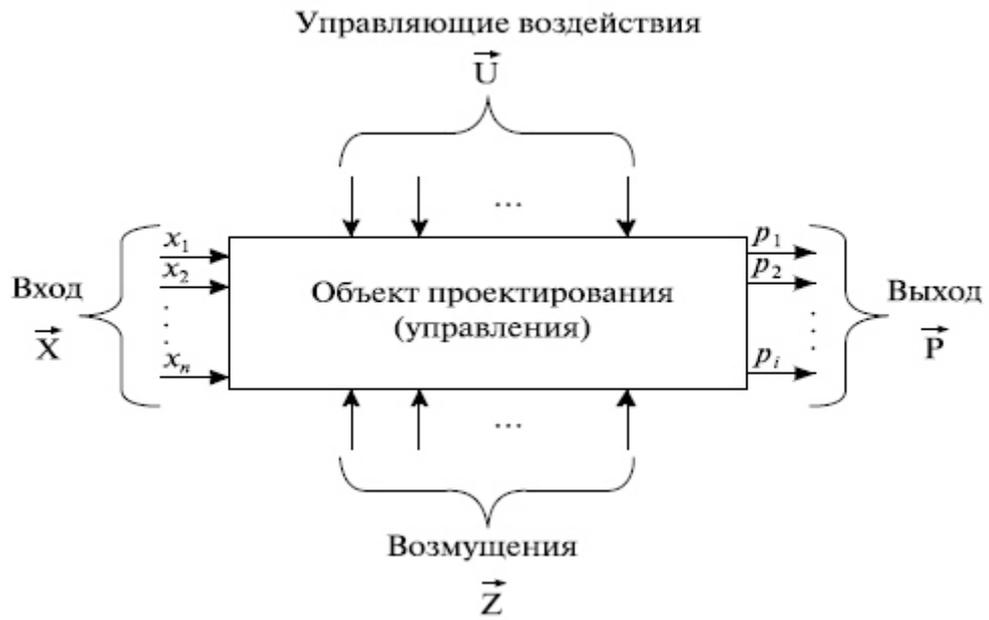


Рис. 2.1. Простейшая структура объекта проектирования

Лекция 3. Основы автоматизированного проектирования конструкций и технологических процессов производства РЭС (окончание)

3.1. Системный подход к задаче автоматизированного проектирования технологического процесса

Системный подход к задачам автоматизированного проектирования требует реализации совместного проектирования *технологического процесса (ТП)* и *автоматизированной системы управления* этим процессом (*АСУТП*).

В связи с этим в литературе в последние годы речь идет уже не о решении отдельных задач, а о совместном проектировании этих двух процессов.

Традиционное раздельное рассмотрение задач проектирования и производства изделий уже не удовлетворяет потребностям сегодняшнего дня, т. к. не может гарантировать ни высокого качества проектирования, ни надлежащего уровня организации производственных процессов, обеспечивающих их реализацию.

Однако именно в процессе проектирования порождается существенная часть информации, используемой для организации производства. Появилось новое понятие: *автоматизированный технологический комплекс (АТК)*.

При автоматизации *технологического процесса* рассматривается как *технологический объект управления (ТОУ)*. Последний представляет собой совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим инструкциям и регламентам *технологического процесса* производства. Управление *ТОУ* осуществляется с помощью *автоматизированной системы управления (АСУТП)*, представляющей собой человеко-машинную систему управления, которая обеспечивает автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления *технологическим процессом* в соответствии с принятым критерием.

Совместно функционирующие *ТОУ* и управляющая ими *АСУТП* составляют *автоматизированный технологический комплекс (АТК)*.

Системный подход к проектированию *АТК* требует объединения проектирования *технологических процессов* и разработки *автоматизированной системы управления* этим процессом в соответствии со структурой *АТК*.

Если *АТК* рассматривать как систему "*ТП — АСУТП*", то на определенных этапах проектирования *технологического процесса* необходимо выполнение требований, предъявляемых к *АСУТП*. Это позволяет сократить сроки проектирования *АТК* и создать более эффективную систему.

Следовательно, проектирование *АТК* объединяет два направления проектирования: разработку *ТП* и *АСУТП*. Поскольку цель создания *АТК* — это управление некоторым сложным объектом, то следует различать управляемую и управляющую системы. *Управляемой системой* является технологический производственный комплекс, который является объектом управления. *Управляющей* является *автоматизированная система управления*.

АТК представляет собой сложную многоуровневую блочно-иерархическую систему с оптимизацией решений в каждом слое. Упрощенно ее можно представить в следующем виде (рис. 3.1):

Сущность блочно-иерархического подхода заключается в расчленении объекта проектирования на уровни с постепенной детализацией представления системы сверху вниз. При этом система рассматривается не в целом, а отдельными блоками. Преимущество блочно-иерархического подхода состоит в том, что сложная задача большой размерности расчленяется на последовательно решаемые задачи малой размерности.

Системный подход к проектированию *АТК* требует учета следующих основных принципов:

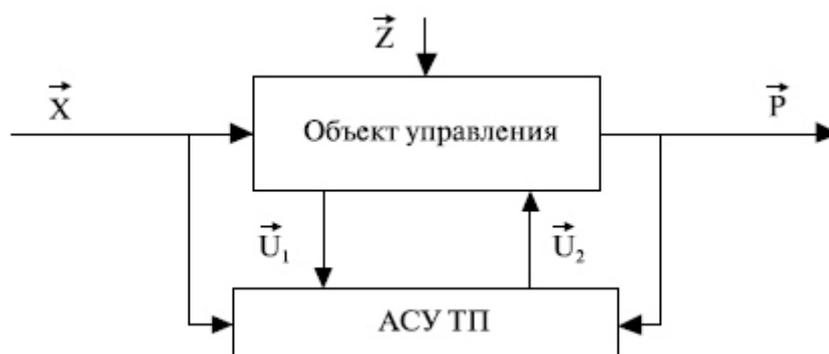


Рис. 3.1. Взаимодействие АТК с объектами управления

- реализации совместного проектирования *технологического процесса* и разработки АСУТП этим процессом в соответствии со структурой АТК;
- использования блочно-иерархического принципа, основанного на представлении АТК сложной системой;
- целенаправленности, т. е. в результате проектирования должна быть достигнута цель, включающая создание АТК с малой энергоемкостью и высокой производительностью.

Первый принцип требует, чтобы ряд отдельных операций выполнялся параллельно. Кроме того, на определенных этапах проектирования *технологического процесса*, как уже отмечалось ранее, к нему предъявляются требования АСУТП.

Второй принцип требует разбивать АТК как сложную систему на ряд элементов и подсистем.

Третий принцип требует организовать деятельность проектировщиков АТК в виде целенаправленных действий. При этом определяется сначала глобальная (общая) цель проектирования, например создание высокопроизводительного АТК с малой энергоемкостью. Эта цель уточняется и представляется в виде некоторых числовых соотношений. Затем задается влияние элементов и систем на глобальную цель проектирования, а также задач проектирования отдельных элементов и систем на общее проектирование АТК.

Такой анализ помогает установить частные цели проектирования, позволяющие достичь глобальной цели. При этом предполагается, что многокритериальная задача может быть свернута в однокритериальную с единственным критерием оптимизации.

3.2. Системный анализ сложных процессов

При анализе сложных процессов, когда не представляется возможным найти внутренние связи в системе, используется известный в кибернетике принцип "*черного ящика*". Этот принцип заключается в том, что, не имея информации о существовании, внутренней структуре процесса, для его математического описания используют лишь зависимость выходных величин от входных.

Понятие "*черного ящика*" относится к основным понятиям кибернетики, помогая при изучении поведения систем, т. е. реакций на различные внешние воздействия, абстрагироваться от их внутреннего устройства. Многие системы, особенно большие, оказываются настолько сложными, что даже имея полную информацию о состоянии их элементов, практически невозможно связать ее с поведением системы в целом. В таких случаях представление такой сложной системы в виде некоторого "*черного ящика*", функционирующего аналогично, облегчает построение упрощенной модели. Анализируя поведение модели и сравнивая его с поведением системы, можно сделать ряд выводов о свойствах самой системы и при их совпадении со свойствами модели выбрать рабочую гипотезу о предполагаемом строении исследуемой системы.

Пусть на вход системы подаются воздействия \vec{X} , а на выходе получают показатели качества \vec{P} (рис. 3.1). Наблюдая достаточно долго за поведением такой системы и, если

потребуется, выполняя активные эксперименты над ней, т. е. изменяя некоторым определенным образом входные воздействия, можно достигнуть такого уровня знаний свойств системы, чтобы иметь возможность предсказать изменение ее выходных показателей при любом заданном изменении входных.

Метод, использующий "*черный ящик*", широко применяют для решения задач моделирования *управляемых систем* (особенно при исследовании сложных технических объектов) в тех случаях, когда представляет интерес поведение системы, а не ее строение.

В этих ситуациях зачастую единственно пригодными оказываются статистические методы оптимизации, поскольку ни технолог, ни управляющая ЭВМ в ряде случаев не способны в ходе процесса учесть суммарный эффект действия множества различных факторов, часто связанных сложными зависимостями. Кроме того, на процессах могут сказываться явления, недоступные контролю по физическим или техническим причинам. Следовательно, производственная информация носит стохастический характер. Этим объясняется применение для исследования и управления *технологическим процессом* статистических методов.

При использовании статистических методов возникают две основные задачи: построение модели и нахождение стратегии оптимального управления. Для решения этих задач разработан ряд эффективных статистических методов.

При создании математических моделей универсальным является метод регрессионного анализа. В этом случае зависимость каждого выходного параметра (показателя качества) процесса от различных факторов представляется в виде многочлена, включающего рассматриваемые факторы и их комбинации. Коэффициенты при отдельных слагаемых многочлена (коэффициенты регрессии) определяются путем статистической обработки экспериментальных данных. Стремление учитывать влияние многих факторов приводит к необходимости сбора и обработки больших массивов информации. С целью значительного сокращения объема работы в настоящее время широко применяется метод многофакторного эксперимента. Существо метода состоит в том, что взамен традиционного исследования влияния отдельных факторов при неизменных остальных при каждом опыте исследуется влияние одновременного изменения нескольких факторов. Даже при небольшом числе исследуемых переменных метод позволяет значительно уменьшить объем экспериментов при условии, что их чередование выполняется по определенному плану. Эффективность метода возрастает с увеличением сложности исследуемого процесса.

При наличии разработанной модели задача оптимизации сводится к прогнозированию хода процесса при различных комбинациях воздействий и выбору оптимального варианта. Имеется ряд методов, позволяющих осуществлять целенаправленный поиск вариантов в направлении возрастания целевой функции, в частности, так называемый симплексметод и его модификации, пригодные для линейных регрессионных моделей. Реализация таких методов наиболее эффективна в системах управления на основе ЭВМ.

Большинство *автоматизированных систем управления технологическими процессами*) из-за специфических особенностей технологии производства электронных приборов могут быть созданы только на основе методов статистического управления. Это обусловило переход от простейших методов статистического управления к более сложным, и в первую очередь — к методам корреляционно-регрессионного анализа и составления регрессионных уравнений как математико-статистических моделей процессов.

Методология системного анализа достаточно универсальна и может быть использована как для процесса проектирования в целом, так и для отдельных стадий и этапов проектирования. При переходе от общего проектирования к отдельным стадиям будет меняться содержание целей, альтернатив и решений, но общая последовательность этапов анализа будет сохраняться.

При проектировании АТК с помощью ЭВМ составляется прежде всего задание на проектирование. Задание составляется генпроектировщиком или заказчиком с участием той организации, которая будет разрабатывать проект.

Задание на проектирование включает в себя целый ряд пунктов. Отметим некоторые из них (в произвольном порядке):

- основание для проектирования;
- перечень производств, цехов, установок, охватываемых проектами систем автоматизации, с указанием для каждого особых условий (при их наличии), например класс взрыво- и пожароопасности помещений, наличие влажной, сырой окружающей среды и т. д.;
- стадийность проектирования;
- требования к разработке вариантов проекта (части проекта);
- планируемый уровень капитальных затрат на автоматизированное проектирование и примерных затрат на *научно-исследовательские работы (НИР)*, *опытно-конструкторские работы (ОКР)* и проектирование с указанием источников финансирования, и др.

Например, основанием для разработки той или иной радиосистемы или элемента может быть необходимость использования его в более крупной системе или его преимущества по сравнению с имеющимися (известными) аналогами. А основанием для автоматизированного проектирования АТК являются, как правило, сокращение сроков проектирования и внедрения, уменьшение количества ошибок при проектировании, обеспечение возможности изменения проектных решений, сокращение сроков тестирования микросхем.

По мере усложнения системы (например для РЭС: ИС, БИС, микросхем, радиосистем и т. д.) резко возрастает время разработки и внедрения, увеличиваются трудозатраты. Соответственно, происходит пропорциональный рост расходов на разработку и внедрение. Этот фактор необходимо учитывать уже на стадии формулирования основания для проектирования и непосредственно использовать при проведении расчетов по технико-экономическому обоснованию.

Формирование внешних условий по отношению к проектируемому объекту необходимо потому, что они должны быть учтены уже на самых первых этапах проектирования. Например, одни и те же технологические операции на различных установках в одних и тех же условиях могут иметь некоторый разброс значений выходных параметров; аналогично, одна и та же установка будет иметь разброс значений при различных условиях окружающей среды и т. д. Исследование такого рода влияния — одна из задач *научно-исследовательской работы*, поскольку указанные факторы влияют и на сам *технологический процесс*, и на адекватность математических моделей, описывающих этот процесс.

Лекция 4. Системы автоматизированного проектирования (САПР) РЭС

4.1. Определение, назначение, цель

По определению, САПР — это организационно-техническая система, состоящая из совокупности комплекса средств автоматизации проектирования и коллектива специалистов подразделений проектной организации, выполняющая автоматизированное проектирование *объекта*, которое является результатом деятельности проектной организации.

Из этого определения следует, что САПР — это не средство автоматизации, а система деятельности людей по проектированию *объектов*. Поэтому автоматизация проектирования как научно-техническая дисциплина отличается от обычного использования ЭВМ в процессах проектирования тем, что в ней рассматриваются вопросы построения системы, а не совокупность отдельных задач. Эта дисциплина является методологической, поскольку она обобщает черты, являющиеся общими для разных конкретных приложений.

Идеальная схема функционирования САПР представлена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Схема функционирования САПР; КСА — комплекс технических средств

Эта схема идеальна в смысле полного соответствия формулировке согласно существующим стандартам и несоответствия реально действующим системам, в которых далеко не все проектные работы выполняются с помощью средств автоматизации и не все проектировщики пользуются этими средствами.

Проектировщики, как следует из определения, относятся к САПР. Это утверждение вполне правомерно, т. к. САПР — это система автоматизированного, а не автоматического проектирования. Это значит, что часть операций проектирования может и всегда будет выполняться человеком. При этом в более совершенных системах доля работ, выполняемых человеком, будет меньше, но содержание этих работ будет более творческим, а роль человека в большинстве случаев — более ответственной.

Из определения САПР следует, что целью ее функционирования является проектирование. Как уже было сказано, проектирование — это процесс переработки информации, приводящий в конечном счете к получению полного представления о проектируемом *объекте* и способах его изготовления.

В практике неавтоматизированного проектирования полное описание проектируемого *объекта* и способов его изготовления содержит проект изделия и техническую документацию. Для условия автоматизированного проектирования еще не узаконено названия конечного продукта проектирования, содержащего данные об *объекте*, и технологии его создания. На практике его называют по-прежнему "проектом".

Проектирование — это один из наиболее сложных видов интеллектуальной работы, выполняемой человеком. Более того, процесс проектирования сложных *объектов* не под силу одному человеку и выполняется творческим коллективом. Это, в свою очередь, делает процесс проектирования еще более сложным и трудно поддающимся формализации. Для автоматизации такого процесса необходимо четко знать, что в действительности он собой представляет и как выполняется разработчиками. Опыт свидетельствует, что изучение процессов проектирования и их формализация давались специалистам с большим трудом, поэтому автоматизация проектирования всюду осуществлялась поэтапно, охватывая последовательно все новые проектные операции. Соответственно, поэтапно создавались новые и совершенствовались старые системы. Чем на большее число частей разбита система, тем труднее правильно сформулировать исходные данные для каждой части, но тем легче провести оптимизацию.

Объектом автоматизации проектирования являются работы, действия человека, которые он выполняет в процессе проектирования. А то, что проектируют, называют **объектом проектирования**.

Человек может проектировать дом, машину, технологический процесс, промышленное изделие. Такие же *объекты* призвана проектировать САПР. При этом разделяют САПР изделия (САПР И) и *САПР технологических процессов (САПР ТП)*.

Следовательно, *объекты проектирования* не являются *объектами автоматизации проектирования*. В производственной практике *объектом автоматизации проектирования* является вся совокупность действий проектировщиков, разрабатывающих изделие или технологический процесс, или то и другое, и оформляющих результаты разработок в виде конструкторской, технологической и эксплуатационной документации.

Разделив весь процесс проектирования на этапы и операции, можно описать их с помощью определенных математических методов и определить инструментальные средства для их автоматизации. Затем необходимо рассмотреть выделенные проектные операции и средства автоматизации в комплексе и найти способы сопряжения их в единую систему, отвечающую поставленным целям.

При проектировании сложного *объекта* различные проектные операции многократно повторяются. Это связано с тем, что проектирование представляет собой закономерно развивающийся процесс. Начинается он с выработки общей концепции проектируемого *объекта*, на ее основе - эскизного проекта. Далее приближенные решения (прикидки) эскизного проекта уточняются на всех последующих стадиях проектирования. В целом такой процесс можно представить в виде спирали. На нижнем витке спирали находится концепция проектируемого *объекта*, на верхнем — окончательные данные о спроектированном *объекте*. На каждом витке спирали выполняют, с точки зрения технологии обработки информации, идентичные операции, но в увеличивающемся объеме. Следовательно, инструментальные средства автоматизации повторяющихся операций могут быть одни и те же.

Практически решить в полном объеме задачу формализации всего процесса проектирования очень сложно, однако если будет автоматизирована хотя бы часть проектных операций, это себя все равно оправдает, т. к. позволит в дальнейшем развивать созданную САПР на основе более совершенных технических решений и с меньшими затратами ресурсов.

В целом для всех этапов проектирования изделий и технологии их изготовления можно выделить следующие основные виды типовых операций обработки информации:

- поиск и выбор из всевозможных источников нужной информации;
- анализ выбранной информации;
- выполнение расчетов;
- принятие проектных решений;
- оформление проектных решений в виде, удобном для дальнейшего использования (на последующих стадиях проектирования, при изготовлении или эксплуатации изделия).

Автоматизация перечисленных операций обработки информации и процессов управления использованием информации на всех стадиях проектирования составляет *сущность функционирования современных САПР*.

Каковы основные черты систем автоматизированного проектирования и их принципиальные отличия от "позадачных" методов автоматизации?

Первой характерной особенностью является возможность *комплексного* решения общей задачи проектирования, установления тесной связи между частными задачами, т. е. возможность интенсивного обмена информацией и взаимодействие не только отдельных процедур, но и этапов проектирования. Например, применительно к техническому (конструкторскому) этапу проектирования САПР РЭС позволяет решать задачи

компоновки, размещения и трассировки в тесной взаимосвязи, которая должна быть заложена в технических и программных средствах системы.

Применительно к системам более высокого уровня можно говорить об установлении тесной информационной связи между схемотехническим и техническим этапами проектирования. Такие системы позволяют создавать радиоэлектронные средства, более эффективные с точки зрения комплекса функциональных и конструкторско-технологических требований.

Вторым отличием САПР РЭС является *интерактивный режим* проектирования, при котором осуществляется непрерывный процесс *диалога* "человек-машина". Сколь ни сложны и изощренны формальные методы проектирования, сколь ни велика мощность вычислительных средств, невозможно создать сложную аппаратуру без творческого участия человека. Системы автоматизации проектирования по своему замыслу должны не заменять конструктора, а выступать мощным инструментом его творческой деятельности.

Третья особенность САПР РЭС заключается в возможности *имитационного моделирования* радиоэлектронных систем в условиях работы, близких к реальным. *Имитационное моделирование* дает возможность предвидеть реакцию проектируемого объекта на самые различные возмущения, позволяет конструктору "видеть" плоды своего труда в действии без макетирования. Ценность этой особенности САПР заключается в том, что в большинстве случаев крайне трудно сформулировать системный критерий эффективности РЭС. Эффективность связана с большим числом требований различного характера и зависит от большого числа параметров РЭС и внешних факторов. Поэтому в сложных задачах проектирования практически невозможно формализовать процедуру поиска оптимального по критерию комплексной эффективности решения. *Имитационное моделирование* позволяет провести испытания различных вариантов решения и выбрать лучший, причем сделать это быстро и учесть всевозможные факторы и возмущения.

Четвертая особенность заключается в значительном усложнении программного и информационного обеспечения проектирования. Речь идет не только о количественном, объемном увеличении, но и об идеологическом усложнении, которое связано с необходимостью создания языков общения проектировщика и ЭВМ, развитых банков данных, программ информационного обмена между составными частями системы, программ проектирования. В результате проектирования создаются новые, более совершенные РЭС, отличающиеся от своих аналогов и прототипов более высокой эффективностью за счет использования новых физических явлений и принципов функционирования, более совершенной элементной базы и структуры, улучшенных конструкций и прогрессивных технологических процессов.

4.2. Принципы создания систем автоматизированного проектирования конструкции и технологии

При создании САПР руководствуются следующими общесистемными принципами:

1. Принцип *включения* состоит в том, что требования к созданию, функционированию и развитию САПР определяются со стороны более сложной системы, включающей в себя САПР в качестве подсистемы. Такой сложной системой может быть, например, комплексная система АСНИ — САПР — АСУТП предприятия, САПР отрасли и т. п.

2. Принцип *системного единства* предусматривает обеспечение целостности САПР за счет связи между ее подсистемами и функционирования подсистемы управления САПР.

3. Принцип *комплексности* требует связности проектирования отдельных элементов и всего объекта в целом на всех стадиях проектирования.

4. Принцип *информационного единства* предопределяет информационную согласованность отдельных подсистем и компонентов САПР. Это означает, что в средствах обеспечения компонентов САПР должны использоваться единые термины, символы, условные обозначения, проблемно-ориентированные языки программирования и

способы представления информации, которые обычно устанавливаются соответствующими нормативными документами. Принцип информационного единства предусматривает, в частности, размещение всех файлов, используемых многократно при проектировании различных *объектов*, в банках данных. За счет информационного единства результаты решения одной задачи в САПР без какой-либо переконфигурации или переработки полученных массивов данных могут быть использованы в качестве исходной информации для других задач проектирования.

5. Принцип *совместимости* состоит в том, что языки, коды, информационные и технические характеристики структурных связей между подсистемами и компонентами САПР должны быть согласованы так, чтобы обеспечить совместное функционирование всех подсистем и сохранить *открытую структуру САПР* в целом. Так, введение каких-либо новых технических или программных средств в САПР не должно приводить к каким-либо изменениям уже эксплуатируемых средств.

6. Принцип *инвариантности* предусматривает, что подсистемы и компоненты САПР должны быть по возможности универсальными или типовыми, т. е. инвариантными к проектируемым *объектам* и отраслевой специфике. Применительно ко всем компонентам САПР это, конечно, невозможно. Однако многие компоненты, например программы оптимизации, обработки массивов данных и другие, могут быть сделаны одинаковыми для разных технических объектов.

7. Принцип *развития* требует, чтобы в САПР предусматривалось наращивание и совершенствование компонентов и связей между ними. При модернизации подсистемы САПР допускается частичная замена компонентов, входящих в подсистему, с изданием соответствующей документации.

Приведенные общесистемные принципы являются чрезвычайно важными на этапе разработки САПР. Контроль над их соблюдением обычно осуществляет специальная служба САПР предприятия.

Сущность процесса проектирования РЭС заключается в разработке конструкций и технологических процессов производства новых радиоэлектронных средств, которые должны с минимальными затратами и максимальной эффективностью выполнять предписанные им функции в требуемых условиях.

В результате проектирования создаются новые, более совершенные РЭС, отличающиеся от своих аналогов и прототипов более высокой эффективностью за счет использования новых физических явлений и принципов.

Лекция 5. Технические средства САПР и их развитие

5.1. Требования, предъявляемые к техническому обеспечению

Используемые в САПР технические средства должны обеспечивать:

- выполнение всех необходимых проектных процедур, для которых имеется соответствующее программное обеспечение;
- взаимодействие между проектировщиками и ЭВМ, поддержку интерактивного режима работы;
- взаимодействие между членами коллектива, работающими над общим проектом.

Первое из этих требований выполняется при наличии в САПР вычислительных машин и систем с достаточными производительностью и емкостью памяти.

Второе требование относится к пользовательскому *интерфейсу* и выполняется за счет включения в САПР удобных средств ввода/вывода данных и, прежде всего, устройств обмена графической информацией.

Третье требование обуславливает объединение аппаратных средств САПР в вычислительную сеть.

В результате общая структура *ТО САПР* представляет собой сеть узлов, связанных между собой *средой передачи данных* (рис. 5.1). Узлами (станциями данных) являются рабочие места проектировщиков, часто называемые ***автоматизированными рабочими местами (АРМ)***, или *рабочими станциями (WS — Workstation)*; ими могут быть также большие ЭВМ (*мейнфреймы*), отдельные периферийные и измерительные устройства.

Именно в *АРМ* должны существовать средства для *интерфейса* проектировщика с ЭВМ. Что касается вычислительной мощности, то она может быть распределена между различными узлами вычислительной сети.

Среда передачи данных представлена каналами передачи данных, состоящими из *линий связи* и коммутационного оборудования.

В каждом узле можно выделить *оконечное оборудование данных (ООД)*, выполняющее определенную работу по проектированию, и *аппаратуру окончания канала данных (АКД)*, предназначенную для связи *ООД* со *средой передачи данных*. Например, в качестве *ООД* можно рассматривать *персональный компьютер*, а в качестве *АКД* — вставляемую в компьютер сетевую плату.

Канал передачи данных — средство двустороннего обмена данными, включающее в себя *АКД* и *линию связи*. ***Линией связи*** называют часть физической среды, используемую для распространения сигналов в определенном направлении; примерами *линий связи* могут служить коаксиальный кабель, витая пара проводов, волоконно-оптическая *линия связи* (ВОЛС).

Близким является понятие канала (***канала связи***), под которым понимают средство односторонней передачи данных. Примером *канала связи* может быть полоса частот, выделенная одному передатчику при радиосвязи.



Рис. 5.1. Структура технического обеспечения САПР

В некоторой линии можно образовать несколько каналов связи, по каждому из которых передается своя информация. При этом говорят, что линия разделяется между несколькими каналами.

5.2. Типы сетей

Существуют два метода разделения линии передачи данных: *временное мультиплексирование* (иначе — *разделение по времени*, или *TDM — Time Division Method*), при котором каждому каналу выделяется некоторый квант времени, и *частотное разделение (FDM — Frequency Division Method)*, при котором каналу выделяется некоторая полоса частот.

В САПР небольших проектных организаций, насчитывающих не более единиц-десятков компьютеров, которые размещены на малых расстояниях один от другого (например, в одной или нескольких соседних комнатах), объединяющая компьютеры сеть является локальной. *Локальная вычислительная сеть (ЛВС)*, или *LAN (Local Area Network)*, имеет *линию связи*, к которой подключаются все узлы сети. При этом топология соединений узлов (рис. 5.2) может быть шинная (bus), кольцевая (ring), звездная (star). Протяженность линии и число подключаемых узлов в ЛВС ограничены.

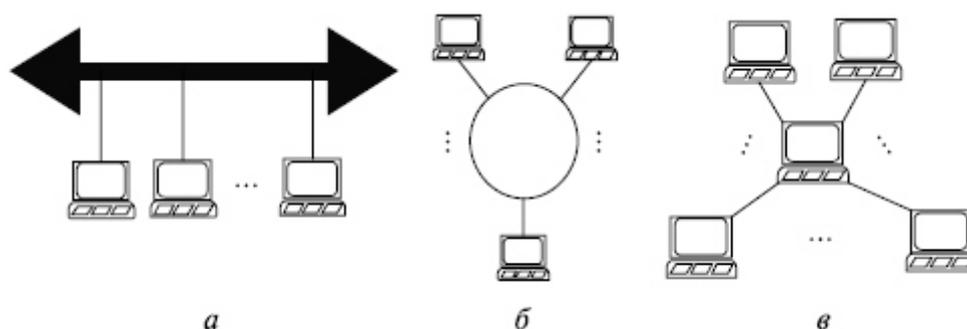


Рис. 5.2. Варианты топологии локальных вычислительных сетей: а — шинная; б — кольцевая; в — звездная

В более крупных по масштабам проектных организациях в сеть включены десятки-сотни и более компьютеров, относящихся к разным проектным и управленческим подразделениям и размещенных в помещениях одного или нескольких зданий. Такую сеть называют *корпоративной*. В ее структуре можно выделить ряд ЛВС, называемых *подсетями*, и средства связи ЛВС между собой. В эти средства входят коммутационные серверы (блоки взаимодействия подсетей). Если коммутационные серверы объединены отделенными от ЛВС подразделений каналами передачи данных, то они образуют новую

подсеть, называемую *опорной* (или транспортной), а вся сеть оказывается частью иерархической структуры.

Если здания проектной организации удалены друг от друга на значительные расстояния (вплоть до их расположения в разных городах), то корпоративная сеть по своим масштабам становится *территориальной сетью* (*WAN — Wide Area Network*). В территориальной сети различают *магистральные* каналы передачи данных (магистральную сеть), имеющие значительную протяженность, и *каналы передачи данных*, связывающие *ЛВС* (или совокупность *ЛВС* отдельного здания или кампуса) с магистральной сетью и называемые *абонентской линией* или соединением "*последней мили*".

Обычно создание выделенной магистральной сети, т. е. сети, обслуживающей единственную организацию, обходится для этой организации слишком дорого. Поэтому чаще прибегают к услугам *провайдера*, т. е. фирмы, предоставляющей телекоммуникационные услуги многим пользователям. В этом случае внутри корпоративной сети связь на значительных расстояниях осуществляется через **магистральную сеть общего пользования**. В качестве такой сети можно использовать, например, городскую или междугородную телефонную сеть или территориальные сети передачи данных. Наиболее распространенной формой доступа к этим сетям в настоящее время является обращение к глобальной вычислительной сети Internet.

Для многих корпоративных сетей возможность выхода в Internet является желательной не только для обеспечения взаимосвязи удаленных сотрудников собственной организации, но и для получения других информационных услуг. Развитие виртуальных предприятий, работающих на основе *CALS*-технологий, с необходимостью подразумевает информационные обмены через территориальные сети, как правило, через Internet. Нужно, однако, отметить, что использование сетей общего пользования существенно усложняет задачу обеспечения информационной безопасности.

Структура *ТО САПР* для крупной организации представлена на рис. 5.3. Здесь показана типичная структура крупных корпоративных сетей *САПР*, называемая архитектурой *клиент-сервер*. В сетях "клиент-сервер" выделяется один или несколько узлов, называемых *серверами*, которые выполняют в сети управляющие или общие для многих пользователей проектные функции, а остальные узлы (рабочие места) являются терминальными — их называют клиентами, в них работают пользователи. В общем случае **сервером называют совокупность программных средств, ориентированных на выполнение определенных функций**. Но если эти средства сосредоточены на конкретном узле вычислительной сети, то тогда понятие "сервер" относится именно к узлу сети.

Сети "клиент-сервер" различают по характеру распределения функций между серверами, — другими словами, их классифицируют по типам серверов. Различают *файл-серверы* для хранения файлов, разделяемых многими пользователями, *серверы баз данных* *АС*, *серверы приложений* для решения конкретных прикладных задач, *коммутационные серверы* (называемые также блоками взаимодействия сетей или серверами доступа) для взаимосвязи сетей и подсетей, *специализированные серверы* для выполнения определенных телекоммуникационных услуг, например серверы электронной почты.

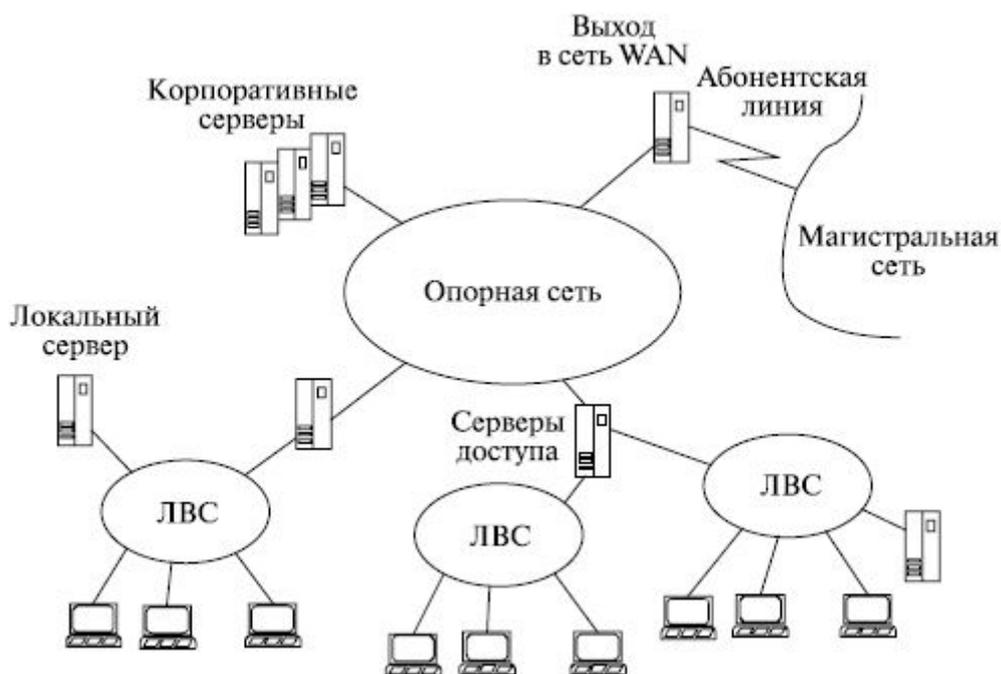


Рис. 5.3. Структура корпоративной сети САПР

В случае специализации серверов по определенным приложениям сеть называют *сетью распределенных вычислений*. Если сервер приложений обслуживает пользователей одной ЛВС, то такой сервер называют локальным. Но поскольку в САПР имеются приложения и базы данных, разделяемые пользователями разных подразделений и, следовательно, клиентами разных ЛВС, то соответствующие серверы относят к группе корпоративных, подключаемых обычно к опорной сети (см. рис. 5.3).

Наряду с архитектурой "клиент-сервер" применяют одноранговые сети, в которых любой узел в зависимости от решаемой задачи может выполнять функции как сервера, так и клиента. Организация взаимодействия в таких сетях при числе узлов более нескольких десятков становится довольно сложной, поэтому одноранговые сети нашли преимущественное распространение в небольших по масштабам САПР.

В соответствии со способами коммутации различают сети с *коммутацией каналов* и *коммутацией пакетов*. В первом случае при обмене данными между узлами А и В сети создается физическое соединение между А и В, которое во время сеанса связи используется только этими абонентами. Примером сети с коммутацией каналов может служить телефонная сеть. Здесь передача информации происходит быстро, но каналы связи используются неэффективно, так как при обмене данными возможны длительные паузы и канал "простаивает". При коммутации пакетов физического соединения, которое в каждый момент сеанса связи соединяло бы абонентов А и В, не создается. Сообщения разделяются на порции, называемые *пакетами*, которые передаются в разветвленной сети от А к В или обратно через промежуточные узлы с возможной буферизацией (временным запоминанием) в них. Таким образом, любая линия может разделяться многими сообщениями, попеременно пропуская при этом пакеты разных сообщений с максимальным заполнением упомянутых пауз.

5.3. Эталонная модель взаимосвязи открытых систем

Для удобства модернизации сложные информационные системы делают максимально открытыми, т. е. приспособленными для внесения изменений в некоторую часть системы при сохранении неизменными остальных частей. В отношении вычислительных сетей реализация концепции открытости привела к появлению *эталонной модели взаимосвязи открытых систем (ЭМОС)*, предложенной Международной организацией стандартизации (ISO — *International Standard*

Organization). В этой модели дано описание общих принципов, правил, соглашений, обеспечивающих взаимодействие информационных систем и называемых *протоколами*.

Информационную сеть в ЭМВОС рассматривают как совокупность функций (протоколов), которые подразделяют на группы, называемые *уровнями*. Именно разделение на уровни позволяет вносить изменения в средства реализации одного уровня без перестройки средств других уровней, что значительно упрощает и удешевляет модернизацию средств по мере развития техники.

Различают семь уровней ЭМВОС.

На *физическом (physical)* уровне осуществляется представление информации в виде электрических или оптических сигналов, преобразование формы сигналов, выбор параметров физических *сред передачи данных*, организуется передача информации через физические среды.

На *канальном (link)* уровне выполняется обмен данными между соседними узлами сети, т. е. узлами, непосредственно связанными физическими соединениями без других промежуточных узлов. Отметим, что пакеты канального уровня обычно называют *кадрами*.

На *сетевом (network)* уровне происходит формирование пакетов по правилам тех промежуточных сетей, через которые проходит исходный пакет, и *маршрутизация* пакетов, т. е. определение и реализация маршрутов, по которым передаются пакеты. Другими словами, маршрутизация сводится к образованию логических каналов. *Логическим каналом* называют виртуальное соединение двух или более объектов сетевого уровня, при котором возможен обмен данными между этими объектами. Понятию логического канала не обязательно соответствует физическое соединение линий передачи данных между связываемыми пунктами. Это понятие введено для абстрагирования от физической реализации соединения. Еще одной важной функцией сетевого уровня после маршрутизации является контроль нагрузки на сеть с целью предотвращения перегрузок, отрицательно влияющих на работу сети.

На *транспортном (transport)* уровне обеспечивается связь между конечными пунктами (в отличие от предыдущего сетевого уровня, на котором обеспечивается передача данных через промежуточные компоненты сети). К функциям транспортного уровня относятся мультиплексирование и демultipлексирование (сборка/разборка сообщений на пакеты в конечных пунктах), обнаружение и устранение ошибок в переданных данных, задание требуемого уровня услуг (например, заказанных скорости и надежности передачи).

На *сеансовом (session)* уровне определяются тип связи (дуплекс или полудуплекс), начало и окончание заданий, последовательность и режим обмена запросами и ответами взаимодействующих партнеров.

На *представительном (presentation)* уровне реализуются функции представления данных (кодирование, форматирование, структурирование). Например, на этом уровне выделенные для передачи данные преобразуются из одного кода в другой, в частности, с целью шифрования.

На *прикладном (application)* уровне определяются и оформляются в сообщения те данные, которые подлежат передаче по сети.

В конкретных случаях может возникать потребность в реализации лишь части названных функций, тогда, соответственно, сеть будет содержать лишь часть уровней. Так, в простых (неразветвленных) ЛВС отпадает необходимость в средствах сетевого и транспортного уровней. Одновременно сложность функций канального уровня делает целесообразным его разделение в ЛВС на два подуровня:

- управление доступом к каналу (*MAC — Medium Access Control*);
- управление логическим каналом (*LLC — Logical Link Control*). К подуровню LLC, в отличие от подуровня MAC, относится часть функций канального уровня, независимых от особенностей передающей среды.

Передача данных через разветвленные сети происходит при использовании *инкапсуляции/декапсуляции* порций данных. Так, сообщение, пришедшее на транспортный уровень, делится на сегменты, которые получают заголовки и передаются на сетевой уровень.

Сегментом обычно называют пакет транспортного уровня. Сетевой уровень организует передачу данных через промежуточные сети. Для этого сегмент может быть разделен на части (пакеты), если сеть не поддерживает передачу сегментов целиком. Пакет снабжается своим сетевым заголовком (т. е. происходит инкапсуляция сегмента в пакет сетевого уровня). При передаче между узлами промежуточной *ЛВС* требуется инкапсуляция пакетов в кадры с возможной разбивкой пакета. Приемник декапсулирует сегменты и восстанавливает исходное сообщение.

Лекция 6. Технические средства САПР и их развитие (продолжение)

6.1. Высокопроизводительные технические средства САПР и их комплексирование

Рабочие станции (РС) и персональные компьютеры (ПК) имеют традиционную архитектуру, ориентированную на последовательные вычисления, т.е. одним *потокком команд* они обрабатывают один *поток данных*. Такая организация вычислений была предложена фон-Нейманом и названа его именем. Усложнение решаемых задач и вычислительных алгоритмов САПР привело к внедрению в эту область более высокопроизводительных ЭВМ, организация вычислений в которых основана на множественности *потокком команд*, обрабатывающих множество *потокком данных*. Архитектура этих ЭВМ называется параллельной — "не фон-неймановской". По множественности/одиночности *потокком команд* и *данных* ЭВМ можно разделить на четыре класса, но на практике используются ЭВМ трех классов. На рис. 6.1 показаны упрощенные структурные схемы трех классов ЭВМ, включающие в себя следующие блоки: *ОЗУ команд (ОЗУк)*, *ОЗУ данных (ОЗУд)*, *устройство управления (УУ)*, *центральный процессор (ЦП)*, а также *потокком команд (К)* и *потокком данных (Д)*.

ЭВМ класса **ОКОД** — это традиционные "фон-неймановские" машины с одиночным *потокком команд* и одиночным *потокком данных*. К ним относятся РС и ПК. **ОКМД** ЭВМ — это параллельные компьютеры с одиночным *потокком команд* и множественными *потокками данных*. **МКМД** ЭВМ — это многопроцессорные ЭВМ с множественными *потокками команд* и множественными *потокками данных*.

На рис. 6.1а, б, в показаны также соответствующие трем классам ЭВМ алгоритмы организации вычислений. Стрелками в них обозначены *потокком команд* и *данных*, кружками — выполняемые операторы. В случае **ОКОД** ЭВМ используется обычный последовательный алгоритм вычислений.

Для организации вычислений в ЭВМ класса **ОКМД** применяется последовательно-групповой алгоритм. В этом случае группе выполняемых операторов соответствуют операции над векторными и матричными данными. **ОКМД** ЭВМ реализуются в виде векторных и матричных ЭВМ. Поскольку производительность таких машин велика, их называют суперЭВМ.

Матричная супер-ЭВМ представляет собой матрицу одинаковых процессорных элементов с собственными локальными ОЗУ, причем каждый из процессоров матрицы выполняет в каждый момент времени одну и ту же команду над разными элементами векторных (матричных) данных. Недостаток матричных ЭВМ — ограниченное количество процессорных элементов в матрице ограничивает производительность ЭВМ: чем длиннее векторы обрабатываемых данных, тем ниже выигрыш в производительности такой матричной супер-ЭВМ перед обычной **ОКОД** ЭВМ, называемой *скалярной машиной*.

От этого недостатка свободны векторные супер-ЭВМ класса **ОКМД**. В отличие от матричной, векторная супер-ЭВМ имеет один процессор, но его аппаратура разбита на отдельные секции. При этом каждая секция обрабатывает элемент векторных данных за один и тот же такт времени своей логической подфункцией, на которые разбивается общая логическая функция, описывающая работу векторного процессора. Элементы векторов передаются от секции к секции с каждым новым тактом времени, формируя таким образом непрерывный конвейер обработки векторов. Секции конвейера называют его ступенями. Такие векторные конвейерные супер-ЭВМ оказываются тем более производительнее по сравнению со скалярными, чем длиннее обрабатываемые векторы. Существенный недостаток векторных супер-ЭВМ — резкое снижение производительности при нарушении непрерывного *потокком данных*, поступающих на вход конвейера.

Поскольку алгоритм организации вычислений для *ОКМД* ЭВМ имеет специальный вид — последовательно-групповой. ЭВМ этого класса называют специализированными, так как они достигают своей пиковой производительности лишь на определенном классе задач. В области САПР такие супер-ЭВМ успешно применяются для формирования реалистичных трехмерных графических изображений и решения ряда задач конструкторского проектирования сложных изделий, где требуется обработка векторов и матриц.

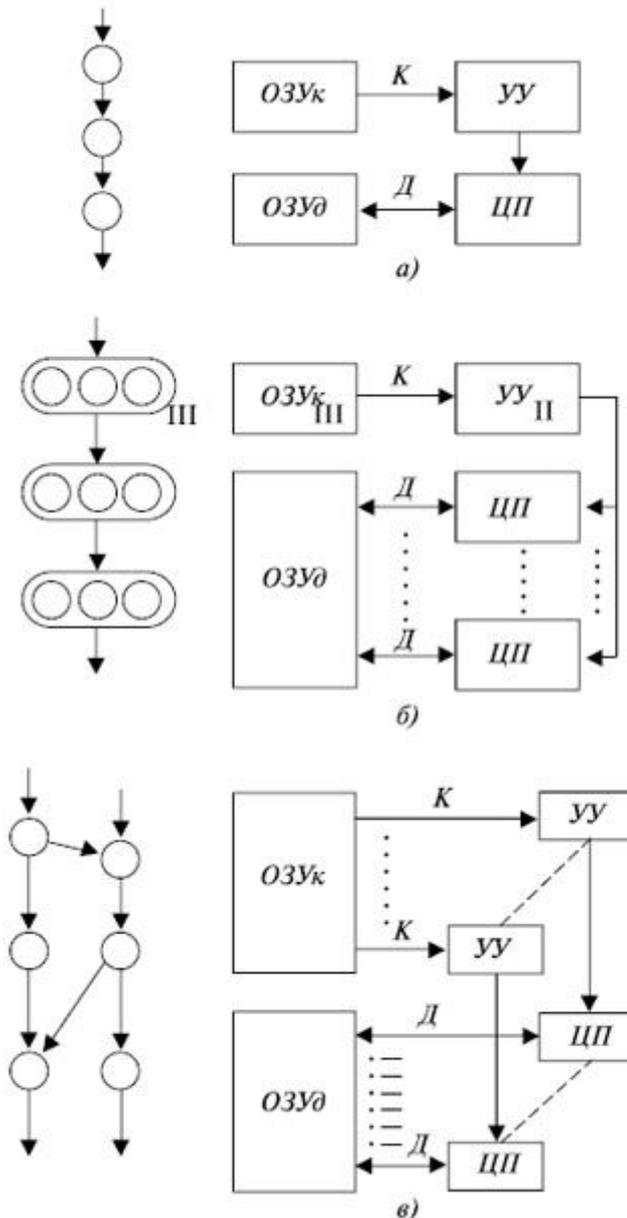


Рис. 6.1. Классификация параллельных ЭВМ: а) ЭВМ класса ОКМД; алгоритм последовательно-групповой, в) ЭВМ класса МКМД; алгоритм параллельный, слабосвязанный

Супер-ЭВМ класса *МКМД* называют *суперскалярными высокопараллельными многопроцессорными системами*. Поскольку эти ЭВМ реализуют алгоритм вычислений со слабосвязанными множественными потоками команд и данных общего вида, они являются универсальными и обеспечивают выигрыш в производительности по сравнению со скалярными на большинстве задач, решаемых в области САПР. Супер-ЭВМ этого класса имеют множество процессоров, причем каждый из процессоров обрабатывает свои данные под управлением своего потока команд. Наиболее сложной проблемой для таких

супер-ЭВМ является синхронизация обмена данными между задачами, запущенными на нескольких процессорах, и синхронизация ожидания одних запущенных задач (процессов) другими.

Аппаратная связь между процессорами *МКМД* ЭВМ осуществляется тремя способами:

- использование общей шины, соединяющей несколько процессоров;
- использование общего многопортового ОЗУ, доступного для всех МП;
- использование микросхем коммутации перекрестных связей, осуществляющих переключения информационных связей МП между собой по принципу "каждый с каждым".

При наличии общей шины, соединяющей несколько МП, возникают конфликты между МП за право монопольного обмена по шине, что снижает эффективность такой ЭВМ. Этот недостаток привел к тому, что в настоящее время такой вид связи между МП почти не применяется.

Использование общего многопортового ОЗУ предъявляет очень жесткие требования к *устройству управления* ОЗУ и к надежности самой памяти. Несмотря на этот недостаток, *МКМД* супер-ЭВМ с общей многопортовой памятью довольно широко используются в САПР.

Наиболее перспективны многопроцессорные комплексы, в которых отдельные МП соединяются друг с другом с помощью коммутаторов перекрестных связей на основе быстро развивающихся КМОП-переключателей.

Поскольку в параллельных ЭВМ трудно теоретически оценить производительность для решения различного класса задач, их производительность оценивается экспериментально с использованием текстовых пакетов и выражается в миллионах операций с плавающей точкой в секунду — Мфлопс.

Параллельные супер-ЭВМ — это уникальные дорогие компьютеры, поэтому они являются ЭВМ коллективного пользования, работающими под управлением ОС с разделением времени. Они оснащены высокоскоростными адаптерами связи с региональными и глобальными вычислительными сетями и связаны с РС разработчиков РЭС с помощью САПР через сетевые каналы связи.

Промежуточным уровнем технических средств САПР между супер-ЭВМ и РС, ПК выступает ЭВМ среднего класса: типа ЕСЭВМ у нас в стране и ES-9000 за рубежом, — либо супермини-ЭВМ типа "Электроника-82" у нас в стране и VAX, MicroVAX — за рубежом. Эти ЭВМ обладают производительностью выше, чем РС и ПК (свыше 5...10 Мфлопс), требуют существенных эксплуатационных расходов, являются компьютерами коллективного пользования с ОС разделения времени и выполняют функции обслуживания внутренних ЛВС фирм и выхода на глобальные и региональные сети при необходимости ведения расчетов на супер-ЭВМ. В последнее время в связи с использованием САПР средними и мелкими фирмами падает спрос на эти дорогостоящие промежуточные ЭВМ на рынке технических средств САПР. В качестве промежуточных звеньев для предоставления сетевых соединений выступают различного рода РС-серверы.

РС-сервер — это РС с расширенным (по объему или номенклатуре) набором периферийных устройств. В качестве одной из задач в ОС такой станции запускается процесс-сервер-программа, обслуживающая пользователей других РС через сеть, предоставляя им периферию данной РС либо сетевое соединение через региональную сеть с супер-ЭВМ. В соответствии с этим различают файл-серверы (РС с дополнительными ВЗУ), серверы сетевой связи (РС с расширенным набором сетевых адаптеров данной ЛВС с другими — ЭВМ-шлюз), вычислительные серверы (РС с повышенной производительностью) и т. д. Все эти РС, ПК и ЭВМ других классов объединяются (комплексируются) для эффективного использования области САПР вычислительными сетями.

Преимущества такого комплексирования заключаются в расширении функциональных возможностей САПР (каждый пользователь в том или ином подразделении имеет доступ к базам данных и программным средствам в других территориально удаленных подразделениях), в оптимизации распределения нагрузки между различными ЭВМ, в коллективном использовании дорогостоящей графической периферии, в повышении надежности функционирования технических средств САПР.

Существует следующая классификация вычислительных сетей:

- по топологии связей: радиальные (звездообразные), магистральные, кольцевые, радиально-кольцевые, древовидные, полные (многосвязные);
- по составу ЭВМ: однородные и неоднородные;
- по способу передачи данных: сети с коммутацией каналов, сообщений или пакетов;
- по способу управления: централизованные (с централизованным управлением) и децентрализованные;
- по удаленности узлов: локальные (в пределах здания, ряда зданий), региональные (охватывающие регион, область) и глобальные (охватывающие страны и континенты).

6.2. Режимы работы технических средств САПР

Состав технических средств базовых конфигураций САПР различных уровней в значительной степени определяется характером проектных задач. Существует взаимосвязь между классом решаемых задач и режимом использования ЭВМ. Рассмотрим задачи, решаемые в САПР, с целью выделения характеристик, определяющих выбор различных режимов работы ЭВМ.

По характеру вычислительного процесса решаемые задачи можно разделить на две основные группы: задачи, решаемые без участия пользователя, и задачи, в процессе решения которых необходимо участие пользователя.

По сложности вычисления задачи бывают:

- первой группы: задачи, на решение которых требуется более нескольких минут; задачи, время счета которых измеряется секундами;
- второй группы: время взаимодействия с пользователем соизмеримо с временем счета задачи; время решения велико по сравнению со временем диалога.

По объему информации задачи, решаемые в САПР, можно разделить на монопольно использующие основную память ЭВМ и частично использующие основную память ЭВМ.

Исходя из этой классификации решаемых задач САПР можно выделить следующие *необходимые режимы работы технических средств*:

- *однопрограммный режим*, при котором решаемой задаче доступны все ресурсы ЭВМ;
- *мультипрограммный режим* с фиксированным количеством задач; при таком режиме ОП ЭВМ делится на фиксированное число разделов, которые определены для выполнения одной задачи в каждом; некоторые внешние устройства (ВУ) могут быть назначены для использования несколькими задачами;
- *мультипрограммный режим* с переменным числом задач, все ресурсы ЭВМ общие.

Режим работы технических средств можно классифицировать по удалению проектировщика от основного компонента технических средств:

- *местный режим*, при котором пользователь работает непосредственно у ЭВМ;
- *дистанционный режим*, при котором часть периферийного оборудования связана с процессором канала связи.

Режим работы технических средств можно классифицировать по степени участия пользователя в процессе решения задач:

- *пакетный режим*, когда пользователь составляет задание на выполнение программы, которое в составе пакета заданий запускается для обработки на ЭВМ. Обработка задач производится по очереди. После решения пользователю требуется проанализировать результаты обработки своего задания и подготовить новый вариант, что замедляет отладку и увеличивает время получения окончательных результатов;

- *режим разделения времени (РРВ)*, при котором каждой решаемой задаче поочередно выделяется определенный квант времени работы процессора. Пользователь во время сеанса работы за абонентским пунктом, используя средства системы разделения времени (СРВ), может составить, протранслировать, отредактировать программу и приступить к ее выполнению, непосредственно контролируя происходящий процесс. Степень готовности программы зависит от подготовленности пользователя к работе с СРВ.

От выбора правильного режима использования технических средств САПР зависит эффективность эксплуатации технических средств. Поэтому при создании конкретной САПР определенного уровня необходимо провести четкий анализ решаемых задач.

Пакетный режим обработки информации предпочтительнее для задач с большим временем счета и задач, не требующих вмешательства в процесс решения пользователя.

Режим разделения времени удобнее для задач, время счета у которых соизмеримо со временем отклика пользователя на запрос ЭВМ, а также когда необходимо вмешательство пользователя в процесс решения.

Лекция 7. Технические средства САПР и их развитие (окончание)

7.1. Периферийное оборудование САПР

Помимо РС, ПК и других ЭВМ для организации САПР РЭС требуется дорогостоящее периферийное оборудование. Периферийное оборудование ЭВМ — это совокупность технических и программных средств, обеспечивающих взаимодействие ЭВМ с пользователем и внешней средой, а также хранение, подготовку и преобразование информации к виду, удобному для ввода/вывода.

Периферийное оборудование подразделяется на две группы: *локальное*, устанавливаемое рядом и подключаемое непосредственно к ЭВМ, и *удаленное (терминальное)*. По выполняемым функциям и *локальное*, и *терминальное* оборудование включают в себя средства хранения, телеобработки и ввода/вывода информации. Средства взаимного общения с пользователем должны осуществлять представление и ввод информации в основном в графической форме.

В настоящее время существуют различные методы ввода и регистрации графической информации: высвечивание точек и линий на экране монитора, нанесение точек, вычерчивание линий и символов изображения на бумаге (в том числе специальной), изменение цвета бумаги путем химической (термической) реакции, электризация поверхности фотополупроводника, проецирование изображения с помощью луча лазера и другие.

Каждый метод и устройства, реализующие его, имеют свои достоинства и недостатки. Основными критериями для их сравнения являются:

- качество изображения;
- скорость формирования изображения;
- стоимость оборудования и его эксплуатации;
- особенности программного обеспечения.

По программному обслуживанию периферийные устройства САПР делятся на два класса: *растровые* и координатные (векторные).

В *растровых устройствах* выводится мозаичный рисунок из отдельных точек — *пикселей*, или ПЭЛов (от англ. picture element), по типу телевизионной развертки. При этом осуществляется последовательный перебор элементов мозаики и выделение *пикселей*, составляющих изображение. Время вывода изображения постоянно, не зависит от сложности рисунка и определяется только числом элементов мозаики (*пикселей*) и скоростью их перебора.

При **векторном** способе осуществляется последовательное вычерчивание линий, составляющих изображение. Время ввода/вывода изображения пропорционально суммарной длине линий (в том числе с учетом "невидимых" линий). Для сложных изображений время вывода может быть достаточно велико.

В современных САПР широкое применение находят оба типа устройств. Все периферийные устройства делятся на три основные группы:

- средства ввода/вывода с машинных носителей;
- средства ввода/вывода с документов;
- средства непосредственного взаимодействия с ЭВМ.

Первая группа средств включает в себя накопители на магнитных дисках или накопители на магнитных лентах (стримеры), представляющие собой обычные ВЗУ.

Средства ввода/вывода с документов имеют свою специфику для ввода/вывода текста и графической информации. К ним относятся различные *печатающие устройства* (принтеры), *графопостроители*, планшеты, *сканеры*.

Средства непосредственного взаимодействия с ЭВМ включают в себя устройства отображения алфавитно-цифровой и графической информации (*дисплеи*, проекционные системы), акустические устройства ввода/вывода информации, устройства связи с реальными объектами (датчики, исполнительные устройства), а также средства ручного

ввода информации: алфавитно-цифровую клавиатуру, различные планшеты и манипуляторы (электронная "мышь", управляющие ручки — джойстики, управляющий шар — трекбол).

Наиболее распространенным электронным средством отображения информации является *дисплей*. Большинство современных *дисплеев* РС и ПК строится на основе платы графического адаптера (графического процессора) и монитора.

Требования к качеству графического изображения в задачах САПР весьма велики, поэтому обычные графические адаптеры ПК стандарта VGA (640x480 точек разрешения, 256 цветов и ниже) не подходят для визуализации изображений. Существует несколько видов изображений в пакетах САПР:

- высококачественные черно-белые двухмерные изображения (чертежи, эскизы);
- цветные или полутоновые двумерные изображения (топология БИС, печатных плат);
- каркасные трехмерные проекции конструкторских чертежей, эскизов и т. д. с удалением и без удаления невидимых линий;
- проекции трехмерных изображений с закрашиванием поверхностей;
- проекции реалистичных трехмерных изображений с учетом отражательных характеристик поверхностей объектов и формированием светотеней.

Наиболее простые черно-белые изображения и каркасные трехмерные изображения могут строиться векторными методами. Остальные виды изображений требуют растровой цветной (полутоновой) графики с высоким разрешением и богатой цветовой палитрой.

Для изображений среднего качества могут быть использованы графические адаптеры мощных ПК типа SVGA с разрешением не менее 1024x768 точек, 256 цветов и адаптеры наиболее недорогих РС, например семейства SUN с разрешением 1152x900, 256 цветов.

Для визуализации реалистичных трехмерных изображений, конструкций сложных объектов и многослойных топологий БИС требуются более высокие быстродействие и разрешение графических адаптеров. Такие графические адаптеры называют графическими процессорами, а РС с графическим процессором и цветным монитором повышенного разрешения и размера по диагонали (19 дюймов и выше) — графической рабочей станцией. Так, в графической РС фирмы IBM PS-730 используется плата графического процессора, обеспечивающая разрешение 1280x1024 точки с более чем 4 млрд оттенков цветов. Быстродействие такой графической станции при визуализации изображений — 990 тыс. трехмерных графических преобразований в секунду, что эквивалентно воспроизведению 120 тыс. трехмерных треугольников с закрашиванием в секунду.

В связи с высокими требованиями к качеству изображений в области САПР доминируют цветные и полутоновые мониторы на электроннолучевых трубках с повышенными разрешением, строчной и кадровой развертками. Ведутся интенсивные разработки высококачественных мониторов на жидких кристаллах. Следует отметить быстрое развитие лазерных проекционных систем визуализации изображений на больших плоских экранах с повышенным разрешением до 1024x1024 точек. В этом случае развертка луча лазера производится зеркальными механическими отклоняющими системами либо электронными системами на базе акустооптических дефлекторов.

Устройства графического вывода (*печатающие устройства* — принтеры, *графопостроители*) занимают ведущее место среди номенклатуры периферийных устройств на рынке технических средств САПР (более 2/3 от всей оконечной аппаратуры). Сложилось разделение устройств вывода на *печатающие устройства* и *графопостроители*, однако границы их использования для вывода текста и графики в последнее время все более размываются.

Печатающие устройства по порядку вывода делятся на:

- посимвольные, в которых вывод алфавитно-цифровой информации осуществляется последовательно символ за символом за один цикл печати;
- построчные, которые формируют и выводят за один цикл печати всю строку;
- постраничные, которые формируют и выводят целиком страницу за один цикл печати.

По физическому принципу различают *печатающие устройства* ударного и безударного действия. В первом случае изображение получают в результате удара по носителю записи специальным органом — молоточком, стержнем или иглой. В устройствах безударного действия изображение выводится в результате физико-химического, электрического и другого воздействия на оконечный носитель записи (бумагу) или некоторый промежуточный носитель (специальную пленку, различные барабаны, пластины).

Наиболее популярны среди принтеров ударного действия матричные *печатающие устройства*, в которых изображения (знаки) формируются специальной головкой, содержащей стержни — иглы, возбуждаемые электромагнитным или пьезоэлектрическим приводом. В простых моделях головок — 9-12 игл, в более сложных — 18-24. Сложные модели обеспечивают достаточно высокое качество печати, но низкое быстродействие. К недостатку *печатающих устройств* ударного действия относится также наличие большого количества механических элементов, работающих при высоких динамических нагрузках, и связанные с этим ограниченный ресурс, повышенный уровень шума и ненадежность.

Печатающие устройства безударного действия относятся к матричным устройствам. Изображение формируется из отдельных точек с четкостью от 3 до 32 точек на 1 мм. В большинстве из них применяется одинаковый принцип: формирование скрытого электрического или магнитного изображения на промежуточном носителе, далее происходит его визуализация и перенос на бумагу. Среди безударных *печатающих устройств* наиболее популярны *термопечати, струйные устройства* и *лазерные печати*.

Термопечатающие устройства используют термопечатные головки (терморезисторы) и копировальные пленки (5-10 мкм) с легкоплавким красящим слоем. Локальный нагрев пленки у красителя приводит к переносу отпечатка на бумагу. В таких устройствах достигаются высокая четкость (6-12 точек на 1 мм), высокая контрастность, легко реализуется многоцветность изображения.

Струйные печатающие устройства относятся к посимвольным матричным устройствам. Существует два типа таких печатей: с непрерывной капельной струей и импульсные (ждущие). В первых заряженные капельки красителя летят мимо отклоняющей системы и формируют символы (графику) на бумаге. Скорость такой печати — до 300 см²/мин при разрешении 20 точек на 1 мм. В ждущих принтерах капли вылетают лишь тогда, когда необходимо сформировать символ. В них используются многосопловые (до 9-12 сопел и более) струйные головки, обеспечивающие плотность записи 4-12 точек на 1 мм. Возбуждение капсул-инъекторов осуществляется пьезоэлементом или нагревом микрорезистора.

Наибольшую популярность в настоящее время имеет ***лазерная печать***, обеспечивающая очень высокую скорость печати (до 10 страниц в минуту) при высокой четкости — до 32-40 точек на 1 мм. В таких устройствах изображение регистрируется электрографическим способом. Лазер создает скрытое изображение на барабане, а его визуализация осуществляется специальным порошком — тонером с тепловым закреплением на бумаге. При этом луч лазера по одной координате разворачивается механически с помощью зеркальной многогранной призмы, а по другой координате — электронным способом с помощью акустооптического дефлектора. Управляет работой *лазерной печати* мощная микро-ЭВМ, формируя страницы вывода, получаемые от РС или ПК. К недостаткам *лазерной печати* следует отнести ее относительно высокую стоимость

и сложность формирования цветных изображений. *Лазерные* принтеры обычно используются коллективно несколькими пользователями через ЛВС. Лидером в производстве *лазерных печатей* является фирма Hewlett-Packard. Параметры одного из относительно недорогих *лазерных* принтеров HP LaserJet II P:

- номинальная скорость печати — 4 стр./мин;
- емкость лотка для подачи бумаги — 50 листов;
- емкость приемного лотка — 20, 50 листов;
- минимальная емкость буферной памяти — 512 Кб;
- максимальная емкость буферной памяти—4,5 Мб;
- *интерфейсы* с ЭВМ — последовательный и параллельный;
- ресурс кассеты с тонером — 3500 страниц;
- масса — 10 кг.

Графопостроители подразделяются на два основных типа: растровые и векторные (координатные).

Растровые устройства по своей конструкции близки к принтерам безударного действия и используют электрохимический, электротермический и другие принципы работы. Пишущий узел в них представляет собой гребенку электродов, образующую растр во всю ширину бумаги. Специальная бумага перемещается в одну сторону ведущим барабаном; при подаче напряжения на те или иные электроды и общий электрод проходит химическая или термическая реакция и возникает отпечаток на бумаге. Разрешающая способность таких устройств — 4-8 точек на 1 мм. Достоинство *растровых устройств* — высокая скорость работы, не зависящая от сложности изображения; недостаток — сложность конструкции системы управления напряжением на электродах гребенки.

Векторные (координатные) графопостроители относятся к электромеханическим устройствам и выполняются в двух видах: планшетном и рулонном. В планшетном *графопостроителе* бумага фиксируется, а пишущий узел закреплен на каретке, установленной, в свою очередь, на движущейся планке. Тем самым каретка может перемещаться в любую точку планшета. Используется векторный способ управления *графопостроителем* путем подачи аналоговых или дискретных (шаговых) сигналов, пропорциональных изменениям координат при перемещении пишущего узла. Для вывода сложных кривых применяется линейная, линейно-круговая или параболическая интерполяция с помощью специальной управляющей микро-ЭВМ, входящей в состав *графопостроителя*.

В рулонном *графопостроителе* планка неподвижна, а барабан или валик перемещает бумагу. Рулонный *графопостроитель* более автоматизирован в работе, чем планшетный, однако для него нельзя использовать произвольные листы, бланки и т. п.

Основное назначение *устройств ввода* графической информации заключается в преобразовании аналоговых объектов изображения в дискретную форму представления в ЭВМ. Устройства ввода включают в себя как средства ввода информации с документов, так и органы ручного ввода при непосредственном взаимодействии с ЭВМ.

При вводе осуществляются две основные операции: поиск, выделение (считывание) изображения и кодирование информации. По степени автоматизации операции считывания изображения устройства ввода разделяются на полуавтоматические и автоматические. В первых поиск элементов осуществляется вручную, а кодирование информации — автоматически; во вторых устройствах и считывание, и кодирование информации производятся автоматически с помощью ЭВМ.

Для управления маркером на *дисплее* и ввода команд используются ручные манипуляторы: электронная "мышь", управляющая ручка — джойстик, управляющий шар — трекбол. Во всех манипуляторах вращение сферы передается на движки потенциометров — валюаторов. Тем самым изменяются сигналы, соответствующие текущим координатам. Такие устройства относятся к дисплейным указателям, так же как алфавитно-цифровая и функциональная клавиатура, световое перо, сенсорный экран.

Среди полуавтоматических устройств ввода изображений наиболее популярны полуавтоматические *сканеры*, в которых чувствительный элемент считывания изображения перемещается по элементам изображения рукой человека. Автоматические устройства ввода изображений выполняют считывание информации без участия человека. Существует два типа автоматических устройств ввода: следящие — аналог векторных устройств вывода — и сканирующие (*растровые*).

Следящие устройства ввода выполняют слежение за линией и устанавливаются либо на *графопостроитель*, либо на специальную координатную систему. Возможности следящей системы ограничены сложностью рисунка, числом пересечений, типом линий.

В сканирующих устройствах (*сканерах*) осуществляется растровое представление вводимого документа, выполняется распознавание образов, символов, знаков; далее изображение может быть графически отредактировано на *дисплее* и выведено на *растровое устройство* вывода. В автоматических и полуавтоматических *сканерах* в качестве чувствительного элемента используется однокоординатная линейка фотоприемников или линейка приемников на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). По другой координате перемещение линейки осуществляется вручную или автоматически с помощью шагового двигателя. Поверхность считываемого изображения освещается светодиодами, что улучшает равномерность засветки и качество считываемого изображения. *Сканеры* на основе таких систем позволяют получать четкость картинки до нескольких десятков точек на 1 мм. Для быстрого ввода в ЭВМ изображений, сравнимых по четкости с телевизионным, применяются автоматические *сканеры* на основе телевизионных камер с приемной ПЗС-матрицей и высококачественной широкоугольной оптикой.

К средствам непосредственного взаимодействия с ЭВМ относятся и акустические системы ввода/вывода информации. Средства акустического ввода подразделяются на устройства ввода изолированной и дискретной речи (отдельные команды) и устройства ввода слитной речи. Средства акустического вывода делятся на устройства синтеза звуков, устройства синтеза речи по правилам синтеза и по образцам. Синтез по правилам ведет к созданию искусственной речи; синтез по образцам заключается в кодировании естественной речи для последующего воспроизведения (так называемые компилятивные синтезаторы).

Технические средства САПР динамично развиваются в сторону максимально быстрой реакции на любую команду человека и организации ввода/вывода любой информации в виде, естественном для специалиста проблемной области, в которой функционирует конкретная САПР.

Лекция 8. Методическое обеспечение САПР. Математический и лингвистический виды обеспечений

8.1. Назначение и состав методического обеспечения САПР

Методическое обеспечение САПР включает в себя: теорию процессов, происходящих в схемах и конструкциях РЭС; методы анализа и синтеза схем и конструкций радиоэлектронных устройств, систем и их составных частей, их математические модели; математические методы и алгоритмы численного решения систем уравнений, описывающих схемы и конструкции РЭС. Указанные компоненты *методического обеспечения* составляют ядро САПР. В *методическое обеспечение* САПР входят также алгоритмические специальные языки программирования, терминология, нормативы, стандарты и другие данные. Разработка *методического обеспечения* САПР РЭС требует специальных знаний в областях радиотехники, электроники, в частности, системотехники, схемотехники и микроэлектроники, конструирования и технологии производства РЭС. Следовательно, разработка *методического обеспечения* САПР РЭС — прерогатива специалистов в области радиотехники и электроники.

Обычно в качестве обособленных блоков в *методическом обеспечении* выделяются *математическое* и *лингвистическое* обеспечения.

Математическое обеспечение — это совокупность математических моделей, методов и алгоритмов для решения задач автоматизированного проектирования.

Лингвистическое обеспечение представляет собой совокупность языков, используемых в САПР для представления информации о проектируемых объектах, процессе и средствах проектирования и для осуществления диалога между проектировщиками и ЭВМ.

Если *математическое* и *лингвистическое* обеспечения являются полностью самостоятельными в составе САПР, то под *методическим обеспечением* САПР понимают входящие в ее состав документы, регламентирующие порядок ее эксплуатации.

Документы (методики, организационные, директивные документы), относящиеся к процессу создания САПР, не входят в состав *методического обеспечения*. Данное уточнение весьма принципиально, так как даже специалисты в области САПР нередко рассматривают *методическое обеспечение* САПР как методы их разработки.

Однако отдельные документы, выпущенные при создании и для создания САПР, могут войти в состав САПР и использоваться при ее эксплуатации. Например, для создания САПР разрабатываются структуры и описания баз данных, инструкции по их заполнению и ведению. Эти документы могут остаться неизменными и стать частью *методического обеспечения* САПР. Порядок разработки такого рода документов, относящихся к процессу создания САПР и затем включаемых в ее состав, а также обязательный состав эксплуатационных документов определены государственными стандартами.

Компоненты *методического обеспечения* создаются на основе перспективных методов проектирования, поиска новых принципов действия и технических решений, эффективных математических и других моделей проектируемых объектов, применения методов многовариантного проектирования и оптимизации, использование типовых и стандартных проектных процедур, стандартных вычислительных методов.

Совершенствование организации работ в области автоматизации проектирования направлено на централизованное создание типовых *программно-методических комплексов (ПМК)* в целях их широкого тиражирования. Такие комплексы должны включать наряду с программами для вычислительной техники и базами данных еще комплекты документации. При применении *ПМК* указанная документация становится частью *методического обеспечения* САПР.

8.2. Математическое обеспечение САПР

Основу этого компонента САПР составляют алгоритмы, по которым разрабатывается программное обеспечение САПР и, следовательно, осуществляется процесс автоматизирования проектирования САПР. *Математическое обеспечение (МО)* при автоматизированном проектировании в явном виде не используется, а применяется производный от него компонент — программное обеспечение.

Вместе с тем разработка *МО* является самым сложным этапом создания САПР, от которого при использовании условно одинаковых технических средств в наибольшей степени зависят производительность и эффективность функционирования САПР в целом.

МО любых САПР по назначению и способам реализации делится на две части. Первую составляют математические методы и построенные на их основе математические модели, описывающие объекты проектирования или их части или вычисляющие необходимые свойства и параметры объектов.

Вторую часть составляет формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.

В составе любой САПР эти части *МО* должны органично взаимодействовать.

Способы и средства реализации первой части *МО* наиболее специфичны в различных САПР и зависят от особенностей процесса проектирования.

Развитие и совершенствование методов в данной части — процесс постоянный. Создание САПР стимулирует эти работы, и прежде всего — в части разработки оптимизационных методов проектирования.

Сложнее обстоит дело с разработкой второй части *МО*. Формализация процессов автоматизированного проектирования в комплексе оказалась более сложной задачей, чем алгоритмизация и программирование отдельных проектных задач. При решении задач данной части должна быть формализована вся логика технологии проектирования, в том числе логика взаимодействия проектировщиков друг с другом с использованием средств автоматизации. Указанные проблемы решались и решаются в настоящее время эмпирическим путем, главным образом методом проб и ошибок.

Следовательно, *МО* САПР должно описывать во взаимосвязи объект, процесс и средства автоматизации проектирования. Для совершенствования *МО* выделяют два направления работ:

1. Развитие методов получения оптимальных проектных решений, в том числе ориентированных на автоматизированное проектирование.

2. Совершенствование и типизацию самих процессов автоматизированного проектирования.

Анализ существующих методов решения оптимизационных задач автоматизированного проектирования показал следующее:

- к числу важнейших вопросов методологии современного проектирования относится выбор критериев эффективности вариантов проектных решений, что, как правило, требует решения многокритериальных задач оптимизации;
- теоретически наиболее эффективными при поиске оптимальных проектных решений являются методы нелинейного математического программирования;
- в связи с практической сложностью и высокой трудоемкостью поиска оптимальных проектных решений с помощью точных математических методов существует поиск эффективных проектных решений на основе создания специальных "банков знаний" (фондов описаний объектов, технических решений, а также типовых эвристических методов).

8.3. Лингвистическое обеспечение САПР

Это совокупность языков, используемых в процессе разработки и эксплуатации САПР для обмена информацией между человеком и ЭВМ. Термином "язык" в широком смысле называют любое средство общения, любую систему символов или знаков для обмена информацией.

Лингвистическое обеспечение САПР состоит из языков программирования, проектирования и управления.

Языки программирования служат для разработки и редактирования системного и прикладного программного обеспечения САПР. Они базируются на алгоритмических языках — наборе символов и правил образования конструкций из этих символов для задания алгоритмов решения задач.

Языки проектирования — это проблемно-ориентированные языки, служащие для обмена информацией об объектах и процессе проектирования между пользователем и ЭВМ.

Языки управления служат для формирования команд управления технологическим оборудованием, устройствами документирования, периферийными устройствами ЭВМ.

Существуют различные уровни языков программирования: высокие, более удобные для пользователя, и низкие, близкие к машинным языкам.

Программа, записанная на некотором языке программирования высокого уровня, называется *исходной*. Прежде чем *исходная программа* будет исполнена, она должна быть преобразована в машинную форму, соответствующую ЭВМ данного типа. Подобные преобразования осуществляются специальными программами, называемыми **языковыми процессорами**.

Основные типы языковых процессоров — трансляторы и интерпретаторы; соответственно преобразования программ называют *трансляцией* и *интерпретацией*.

Трансляцией называют перевод всего текста программы на исходном языке (*исходной программы*) в текст на объектном языке (объектную программу). Если исходный язык является языком высокого уровня, а объектный — машинным, то транслятор называют **компилятором**. Если исходный язык — машинно-ориентированный (в автокоде), а объектный — машинный, то транслятор называют **ассемблером**. Если исходный и объектный языки относятся к одному уровню, то транслятор называют *конвертером*.

По методу *трансляции* (компиляции) сначала *исходная программа* переводится на машинный язык, а затем скомпилированная рабочая программа исполняется.

При *интерпретации* перевод *исходной программы* в рабочую совмещены во времени; очередной оператор *исходной программы* анализируется и тут же исполняется.

В большинстве случаев применение трансляторов приводит к меньшим затратам машинного времени, но к большим затратам машинной памяти, чем при *интерпретации*.

Совокупность языка программирования и соответствующего ему языкового процессора называют *системой программирования*.

Классификация языков программирования представлена на рис. 8.1.

Класс машинно-зависимых языков представлен **Ассемблером** (макроассемблером). Он относится к языкам низкого уровня и применяется для написания программ, явно использующих специфику конкретной аппаратуры.

К машинно-ориентированным языкам относится язык СИ (разработан в 1972 г.). В нем объединяются достоинства низкоуровневых возможностей ассемблеров и мощных выразительных средств языков программирования высокого уровня. Язык СИ является одним из претендентов на роль основного языка программирования в САПР и ориентирован на разработку системных программ. Он, в частности, послужил главным инструментом для создания операционных систем для ЭВМ UNIX и MS DOS.

Язык *Фортран* является первым универсальным языком высокого уровня (с 1954 г.). Наиболее эффективен при численных расчетах, прост по структуре и удобен при выполнении программ. Несмотря на свои недостатки, этот язык получил большое распространение при разработке прикладных программ для решения научных задач. Самая популярная в настоящее время версия этого языка — Фортран-77.

Идеи Фортрана получили развитие в языке *PL/I* (создан в 1964 г.). В нем сделана попытка преодолеть некоторые недостатки, свойственные языкам для больших ЭВМ, и

использованы идеи структурного программирования. В настоящее время имеются различные версии этого языка: PL/M, PL/Z, PL/65 и др. Как язык программирования PL/M, в частности, значительно уступает конкурирующим с ним языкам Паскаль и Модула-2.

Язык *Паскаль* является одним из наиболее популярных языков программирования и применяется для разработки системных и прикладных программ, в частности, для персональных ЭВМ. Язык Паскаль создан вначале исключительно для учебных целей и изящно реализовал большинство идей структурного программирования.

Достоинства языка оказались столь значительными, что он приобрел огромную популярность для самых различных приложений.

В частности, компилятор Turbo Pascal, снабженный интерактивным редактором, позволяет создавать достаточно сложное программное обеспечение — системы управления базами данных, графические пакеты и т. д.

Развитием Паскаля являются языки *Модула-2* (в Европе) и *Ада* (в США). Язык Модула-2 обладает лучшими средствами для обработки больших программных комплексов и позволяет более эффективно использовать особенности аппаратуры. Таким образом, этот язык призван заполнить ниши между Паскалем и СИ. По оценке специалистов, язык Модула-2 через несколько лет станет наиболее популярным среди всех языков программирования.

Язык *Ада* можно назвать наиболее универсальным среди созданных языков. Однако трансляторы с этого языка пока не получили достаточного распространения.

Язык *Алгол* — общепризнанный язык для публикации алгоритмов решения научных задач, построен на четких и полных определениях. Для Алгола характерны строгие, но негибкие структуры данных и программ. Алгол труден для реализации на большинстве ЭВМ, поэтому используются неполные варианты языка или его расширения.

Язык *Кобол*, разработанный для решения экономических задач, будучи широко распространен на больших и средних ЭВМ прошлых лет, на персональных ЭВМ почти не применяется. На ЭВМ имеются интегрированные системы, базы данных и другие типы прикладных систем, используемые в задачах экономического и управленческого характера.

Самыми распространенными на ЭВМ являются различные версии языка *Бейсик*, простота которого делает его превосходным средством для начинающих программистов. В языке встроены удобные функции для работы с экраном дисплея, клавиатурой, внешними накопителями, принтером, каналами связи. Это позволяет относиться к Бейсику как к продолжению аппаратуры ПЭВМ. Системы Бейсика работают в режиме *интерпретации*, что способствует сокращению характерного цикла в работе программиста: составление программы — пробное исполнение — исправление ошибок — повторное исполнение. Бейсик наряду с Паскалем принят во многих учебных заведениях как базовый язык для изучения программирования.



Рис. 8.1. Классификация языков программирования

Язык *АПЛ* применяется для обработки структурных данных (векторов, матриц) и использует иероглифическую запись программных текстов. Из-за большого числа иероглифов (около 100) его иногда называют китайским Бейсиком.

К классу проблемно-ориентированных языков можно отнести Лого, CPSS, Форт и Смолток.

Язык *Лого* — диалоговый процедурный язык, реализованный на принципе *интерпретации* и работающий со списками, текстами, графическими средствами и т. д. Язык очень перспективен для обучения, создания электронных игрушек и т. д.

Развитием проблемно-ориентированных языков является объектно-ориентированный подход (языки Смолток, Форт, Модула и Ада). Отличительными особенностями таких языков можно назвать модульность построения процедур, абстракцию данных, динамическую связку программ (позволяет отказаться от перекомпилирования всей программы при внесении изменений в отдельные модули) и использование механизма наследования иерархического типа.

К недостаткам таких языков относятся некоторая замедленность выполнения программ из-за их динамической связи и сложность трансляторов.

Язык *Смолток* предназначен для решения нечисловых задач при построении систем искусственного интеллекта. В языке *Форт* применены структурное программирование и очень компактный машинный код.

Для разработки систем искусственного интеллекта также используются функциональные языки *Лисп*, *Пролог* и *СНОБОЛ*. Эти языки ориентированы на обработку символьной информации, требуют больших массивов данных и стали применяться в ПЭВМ в связи с появлением дешевой полупроводниковой памяти, позволяющей довести объем ОЗУ до нескольких мегабайт. Языки этого класса относятся к так называемым языкам представления знаний.

Язык *Лисп* применяется для программирования интеллектуальных задач — общение на естественном языке, доказательство теорем, принятие решений и т. п.

Язык *Пролог* приобрел в последние годы большую популярность в связи с японским проектом создания вычислительных систем пятого поколения. Он предназначен для создания широкого класса систем искусственного интеллекта, в том числе и персональных экспертных систем.

При использовании САПР приходится не только решать задачи вычислительного характера и обработки данных, но и автоматизировать описание объектов, процессы ввода, вывода и редактирования данных, ввода графических изображений, схем, чертежей и т. п. Для этой цели служат *языки проектирования*.

Классификация языков проектирования приведена на рис. 8.2.

Языки проектирования делят на: входные, выходные, сопровождающие, промежуточные и внутренние.

Входные языки служат для задания исходной информации об объектах и целях проектирования. Во входных языках можно выделить две части: непроцедурную, служащую для описания структур объектов, и процедурную, предназначенную для описания заданий на выполнение проектных операций.



Рис. 8.2. Классификация языков проектирования

Языки сопровождения служат для непосредственного общения пользователя с ЭВМ и применяются для корректировки и редактирования данных при выполнении проектных процедур. В диалоговых режимах работы с ЭВМ средства языков входного, выходного и сопровождения тесно связаны и объединяются под названием *диалогового языка*. Современные диалоговые языки широко используют средства машинной графики (графический диалог). Диалог с ЭВМ может быть *пассивным*, когда инициатор диалога — система и от пользователя требуются только простые ответы, и *активным* при двусторонней инициативе диалога. Наиболее распространенная форма пассивного диалога — это система встроенных, в том числе иерархических, директивных меню.

Недиалоговые системы языков сопровождения ориентированы на пакетный режим работы ЭВМ.

Промежуточные языки используются для описания информации в системах поэтапной *трансляции исходных программ*. Введение таких языков облегчает адаптацию программных комплексов САПР к новым входным языкам, т.е. делает комплекс открытым по отношению к новым составляющим *лингвистического обеспечения*.

Внутренние языки устанавливают единую форму представления данных (текстовой и графической информации) в памяти ЭВМ по подсистемам САПР. Принимаются определенные соглашения об интерфейсах отдельных программ, что делает САПР открытой по отношению к новым элементам программного обеспечения.

В качестве примера современного *языка проектирования* можно указать язык VHDL (VHSIC — hardware description language) — язык описания аппаратуры на базе сверхвысокоскоростных интегральных схем. Этот язык принят в качестве стандарта как инструментальное средство автоматизации проектирования СБИС, ориентированное на методологию нисходящего проектирования. Он является достаточно универсальным, чтобы охватить все аспекты проектирования изделий в области цифровой электроники.

Лекция 9. Программное обеспечение САПР

9.1. Программное обеспечение САПР. Прикладное программное обеспечение САПР РЭС. Системное программное обеспечение

Программное обеспечение САПР представляет собой совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для автоматизированного проектирования. Физически в состав ПО входят:

- документы с текстами программ;
- программы, записанные на машинных носителях информации;
- эксплуатационные документы.

ПО конкретной САПР включает в себя программы и документацию для всех типов ЭВМ, используемых в данной САПР.

Составляющие *программного обеспечения САПР*, а также требования к его разработке и документированию установлены государственными стандартами.

ПО САПР подразделяется на *общесистемное* и *специализированное*.

Общесистемное ПО содержит набор программных средств, которые предназначены для повышения эффективности использования вычислительных комплексов САПР и производительности труда персонала, обслуживающего эти комплексы. К функциям *общесистемного ПО* относятся:

1. управление процессом вычислений;
2. ввод, вывод и частично обработка информации;
3. диалоговая взаимосвязь с пользователем в процессе проектирования;
4. решение общематематических задач;
5. хранение, поиск, сортировка, модификация данных, необходимых при проектировании, защита их целостности и защита от несанкционированного доступа;
6. контроль и диагностика работы вычислительного комплекса.

Три первые и последняя из указанных функций реализуются в современных вычислительных комплексах на базе *операционных систем (ОС)*, т.е. комплекса программ, управляющих ходом выполнения рабочих программ и использованием всех ресурсов вычислительного комплекса (ВК).

Для решения общематематических задач в состав *общесистемного ПО* включают соответствующие *библиотеки* стандартных программ. Для хранения и использования различных данных создаются специальные системы управления базами данных (СУБД).

Специализированное ПО включает в себя прикладные программы и пакеты прикладных программ (ППП), основной функцией которых является получение проектных решений.

Конкретный состав *общесистемного ПО* зависит от состава технических средств вычислительного комплекса САПР и устанавливаемых режимов обработки информации на этом комплексе.

Операционные системы включают в себя программы двух групп (рис. 9.1):

- *обрабатывающие программы*, составляющие подсистему подготовки программ пользователя (внешнее программное обеспечение);
- *управляющие программы*, образующие группу исполнения программ пользователя (внутреннее программное обеспечение).



Рис. 9.1. Структура общесистемного программного обеспечения САПР

К *обработывающим программам* относятся *трансляторы* с алгоритмических языков, *библиотеки* стандартных программ и системные *обслуживающие программы*.

Группа *управляющих программ* включает в себя программы управления задачами, заданиями и данными.

Программа управления задачами (*супервизор*, диспетчер, *монитор*, резидентная программа) находится в оперативной памяти и выполняет все необходимые диспетчерские функции — переключение с выполнения одной программы на другую, распределения ресурсов времени и оперативной памяти между программами. *Супервизор* реализует мультипрограммный режим работы ЭВМ или режим разделения времени.

Программы *управления заданиями* выполняют интерпретацию директив языка *управления заданиями*: ввод, трансляция, загрузка в память ЭВМ, решение, вывод информации.

Программы *управления данными* обеспечивают поиск, хранение, загрузку в оперативную память и обработку файлов.

Прикладное программное обеспечение представляют пакеты прикладных программ (ППП) для выполнения различных проектных процедур. Они разрабатываются на основе единого внутреннего представления графической и текстовой информации, единого входного языка, строятся по модульному принципу и ориентированы на использование непрограммистом-проектировщиком.

Различают несколько типов ППП в зависимости от состава пакета. Пакеты прикладных программ *простой* структуры характеризуются наличием только обрабатывающей части — набора функциональных программ (модулей), каждая из которых предназначена для выполнения только одной проектной процедуры. Объединение нужных модулей осуществляется средствами *операционной системы* ЭВМ.

Пакеты прикладных программ *сложной* структуры и *программные системы* появились в результате развития *прикладного программного обеспечения*. В первых из них имеется собственная управляющая часть — **монитор**, во вторых, кроме того, — **языковой процессор** с проблемно-ориентированным входным языком. Программные системы вместе с соответствующим лингвистическим и информационным обеспечением называют программно-методическими *комплексами САПР*.

Управляющая часть программного обеспечения имеет иерархическую организацию, и в общем случае в ней можно выделить различные уровни: уровень *операционных систем* вычислительной сети, *операционных систем* отдельных ЭВМ, *мониторных систем САПР* и *мониторов* отдельных ППП.

Основные функции управляющей части: связь с пользователем в режиме диалога, планирование вычислительного процесса, распределение вычислительных ресурсов, динамическое распределение памяти и другие.

Специализированное *ПО САПР* создается с учетом организации и возможностей *общесистемного программного обеспечения*. В целом состав и структура *ПО* определяются составом и структурой *САПР* и ее подсистем.

С развитием и совершенствованием вычислительной техники (ВТ) все большее значение приобретает такой компонент *общесистемного программного обеспечения*, как *операционная система*. Возможности, предоставляемые современными вычислительными комплексами, в большей степени определяются их *операционными системами (ОС)*, чем техническими устройствами.

Операционные системы организуют одновременное решение различных задач на ВТ, динамическое распределение каналов передачи данных и внешних устройств между задачами, планирование потоков задач и последовательности их решения с учетом установленных приоритетов, динамическое распределение памяти вычислительного комплекса, обеспечивают работу в различных режимах (с фиксированным и переменным числом задач в интерактивном режиме).

Операционные системы постоянно совершенствуются, развиваются, создаются новые *ОС* для новых поколений или семейств ВТ.

Системное программное обеспечение включает программы, осуществляющие управление, контроль и планирование вычислительного процесса, распределение ресурсов, ввод/вывод данных и другие операции в подсистемах *САПР*. Его подразделяют на две части. Первая часть — *общесистемное ПО*, которое представлено *операционными системами*. Они используются в *САПР*. Другая часть — *базовое программное обеспечение*, включающее программы обслуживания подсистем *САПР* (мониторные системы, СУБД, графические и текстовые редакторы).

К программному обеспечению предъявляются следующие требования:

- экономичность (эффективность по быстродействию и затратам памяти);
- удобство использования, применение простых проблемно-ориентированных языков;
- наличие средств диагностики ошибок пользователя;
- надежность и правильность получения результатов проектирования;
- универсальность по отношению к тем или иным ограничениям решаемых задач;
- открытость (адаптируемость) относительно внесения изменений в процессе эксплуатации программ;
- сопровождаемость, характеризующая работоспособность программ при внесении изменений в них;
- мобильность при перестройке программ с ЭВМ одного типа на ЭВМ другого типа.

Программное обеспечение целесообразно разрабатывать на основе принципов модульности и иерархичности. *Операционная система* является основным компонентом системного *программного обеспечения САПР*.

Принципы модульности и иерархичности позволяют организовать коллективную параллельную разработку различных частей программного обеспечения, создавать открытые программные системы, облегчают их комплексную отладку и информационное согласование.

Выделяют системный уровень разработки *прикладного программного обеспечения*, уровень прикладных программ и уровень подпрограмм (модулей).

Связи между отдельными программными модулями могут быть реализованы по управлению, информации, размещению и воздействию.

Связи модулей по *управлению* могут быть двух типов: последовательные связи между модулями без возврата в предыдущий модуль и иерархические связи с подчиненностью модулей различных уровней.

Связи модулей по *информации* проявляются в передаче числовых массивов в несколько модулей пакета. Этот аспект взаимодействия модулей затрагивает проблемы построения информационного обеспечения САПР.

Связи модулей по *размещению* указывают группы модулей, одновременно размещаемых в оперативной памяти на различных этапах проектирования.

Связи модулей по *воздействию* отражают такие воздействия одних программ на другие, которые приводят к изменению самих программ, например, воздействие языковых процессов на рабочие программы. Внутри рабочих программ связи модулей по воздействию стараются исключить.

К настоящему времени разработано большое количество пакетов прикладных программ САПР электрических и электронных средств. В качестве примеров можно привести ДИСП, САМРИС-2, СПАРС, АРОПС, КРОСС. Из зарубежных систем можно отметить пакеты Micro CAP, PSPICE, P-CAD, SPADE.

Значительное число этих пакетов ориентировано на автоматизацию проектирования печатных плат, цифровых и аналоговых интегральных схем, операционных усилителей, низкочастотных радиотехнических устройств.

Однако на данное время существует недостаточно пакетов программ проектирования радиочастотных, в том числе мощных устройств, радиоэлектронных средств СВЧ, пакетов, посвященных комплексному построению и интеграции радиочастотных средств, включающих в себя как усилители, так и пассивные радиочастотные устройства, вплоть до антенн и СВЧ-устройств.

Развитие *программного обеспечения САПР* требует все более значительных затрат высококвалифицированного труда. Стоимость многих промышленных САПР составляет миллионы долларов. Поэтому актуальной становится разработка САПР второго порядка, или САПР САПРов. Пока таких систем еще не существует, но прогресс в этом направлении наблюдается. В отличие от традиционных САПР, в таких системах результат имеет нематериальный (информационный) характер. Различие результатов вызвано различными языками описания предметных областей: в одном случае — чертежи, схемы, устройства, а в другом — программа проектирования. Однако и в том, и в другом случае возможен единый системный методологический подход к проектированию: становится актуальным создание и развитие банка инженерных знаний, необходимых для проектирования.

9.2. Программы конструкторского проектирования РЭС

Существуют чисто конструкторские пакеты, обеспечивающие более полное решение различных задач конструкторского проектирования РЭС.

Пакет программ P-CAD фирмы Personal CAD Systems Inc. — это полное комплексное программное решение для проектирования электронных устройств, в частности, ввода схемы и проектирование схемной печатной платы. Комплексное решение предполагает, что логика, описанная в схеме, воплощается в топологию печатной платы. Программы осуществляют функции логического моделирования, проверяют соблюдение правил проектирования, создают список соединений для моделирования, автоматически размещают компоненты, трассируют печатную плату и создают документы для автоматизированных производственных систем. Пакет содержит взаимодействующие средства проектирования, удобную для пользователя оболочку и интеллектуальную базу данных, обширную *библиотеку*, диалоговые редакторы, средства сопряжения с популярными средствами анализа. Пакет имеет открытую архитектуру, обеспечивает выдачу готовых документов для технологии монтажа и другую проектную документацию.

Вывод документации после контроля на дисплее может осуществляться на принтер, плоттер или фотоплоттер. Оболочка системы помогает пользователю двигаться сквозь процесс проектирования с помощью меню, подсказок и правок. Система проектирования печатной платы обеспечивает средства для полной разработки топологии:

от диалогового редактора до автоматического размещения компонентов, автотрассировки, проверки соблюдения правил проектирования и сопряжения с производством.

Библиотека пакета содержит обширную информацию о компонентах электронных схем от дискретных и электромеханических деталей до существующих и заказных микросборок интегральных схем. Программные средства сопряжения превращают данные из списка соединения компонентов схемы в формат, необходимый для конкретной программы моделирования цифровой и аналоговой схемы (типа PSPICE). Пакет позволяет проектировать печатные платы, имеющие до 500 элементов и 2000 связей.

Пакет программ Or CAD фирмы Or CAD System Corp. является законченным и гибким программным блоком схемотехнического и конструкторского проектирования. Он обеспечивает ввод и вывод на печать принципиальных схем, трассировку печатной платы и другие операции. Пакет управляется с помощью иерархической разветвленной системы меню, легок в обучении пользованию, обладает многими дополнительными возможностями ввода и вывода схем.

Библиотека пакета содержит более 2700 изображений компонентов РЭС; можно легко создавать собственные начертания элементов. Простым нажатием клавиши легко выполняются многие графические операции при вводе и выводе схем: увеличение и уменьшение масштаба, преобразование (вращение, перенос, отображение) элементов и любых заданных фрагментов схемы. В системе предусмотрены создание перечня элементов (спецификаций), возможность разводения проводников, шин, входов модулей.

Пакет Or CAD в настоящее время является самым удобным и богатым по своим возможностям для ввода и вывода графических изображений принципиальных схем РЭС.

Пакет имеет удобный выход на подсистемы моделирования и анализа РЭС, а также другие графические пакеты (PSPICE, P-CAD).

Пакет универсального назначения AutoCAD фирмы Auto Desk разработан на самом современном уровне машинной графики и предоставляет разработчику исключительно широкие возможности проектирования разнообразных объектов, технических систем и устройств: домов, печатных плат, станков, деталей и одежды. Пакет представляет собой систему автоматизированной разработки чертежей, причем чертежи, рисунки и схемы создаются в интерактивном режиме, управляемом системой иерархических меню. В любой чертеж может быть вставлен поясняющий текст. В набор функций входит панорамирование, увеличение, масштабирование, поворот, секционирование, штриховка и другие операции преобразования изображений. В системе предусмотрены подсказки в любом состоянии и для любой команды.

В пакете разработан богатый выбор драйверов графических устройств — графических дисплеев, матричных принтеров, графических планшетов и плоттеров. Одним из важнейших достоинств пакета является возможность работы с трехмерной графикой, позволяющей строить реальные объекты, которые можно наблюдать в различных ракурсах (при желании невидимые линии на изображении стираются). Применен специальный метод полилиний для вывода сложных кривых контуров деталей.

Система AutoCAD непрерывно совершенствуется. Так, в последние версии системы включен интерпретатор языка Auto Lisp — одной из версий языка LISP, широко применяемого в символьной обработке и в системах искусственного интеллекта. Использование этого языка позволяет пользователю, с одной стороны, определять собственные функции и команды в среде AutoCAD, с другой — обеспечивать связь AutoCAD с другими приложениями.

Сейчас начинают появляться еще более сложные системы, включающие не только язык программирования, но и экспертные системы (экспертные настройки) для принятия решений и подсказок конструктору в процессе разработки. В эти настройки включен набор правил и математических моделей; конструктор в процессе работы может получить "советы" по оптимальному выбору тех или иных параметров разрабатываемой системы.

Лекция 10. Информационное обеспечение САПР

10.1. Назначение, сущность и составные части информационного обеспечения (ИО) САПР

Основное назначение ИО САПР — уменьшение объемов информации, требуемой в процессе проектирования от разработчика РЭС, и исключение дублирования данных в прикладном, программном и техническом обеспечении САПР.

ИО САПР состоит из описания стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, типовых элементов РЭС, комплектующих изделий и их моделей, материалов, числовых значений параметров и других данных. Эти данные в закодированной форме записываются на машинных носителях: магнитных лентах и магнитных дисках.

Кроме того, в *ИО САПР* входят правила и нормы проектирования, содержащиеся в соответствующей нормативно-технической документации, а также информация о правилах документирования результатов проектирования. Структура и содержание ИО САПР, а также характер его использования зависят от степени развития *банка данных*.

Данные ИО обычно группируются в отдельные массивы, каждый из которых относится к определенному объекту описания. Такие массивы называются *файлами*. Вся совокупность *файлов* образует *базу данных*, которую можно многократно использовать при проектировании различных РЭС для различных этапов и уровней.

Для создания, расширения, корректировки и коллективного использования данных создаются специальные *системы управления базами данных (СУБД)*. Совокупность *баз данных*, систем управления *файлами*, а также относящихся к ним программных, языковых, технических и организационных средств называется *банком данных*. Следовательно, *банки данных (БНД)* являются составной частью ИО САПР и состоят из *баз данных (БД)* и *систем управления базами данных (СУБД)*. *БНД* создаются как обслуживающие подсистемы САПР и предназначены для автоматизированного обеспечения необходимыми данными проектирующих подсистем САПР. По назначению *СУБД* является элементом информационного обеспечения, так как организует автоматизированное обеспечение проектировщика информацией, а по содержанию это комплекс программ, то есть элемент программного обеспечения.

Состав *БД* определяют с учетом характеристик объектов проектирования (технических, метрологических, эксплуатационных), характеристик процесса проектирования (типовые проектные решения, описания технологических операций с вариантами их реализации), действующих нормативных и справочных данных, ранее созданных в организации информационных массивов.

Основные требования к *базам данных*: установление многосторонних связей по производительности — пропускной способности; минимальная избыточность по затратам на создание и эксплуатацию *БД*; целостность и возможность поиска данных; безопасность и секретность от несанкционированного доступа; связь с разработанными и проектируемыми *БД*; простота; возможность настройки и перемещения данных. Последние требования составляют концепцию автоматизированных информационных систем, обладающих адаптацией *СУБД* к данной предметной области с учетом динамики ее развития.

База данных характеризуется двумя аспектами: информационным и манипуляционным. Первый отражает структуру данных, наиболее подходящую для данной предметной области; второй — действия над структурами данных: выборку, добавление, удаление, обновление и преобразование данных.

При построении *БД* должен выполняться принцип информационного единства, то есть должны применяться термины, символы, условные обозначения, проблемно-ориентированные языки и другие способы представления информации, принятые в САПР. В качестве основных логических структур баз данных могут использоваться:

иерархическая, сетевая, реляционная, смешанная (представляющая собой различные сочетания перечисленных выше структур).

Содержание, структура и организация использования *БД* должны обеспечивать:

- объединение любого числа *БД* любого объема, допускающее совместное использование общих данных различными подсистемами САПР для разных задач;
- возможность наращивания *БД*, достоверность и непротиворечивость данных, минимальный объем памяти ЭВМ для их хранения;
- защиту и регулирование возможности доступа к *БД*;
- многократное использование данных.

Проблема согласования программ является прежде всего проблемой выбора структур данных и массивов в памяти ЭВМ. Если программы рассчитаны на работу с общими данными, сгруппированными по-разному, то такие программы не являются информационно согласованными и не могут непосредственно войти в сочетание программ, обслуживающих некоторый маршрут проектирования. Для обеспечения взаимодействия программ в маршрутах необходимо их ***информационное согласование***, то есть приспособление к работе с информационными массивами одинаковой структуры.

Информационная согласованность программ обеспечивается построением общей для согласуемых программ *БД*, то есть совокупности всех тех данных, которые обрабатываются в более чем одной программе (модуле).

В *БД* можно выделить части, играющие различную роль в процессе проектирования.

Первая часть — ***СПРАВОЧНИК*** — содержит справочные данные о ГОСТах, нормах, унифицированных элементах, ранее выполненных типовых проектах. Эта часть изменяется наименее часто, характеризуется однократной *записью* и многократным считыванием и называется постоянной частью *БД*.

Вторая часть — ***ПРОЕКТ*** — содержит сведения об аппаратуре, находящейся в процессе проектирования. В нее входят результаты решения проектных задач, полученные к текущему моменту (различного типа схемы, спецификации, таблицы соединений, тесты). ***ПРОЕКТ*** пополняется или изменяется по мере завершения очередных итераций на этапах проектирования и составляет полупеременную часть *БД*.

Часто ***СПРАВОЧНИК*** и ***ПРОЕКТ*** объединяют под общим названием ***АРХИВ***.

Третья часть *БД* содержит массивы переменных, значения которых важны только в процессе совместного решения двумя (или более) программами конкретной задачи проектирования. Это переменная часть *БД*.

Первый способ ***информационного согласования*** программ — построение централизованной *БД*, общей для всех модулей программного обеспечения (рис. 10.1).

В соответствии с этим способом при создании САПР сначала разрабатывается *БД*, а затем — программное обеспечение.

Реализация централизованной *БД* — сложная задача, т. к. выбранная структура *БД* не всегда может обеспечить реализацию всех необходимых маршрутов проектирования. Например, ранее принятая структура *БД* может не удовлетворять требованиям новых элементов информационного и программного обеспечения.

Поэтому второй способ ***информационного согласования*** программ — построение системы, в которой несколько частных *баз данных* сопрягаются с помощью специального программного ***интерфейса***, как показано на рис. 10.2.

Интерфейс представляет собой программы перекомпоновки информационных массивов из форматов и структур одной *БД* в форматы и структуры, принятые в другой *БД*.

Основные операции в БД — выборка данных прикладными программами, *запись* новых данных, удаление старых ненужных записей, перезапись *файлов* с одних машинных носителей на другие и так далее.

Для выполнения большинства из этих операций требуется специальное программное обеспечение.

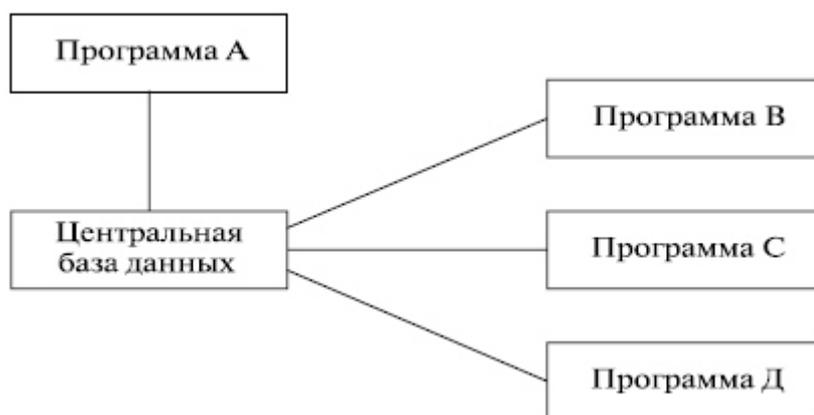


Рис. 10.1. Структура программного обеспечения при централизованной БД



Рис. 10.2. Структура программного обеспечения при частных БД

Совокупность программ, обслуживающих БД, называется *системой управления базой данных СУБД*. БД и СУБД вместе образуют *БАНК ДАННЫХ*.

Логическое представление БД отображает только состав сведений и связи между элементами сведений, хранящихся в БД.

Физическое представление БД отображает способ расположения информации на машинных носителях.

Структуру БД можно представить в виде графа. Каждая вершина графа отображает группу однотипных записей (группы взаимосвязанных элементов данных), то есть каждой вершине можно поставить в соответствие таблицу, содержащую конкретные значения (экземпляры) записей.

БД, для логического представления которых используются графы, называют *СЕТЕВЫМИ*. Обычно в сетевых БД в графах, изображающих структуру, можно указать те или иные циклы.

В частном случае сетевых БД граф может представлять собой дерево. В частности, если устранить из БД все сведения, кроме одного номинального, то структура представляется деревом. Такую структуру называют *ДРЕВОВИДНОЙ* или *ИЕРАРХИЧЕСКОЙ*. Реализация древовидной структуры проще, чем сетевой структуры общего вида, однако чаще реальные данные имеют сложные сетевые структуры.

Наряду с сетевым подходом к представлению БД существует другой подход, основанный на операции нормализации структуры. Этот подход приводит к логическому представлению БД в виде совокупности таблиц. Такие базы данных называют *РЕЛЯЦИОННЫМИ БД*.

Реляционная БД представляет собой совокупность таблиц при условии, что сведения о связях между таблицами удастся включить в сами эти таблицы. Включение таких сведений обеспечивается нормализацией. Сетевые и реляционные базы данных имеют свои преимущества и недостатки. В настоящее время развиваются оба направления в логической организации БД.

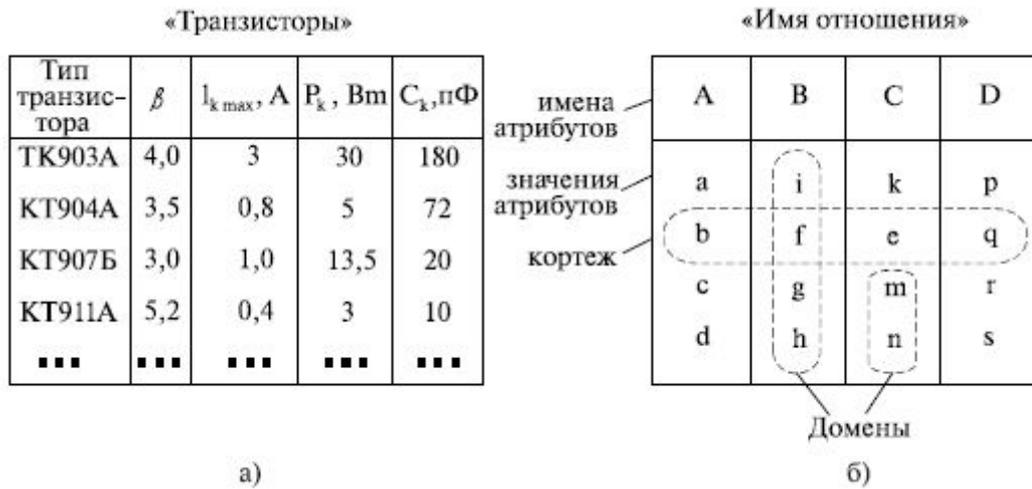


Рис. 10.3. Пример (а) и общий вид (б) реляционной модели данных

Лекция 11. Информационное обеспечение САПР (окончание)

11.1. Реляционная модель баз данных

Реляционная база данных, разработанная Э.Ф. Коддом (E. F. Codd) в 1970 г., – это конечный *набор* конечных отношений (таблиц) вида рис. 10.3,б. Над отношениями можно осуществлять различные алгебраические операции. Тем самым теория реляционных баз данных становится областью приложения математической логики и современной алгебры и опирается на точный математический формализм.

Каждое отношение имеет свое имя; столбцы отношения соответствуют тому или иному атрибуту, имеющему имя и значения. Элементы отношения, соответствующие одной строке, составляют **кортеж отношения** (рис. 10.3, б). *Арность* кортежа – число значений атрибутов в кортеже, т.е. число атрибутов в отношении.

Схема отношения – список имен атрибутов вместе с именем отношения; так, для рис. 10.3,а схема отношения – ТРАНЗИСТОРЫ ($p, I_{k \max}, P_k, C_k$), для рис. 10.3, б – ИМЯ ОТНОШЕНИЯ (A, B, C, D).

Домен – множество значений атрибутов (в том числе и только одного атрибута – один столбец). Вообще столбцы не обязательно являются поименованными, а порядок следования элементов в кортежах также несущественен.

Существует три подхода к анализу реляционных БД и формированию запросов в них: реляционная алгебра, реляционное исчисление на переменных-кортежах и реляционное исчисление на переменных-доменах.

В реляционных базах данных основные операции – включение, удаление, модификация и запрос данных – применяются к кортежам и *доменам*.

Для осуществления операции включения данных задаются новый кортеж и отношение, в которое он должен быть включен. Тогда значения нового кортежа образуют ключ файла включения данных.

При удалении данных должны быть заданы отношение и значения атрибутов, образующих ключ удаляемых кортежей.

При модификации данных задаются отношение, значения атрибутов ключа и новые значения для применяемых атрибутов. Преобразуются ключевые значения в значения полей. К файлу применяется процедура модификации.

Запрос в реляционных базах данных может быть сформулирован к одному или нескольким отношениям (таблицам). Например имеется запрос: указать типы всех транзисторов и их P_k , для которых $C_k > 15$ пФ. Тогда значение атрибута $C_k = 15$ пФ. Затем на печать выдается новый файл-отношение "Тип транзистора, P_k, β ". Могут быть более сложные запросы: например, определить мощности рассеивания транзисторов, для которых $\beta \geq 40, I_{k \max} > 2a, C_k < 150$ пФ и т. д. Тогда эти значения составляют ключ, и по ним составляется новое отношение P_k .

Все эти запросы реализуются с помощью специальных языков манипулирования данными, ряд из которых основан на реляционной алгебре.

Основные операции реляционной алгебры приведены в табл. 11.1. В ней даны исходные отношения, результаты операций, а также в ряде случаев теоретико-множественное представление операций. Первые пять операций являются основными, остальные – дополнительные, которые могут быть выражены через пять основных.

Объединение отношений $R \cup S$ – это множество кортежей (отношений), принадлежащих отношениям R, S или им обоим; отношения R и S должны иметь одинаковую *арность*.

Разность отношений $R - S$ – множество кортежей, принадлежащих R , но не принадлежащих S . Отношения R и S также должны иметь одинаковую *арность*.

Декартово произведение отношений $R \times S$ – одна из основных операций по затратам машинного времени при формировании запросов к реляционной БД. При умножении отношений к каждому кортежу первого отношения (R) присоединяется

каждый кортеж второго отношения (S) – конкатенация кортежей; при этом отношения R и S могут иметь одинаковую или различную *арность*. При декартовом умножении арности исходных отношений складываются, а количества кортежей – перемножаются.

Проекция отношения $R[\pi_{X,Y}(R)]$ – операции выборки по столбцам (атрибутам), приведенным в обозначении проекции.

Например, $\pi_{C,A}(R)$ — отношение, составленное из атрибутов C и A отношения R; $\pi_{2,3}(R)$ — отношение, составленное из 2-го и 3-го атрибутов отношения R, при этом *арность* проекции равна числу имен в ее обозначении.

Селекция отношения R [$\sigma_F(R)$] — операция выборки по строкам (кортежам), удовлетворяющим формуле F. В формулу входят операнды, являющиеся константами или номерами (именами) атрибутов, арифметические операторы сравнения: $<$, $=$, $>$, \leq , \geq , \neq и логические операторы \cap (И), \cup (ИЛИ), (НЕ).

Например, $\sigma_{B=f}(R)$ обозначает множество кортежей, в которых компоненты атрибута B равны f, или $\sigma_{2>3 \cup D=A}(R)$ обозначает множество кортежей, в которых компоненты 2-го атрибута больше компонентов 3-го атрибута и одновременно равны компоненты атрибутов A и D).

Пересечение отношений $R \cap S$ есть краткая *запись* для отношения R – (R – S) и обозначает множество кортежей, принадлежащих одновременно R и S.

Частное отношений $R \div S$ — множество кортежей, содержащих r – s первых компонентов кортежей отношения R, в которых остальные (s) компонентов принадлежат отношению S.

Соединение (θ -соединение) отношений $R \bowtie_{\theta} S$ — это селекция (с формулой θ) декартова произведения отношений R и S:

В частности, $R \bowtie_{A < D} S$ означает, что сначала надо выполнить декартово произведение отношений R и S, а затем в новом отношении выполнить селекцию по формуле $A < D$.

Эквисоединение отношений $R \bowtie_{\theta} S$ — это θ -соединение, если в формуле θ используются только равенства (см. таблицу 11.1, строку 9).

Естественное соединение $R \bowtie S$ — это эквисоединение, которое выполняется для атрибутов отношений R и S с одинаковыми именами (см таблицу 11.1, строку 10). Так как для указанных атрибутов имена и значения полностью совпадают, то один из них в каждой паре в результирующем отношении устраняют. Естественное соединение — одна из основных операций при формировании запросов к реляционной БД.

Композиция отношений — это проекция θ -соединения или проекции селекции декартова произведения. По сути, естественное соединение — тоже частный случай композиции. Декомпозиция отношений — это операция, обратная композиции, т. е. восстановление двух отношений из одного, естественное соединение которых образует исходное отношение.

Таблица 11.1. Операции реляционной алгебры

№	Операции	Исходные отношения	Результат операции
1	Объединение	$ \begin{array}{c} R \qquad S \\ \hline \begin{array}{c c} A & B \\ \hline a & e \\ b & f \\ c & g \\ d & k \end{array} \qquad \begin{array}{c c} A & B \\ \hline m & r \\ n & s \\ b & f \\ a & e \\ p & q \end{array} \end{array} $	$ \begin{array}{c} R \cup S \\ \hline \begin{array}{c c} X & Y \\ \hline a & e \\ b & f \\ c & g \\ d & k \\ m & r \\ n & s \\ p & q \end{array} \end{array} $
2	Разность	См. п. 1	$ \begin{array}{c} R - S \\ \hline \begin{array}{c c} A & B \\ \hline c & g \\ d & k \end{array} \end{array} $
3	Декартово произведение	$ \begin{array}{c} R \qquad S \\ \hline \begin{array}{c c c} A & B & C \\ \hline a & b & c \\ d & e & f \end{array} \qquad \begin{array}{c c} D & E \\ \hline k & l \\ m & n \end{array} \end{array} $ <p style="text-align: center;"> $\underbrace{\hspace{10em}}_{r} \qquad \underbrace{\hspace{10em}}_{s}$ </p>	$ \begin{array}{c} R \times S \\ \hline \begin{array}{c c c c c} A & B & C & D & E \\ \hline a & b & c & k & l \\ a & b & c & m & n \\ d & e & f & k & l \\ d & e & f & m & n \end{array} \end{array} $ <p style="text-align: center;"> $\underbrace{\hspace{15em}}_{r+s}$ </p>
4	Проекция	$ \begin{array}{c} R \\ \hline \begin{array}{c c c} A & B & C \\ \hline a & b & c \\ d & l & f \\ g & k & m \end{array} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \pi_{C,A}(R) \\ \hline \begin{array}{c c} C & A \\ \hline c & a \\ f & d \\ m & g \end{array} \end{array} $
5	Селекция	$ \begin{array}{c} R \\ \hline \begin{array}{c c c c} A & B & C & D \\ \hline a & e & m & r \\ b & f & k & s \\ c & g & n & t \\ d & f & p & q \end{array} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \sigma_{B=f}(R) \\ \hline \begin{array}{c c c c} A & B & C & D \\ \hline b & f & k & s \\ d & f & p & q \end{array} \end{array} $

6	Пересечение	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">R</th> <th colspan="2">S</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>e</td> <td>m</td> <td>n</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>f</td> <td>a</td> <td>e</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>g</td> <td>p</td> <td>q</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>k</td> <td>c</td> <td>g</td> </tr> </tbody> </table>	R		S		A	B	C	D	a	e	m	n	b	f	a	e	c	g	p	q	d	k	c	g	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">$R \cap S$</th> </tr> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>e</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>g</td> </tr> </tbody> </table>	$R \cap S$		X	Y	a	e	c	g																										
R		S																																																											
A	B	C	D																																																										
a	e	m	n																																																										
b	f	a	e																																																										
c	g	p	q																																																										
d	k	c	g																																																										
$R \cap S$																																																													
X	Y																																																												
a	e																																																												
c	g																																																												
7	Частное	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">R</th> <th colspan="2">S</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>e</td> <td>l</td> <td>q</td> <td>m</td> <td>r</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>g</td> <td>m</td> <td>r</td> <td>p</td> <td>t</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>f</td> <td>n</td> <td>s</td> <td colspan="2" rowspan="2">s</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>k</td> <td>p</td> <td>t</td> </tr> <tr> <td colspan="4" rowspan="2">r</td> <td colspan="2" rowspan="2">s</td> </tr> <tr> </tr> </tbody> </table>	R				S		A	B	C	D	C	D	a	e	l	q	m	r	b	g	m	r	p	t	c	f	n	s	s		d	k	p	t	r				s		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">$R \div S$</th> </tr> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>b</td> <td>g</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>k</td> </tr> <tr> <td colspan="2">s</td> </tr> </tbody> </table>	$R \div S$		X	Y	b	g	d	k	s									
R				S																																																									
A	B	C	D	C	D																																																								
a	e	l	q	m	r																																																								
b	g	m	r	p	t																																																								
c	f	n	s	s																																																									
d	k	p	t																																																										
r				s																																																									
$R \div S$																																																													
X	Y																																																												
b	g																																																												
d	k																																																												
s																																																													
8	Соединение (θ -соединение)	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">R</th> <th colspan="2">S</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>5</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>10</td> <td>11</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	R			S		A	B	C	D	E	5	6	7	5	10	1	2	3	7	8	4	5	6			9	10	11			$R \bowtie_{A<D} S = \sigma_{A<D}(R \times S)$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	C	D	E	1	2	3	5	10	1	2	3	7	8	4	5	6	5	10	4	5	6	7	8			
R			S																																																										
A	B	C	D	E																																																									
5	6	7	5	10																																																									
1	2	3	7	8																																																									
4	5	6																																																											
9	10	11																																																											
A	B	C	D	E																																																									
1	2	3	5	10																																																									
1	2	3	7	8																																																									
4	5	6	5	10																																																									
4	5	6	7	8																																																									
9	Эквисоединение	См п. 8	$R \bowtie_{B>E} S = R \bowtie_{B>E} S = \sigma_{B>E}(R \times S)$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9</td> <td>10</td> <td>11</td> <td>5</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	C	D	E	9	10	11	5	10																																																
A	B	C	D	E																																																									
9	10	11	5	10																																																									
10	Естественное соединение	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">R</th> <th colspan="3">S</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>e</td> <td>l</td> <td>f</td> <td>m</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>f</td> <td>m</td> <td>p</td> <td>q</td> <td>y</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>g</td> <td>n</td> <td>k</td> <td>p</td> <td>z</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>k</td> <td>p</td> <td colspan="3">s</td> </tr> <tr> <td colspan="3">r</td> <td colspan="3">s</td> </tr> </tbody> </table>	R			S			A	B	C	B	C	D	a	e	l	f	m	x	b	f	m	p	q	y	c	g	n	k	p	z	d	k	p	s			r			s			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">$R \bowtie_{\text{натур}} S$</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>b</td> <td>f</td> <td>m</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>k</td> <td>p</td> <td>z</td> </tr> </tbody> </table>	$R \bowtie_{\text{натур}} S$				A	B	C	D	b	f	m	x	d	k	p	z
R			S																																																										
A	B	C	B	C	D																																																								
a	e	l	f	m	x																																																								
b	f	m	p	q	y																																																								
c	g	n	k	p	z																																																								
d	k	p	s																																																										
r			s																																																										
$R \bowtie_{\text{натур}} S$																																																													
A	B	C	D																																																										
b	f	m	x																																																										
d	k	p	z																																																										
11	Композиция	См п. 8	$\pi_{C,E}(R \bowtie_{A<D} S)$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	C	E	3	10	3	8	6	10	6	8																																																
C	E																																																												
3	10																																																												
3	8																																																												
6	10																																																												
6	8																																																												
12	Декомпозиция	Операция, обратная композиции																																																											

В терминах реляционной алгебры легко записываются запросы к реляционной базе данных. Если задано несколько отношений, то запрос выражается в виде операции композиции к этим отношениям. Однако формальное применение композиции — последовательное применение декартова произведения всех отношений, селекции и проекции — приводит к неоправданным затратам машинного времени. Поскольку *арность* и число кортежей в исходных отношениях могут быть велики (десятки, сотни), нецелесообразно формировать сначала все декартово произведение, а только затем применять селекцию и проекцию. Так, если два отношения имеют по n кортежей и время доступа к каждой *записи* — t_0 , то общее время доступа к памяти для формирования полного декартова произведения $T_{\text{доступа}} = n^2 t_0$. Если $n = 10^4$, $t_0 = 10$ мс, то $T_{\text{доступа}} = 10^6$ 11,5 сут. Поэтому с

$$R \triangleright \triangleleft S = \sigma_{\theta}(R \times S)$$

целью экономии машинного времени необходимо выполнять предварительную оптимизацию запросов к реляционной базе данных. Общая стратегия оптимизации заключается в следующем:

- выполнять селекции и проекции как можно раньше до декартова умножения (с целью сокращения арности и количества кортежей);
- собирать в каскады селекции и проекции, чтобы выполнять их за один просмотр файла;
- обрабатывать (сортировать, индексировать) файлы перед выполнением соединения;
- комбинировать проекции с предшествующими или последующими двуместными операциями.

Для осуществления этой стратегии применяются эквивалентные выражения реляционной алгебры, приведенные в табл. 11.2. Законы коммутативности и ассоциативности означают произвольный выбор в очередности соединений и умножений. При перестановках проекции или селекции с декартовым произведением следует обращать внимание на принадлежность тех или иных имен атрибутов к исходным отношениям.

Таблица 11.2. Эквивалентные выражения реляционной алгебры

№	Название	Результат операции
1	Закон коммутативности для соединений и декартовых произведений	$E_1 \times E_2 \equiv E_2 \times E_1$ $E_1 \triangleright_F \triangleleft E_2 = E_2 \triangleright_F \triangleleft E_1$
2	Закон ассоциативности для соединений и произведений	$(E_1 \triangleright_{F_1} \triangleleft E_2) \triangleright_{F_2} \triangleleft E_3 \equiv E_1 \triangleright_{F_1} \triangleleft (E_2 \triangleright_{F_2} \triangleleft E_3)$ $(E_1 \times E_2) \times E_3 \equiv E_1 \times (E_2 \times E_3)$
3	Каскад проекций	$\pi_{A_1, \dots, A_n} (\pi_{B_1, \dots, B_n} (E)) \equiv \pi_{A_1, \dots, A_n} (E), A_i \in B_i$
4	Каскад селекций	$\sigma_{F_1} (\sigma_{F_2} (E)) \equiv \sigma_{F_1 \cap F_2} (E)$
5	Перестановка селекции и проекции	$\sigma_F (\pi_{A_1, \dots, A_n} (E)) \equiv \pi_{A_1, \dots, A_n} (\sigma_F (E)),$ если F только (A_1, \dots, A_n)
6	Перестановка селекции с произведением	$\sigma_{F_1 \cap F_2} (E_1 \times E_2) = \sigma_{F_1} (E_1) \times \sigma_{F_2} (E_2); F_1 \in E_1; (E_2);$ $F_2 \in E_2$ $\sigma_F (E_1 \times E_2) = \sigma_F (E_1) \times E_2; F \in E_1$ $\sigma_{F_1 \cap F_2} (E_1 \times E_2) = \sigma_{F_2} (F_1(E_1) \times E_2); F_1 \in E_1;$ $F_2 \in E_2$
7	Перестановка проекции с произведением	$\pi_{A_1, \dots, A_n} (E_1 \times E_2) \equiv \pi_{B_1, \dots, B_m} (E_1) \times \pi_{C_1, \dots, C_k} (E_2)$ при $B_i \in E_1, C_i \in E_2, A_i \equiv \{B_i, C_i\}$

Лекция 12. Методы автоматизированного проектирования конструкции и технологического процесса различного уровня иерархии

12.1. Иерархическая структура проектных спецификаций и иерархические уровни проектирования

Выполнение проектных операций и процедур в САПР основано на оперировании математических моделей (ММ). С их помощью прогнозируются характеристики и оцениваются возможности предложенных вариантов схем и конструкций, проверяется соответствие предъявляемым требованиям, проводится оптимизация параметров, разрабатывается техническая документация и т. п.

В САПР для каждого *иерархического уровня* сформулированы основные положения математического моделирования, выбран и развит соответствующий математический аппарат, получены типовые ММ элементов проектируемых объектов, формализованы методы получения и анализа математических моделей систем. Сложность задач проектирования и противоречивость требований высокой точности, полноты и малой трудоемкости анализа обуславливают целесообразность компромиссного удовлетворения этих требований с помощью соответствующего выбора моделей. Это обстоятельство приводит к расширению множества используемых моделей и развитию алгоритмов адаптивного моделирования.

При использовании блочно-иерархического подхода к проектированию представления о проектируемой системе разделяют на *иерархические уровни*. На верхнем уровне используют наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих уровнях степень подробности описания возрастает, при этом рассматривают уже отдельные блоки системы, но с учетом воздействий на каждый из них его соседей. Такой подход позволяет на каждом *иерархическом уровне* формулировать задачи приемлемой сложности, поддающиеся решению с помощью имеющихся средств проектирования. Разбиение на уровни должно быть таким, чтобы документация на блок любого уровня была обозрима и воспринимается одним человеком.

Другими словами, **блочно-иерархический подход** есть **декомпозиционный подход** (его называют также диакоптическим), который основан на разбиении сложной задачи большой размерности на последовательно и (или) параллельно решаемые группы задач малой размерности, что существенно сокращает требования к используемым вычислительным ресурсам или время решения задач.

Можно говорить об *иерархических уровнях* не только спецификаций, но и проектирования, понимая под каждым из них совокупность спецификаций некоторого *иерархического уровня* совместно с постановками задач, методами получения описаний и решения возникающих проектных задач.

Список *иерархических уровней* в каждом приложении может быть специфичным, но для большинства приложений характерно следующее наиболее крупное выделение уровней:

- **метауровень**, на котором решают наиболее общие задачи проектирования систем, машин и процессов. Результаты проектирования представляют в виде структурных схем, генеральных планов, схем размещения оборудования, диаграмм потоков данных и т. д.;
- **макроуровень**, на котором проектируют отдельные устройства, узлы машин и приборов. Результаты представляют в виде функциональных, принципиальных и кинематических схем, сборочных чертежей и т. п.;
- **микроуровень**, на котором проектируют отдельные детали и элементы машин и приборов.

В каждом приложении число выделяемых уровней и их наименования могут быть различными. Так, в радиоэлектронике *микроуровень* часто называют компонентным, *макроуровень* — схемотехническим. Между схемотехническим и системным уровнями вводят уровень, называемый *функционально-логическим*. В вычислительной технике системный уровень подразделяют на уровни проектирования ЭВМ (вычислительных систем) и вычислительных сетей. В машиностроении имеются уровни деталей, узлов, машин, комплексов.

В зависимости от последовательности решения задач *иерархических уровней* различают *нисходящее проектирование*, *восходящее* и смешанное проектирование (стили проектирования). Последовательность решения задач от нижних уровней к верхним характеризует *восходящее проектирование*, обратная последовательность приводит к *нисходящему проектированию*, в смешанном стиле имеются элементы как *восходящего*, так и *нисходящего проектирования*. В большинстве случаев для сложных систем предпочитают *нисходящее проектирование*. При наличии заранее спроектированных составных блоков (устройств) можно говорить о смешанном проектировании.

Неопределенность и нечеткость исходных данных при *нисходящем проектировании* (так как еще не спроектированы компоненты) или исходных требований при *восходящем проектировании* (поскольку ТЗ имеется на всю систему, а не на ее части) обуславливают необходимость прогнозирования недостающих данных с последующим их уточнением, т. е. последовательного приближения к окончательному решению (итерационность проектирования).

Наряду с декомпозицией описаний на *иерархические уровни* применяют разделение представлений о проектируемых объектах на аспекты.

Аспект описания (страта) — описание системы или ее алгоритмического (разработка алгоритмов и программного обеспечения) и технологического (разработка технологических процессов) проектирования. Примерами страт в случае САПР могут служить также рассмотренные ранее виды обеспечения автоматизированного проектирования.

12.2. Требования к математическим моделям и их классификация

Под математической моделью (ММ) конструкции, технологического процесса и его элементов понимают систему математических соотношений, описывающих с требуемой точностью изучаемый объект и его поведение в производственных условиях. При построении математических моделей используют различные математические средства описания объекта — теорию множеств, теорию графов, теорию вероятностей, математическую логику, математическое программирование, дифференциальные или интегральные уравнения и т. д.

Выполнение проектных операций и процедур в САПР основано на оперировании математическими моделями (ММ). С их помощью прогнозируются характеристики и оцениваются возможности предложенных вариантов схем и конструкций, проверяется их соответствие предъявляемым требованиям, проводится оптимизация параметров, разрабатывается техническая документация и т. п.

В САПР для каждого *иерархического уровня* сформулированы основные положения математического моделирования — выбран и развит соответствующий математический аппарат, получены типовые ММ элементов проектируемых объектов, формализованы методы получения и анализа математических моделей систем. Сложность задач проектирования и противоречивость требований высокой точности, полноты и малой трудоемкости анализа обуславливают целесообразность компромиссного удовлетворения этих требований с помощью соответствующего выбора моделей. Это обстоятельство приводит к расширению множества используемых моделей и развитию алгоритмов адаптивного моделирования.

К математическим моделям предъявляют требования высокой точности, экономичности и универсальности. Экономичность математических моделей

определяется затратами машинного времени (работы ЭВМ). Степень универсальности математических моделей зависит от возможности их использования для анализа большого числа технологических процессов и их элементов. Требования к точности, экономичности и степени универсальности математических моделей противоречивы. Поэтому необходимо иметь удачное компромиссное решение.

Основными требованиями, предъявляемыми к математическим моделям, являются требования адекватности, универсальности и экономичности.

Адекватность. Модель считается адекватной, если отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных параметров модели и объекта. Пусть ε_j — относительная погрешность модели по j -му выходному параметру:

$$\varepsilon_j = (\bar{y}_j - y_j) / y_j \quad (12.1)$$

где \bar{y}_j — j -й выходной параметр, рассчитанный с помощью модели; y_j — тот же выходной параметр, существующий в моделируемом объекте.

Погрешность модели ε_j по совокупности учитываемых выходных параметров оценивается одной из норм вектора $\varepsilon_j = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$.

Точность модели различна в разных условиях функционирования объекта. Эти условия характеризуются внешними параметрами. Если задаться предельной допустимой погрешностью $\varepsilon_{\text{пред}}$, то можно в пространстве внешних параметров выделить область, в которой выполняется условие

$$\varepsilon_m < \varepsilon_{\text{пред}} \quad (12.2)$$

Эту область называют *областью адекватности* (ОА) модели. Возможно введение индивидуальных предельных значений $\varepsilon_{\text{пред}}$ для каждого выходного параметра и определение ОА как области, в которой одновременно выполняются все m условий вида $|\varepsilon_j| \leq \varepsilon_{\text{пред}j}$.

Определение областей адекватности для конкретных моделей — сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат. Эти затраты и трудности представления ОА быстро растут с увеличением размерности пространства внешних параметров. Определение ОА — более трудная задача, чем, например, задача параметрической оптимизации. Для моделей унифицированных элементов расчет областей адекватности становится оправданным в связи с однократностью определения ОА и многократностью их использования при проектировании различных систем. Знание ОА позволяет правильно выбирать модели элементов из числа имеющихся и тем самым повышать достоверность результатов машинных расчетов.

В библиотеку моделей элементов наряду с алгоритмом, реализующим модель, и номинальными значениями параметров должны включаться граничные значения внешних параметров q'_k и q''_k , задающие область адекватности.

Универсальность. При определении ОА необходимо выбрать совокупность внешних параметров и совокупность выходных параметров y_j , отражающих учитываемые в модели свойства. Типичными внешними параметрами при этом являются параметры нагрузки и внешних воздействий (электрических, механических, тепловых, радиационных и т. п.). Увеличение числа учитываемых внешних факторов расширяет применимость модели, но существенно удорожает работу по определению ОА. Выбор совокупности выходных параметров также неоднозначен, однако для большинства объектов число и перечень учитываемых свойств и соответствующих им выходных параметров сравнительно невелики, достаточно стабильны и составляют типовой набор выходных параметров. Например, для макромоделей логических элементов БИС такими выходными параметрами являются уровни выходного напряжения в состояниях логических "0" и "1", запасы помехоустойчивости, задержка распространения сигнала, рассеиваемая мощность.

Если адекватность характеризуется положением и размерами ОА, то универсальность модели определяется числом и составом учитываемых в модели внешних и выходных параметров.

Экономичность. Экономичность модели характеризуется затратами вычислительных ресурсов для ее реализации, а именно затратами машинного времени T_m и памяти P_m . Общие затраты T_m и P_m на выполнение в САПР какой-либо проектной процедуры зависят как от особенностей выбранных моделей, так и от методов решения.

В большинстве случаев при реализации численного метода происходят многократные обращения к модели элемента, входящего в состав моделируемого объекта. Тогда удобно экономичность модели элемента характеризовать затратами машинного времени при обращении к модели, а число обращений к модели должно учитываться при оценке экономичности метода решения.

Экономичность модели по затратам памяти оценивается объемом оперативной памяти, необходимой для реализации модели.

Требования широких областей адекватности, высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности — с другой, являются противоречивыми. Наилучшее компромиссное удовлетворение этих требований оказывается неодинаковым в различных применениях. Это обстоятельство обуславливает использование в САПР многих моделей для объектов одного и того же типа — различного рода макромоделей, многоуровневых, смешанных моделей и т. п.

12.3. Функциональные и структурные модели

Основные признаки классификации и типы ММ, применяемые в САПР, приведены в следующей таблице 12.1:

Признак классификации	Математические модели
Характер отображаемых свойств объекта	Структурные, функциональные
Принадлежность к иерархическому уровню	Микроуровень, макроуровень, метауровень
Степень детализации описания внутри одного уровня	Полные, макромоделли
Способ представления свойств объекта	Аналитические, алгоритмические, имитационные
Способ получения	Теоретические, эмпирические

По характеру отображаемых свойств объекта ММ делятся на структурные и функциональные.

Структурные ММ предназначены для отображения структурных свойств объекта. В свою очередь, структурные ММ делятся на топологические и геометрические.

Описание математических соотношений на уровнях структурных, логических и количественных свойств принимает конкретные формы в условиях определенного объекта.

Функциональные ММ предназначены для отображения физических или информационных процессов, протекающих в технологических системах при их функционировании.

Лекция 13. Математические модели (ММ) на различных иерархических уровнях

13.1. Иерархия математических моделей в САПР

Блочно-иерархический подход к проектированию радиоэлектронных средств (РЭС) включает в качестве своей основы иерархию математических моделей. Деление моделей по иерархическим уровням (уровням абстрагирования) происходит по степени детализации описываемых свойств и процессов, протекающих в объекте. При этом на каждом иерархическом уровне используют свои понятия "система" и "элементы". Так, система k -го уровня рассматривается как элемент на соседнем более высоком $(k-1)$ -м уровне абстрагирования.

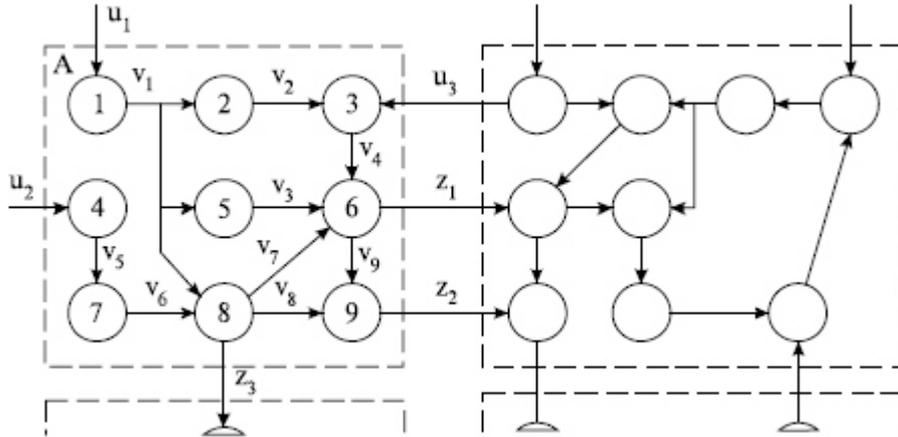


Рис. 13.1. Представление структуры объекта

Представим структуру некоторого объекта в виде множества элементов (рис. 13.1) и связей между ними.

Выделим в соответствии с *блочно-иерархическим подходом* в структуре объекта некоторые подмножества элементов и назовем их блоками (на рисунке показаны штриховыми линиями). Пусть состояние каждой связи характеризуется одной фазовой переменной v_i , z_j или u_k . Здесь v_i относится к внутренним связям между элементами данного блока, z_j и u_k относятся к выходам и входам блока соответственно.

Рассмотрим важные для функциональных моделей понятия *полной модели* и *макромодели*.

Полная модель блока есть модель, составленная из моделей элементов с учетом межэлементных связей, т. е. модель, описывающая как состояние выходов, так и состояние каждого из элементов блока. Моделями элементов блока A являются уравнения, связывающие входные и выходные переменные:

$$\begin{aligned} f_1(v_1, u_1) &= 0; \\ f_2(v_1, v_2) &= 0; \\ f_3(v_2, u_3, v_4) &= 0; \\ &\dots \\ f_9(v_9, v_8, z_2) &= 0; \end{aligned} \quad (13.1)$$

Полная модель блока есть система уравнений

$$\begin{aligned} F(V, U) &= 0; \\ Z &= \psi(V, U), \end{aligned} \quad (13.2)$$

где V , Z и U — векторы внутренних, выходных и входных фазовых переменных блока.

При большом количестве элементов размерность вектора V и порядок системы уравнений (13.2) становятся чрезмерно большими и требуют упрощения.

При переходе к более высокому иерархическому уровню упрощения они основаны на исключении из модели вектора внутренних переменных V . Полученная модель представляет собой систему уравнений

$$\varphi(Z, U) = 0 \quad (13.3)$$

существенно меньшей размерности, чем *полная модель* (13.2), и называется *макромоделью*. Следовательно, *макромодель* уже не описывает процессы внутри блока, а характеризует только процессы взаимодействия данного блока с другими в составе системы блоков.

Модели (13.2) и (13.3) относятся друг к другу как *полная модель* и макромодель на p -м уровне иерархии. На более высоком $(p-1)$ -м уровне блок A рассматривается как элемент, и *макромодель* (13.3) становится моделью элемента A . Следовательно, модели (13.1) и (13.3) относятся друг к другу как модели элементов соседних иерархических уровней. Из моделей типа (13.3) может быть составлена *полная модель* системы на $(p-1)$ -м уровне.

13.2. Микро-, макро- и метауровни

В зависимости от сложности объекта при его проектировании используют большее или меньшее число уровней абстракции. Объединение уровней, родственных по характеру используемого математического аппарата, приводит к образованию в иерархии функциональных моделей для большинства проектируемых сложных объектов трех укрупненных уровней: *микро-, макро- и метауровня*.

На *микроуровне* используют математические модели, описывающие физическое состояние и процессы в сплошных средах. Для моделирования применяют аппарат уравнений математической физики. Примерами таких уравнений служат дифференциальные уравнения в частных производных — уравнения электродинамики, теплопроводности, упругости, газовой динамики. Эти уравнения описывают поля электрического потенциала и температуры в полупроводниковых кристаллах интегральных схем, напряженно-деформированное состояние деталей механических конструкций и т. п.

К типичным фазовым переменным на *микроуровне* относятся электрические потенциалы, давление, температура, концентрации частиц, плотности токов, механические напряжения и деформации. Независимыми переменными являются время и пространственные координаты. В качестве операторов F и Ψ в уравнениях (13.2) фигурируют дифференциальные и интегральные операторы. Уравнения (13.2), дополненные краевыми условиями, составляют ММ объектов на *микроуровне*. Анализ таких моделей сводится к решению краевых задач математической физики.

На *макроуровне* производится дискретизация пространств с выделением в качестве элементов отдельных деталей, дискретных электрорадиоэлементов, участков полупроводниковых кристаллов. При этом из числа независимых переменных исключают пространственные координаты. Функциональные модели на *макроуровне* представляют собой системы алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений. Для их получения и решения используют соответствующие численные методы. В качестве фазовых переменных фигурируют электрические напряжения, токи, силы, скорости, температуры, расходы и т. д. Они характеризуют проявления внешних свойств элементов при их взаимодействии между собой и внешней средой в электронных схемах или механических конструкциях.

На *метауровне* с помощью дальнейшего абстрагирования от характера физических процессов удается получить приемлемое по сложности описание информационных процессов, протекающих в проектируемых объектах. На *метауровне* для моделирования аналоговой РЭС широко применяют аппарат анализа систем автоматического управления, а для моделирования цифровой РЭА — математическую логику, теорию конечных

автоматов, теорию массового обслуживания. Математические модели на *метауровне* — системы обыкновенных дифференциальных уравнений, системы логических уравнений, имитационные модели систем массового обслуживания.

13.2.1. Математические модели на микроуровне

Модели на микроуровне используются для исследования напряженного состояния деталей конструкции и для расчетов их на прочность. Напряженное состояние деталей конструкции в зависимости от геометрии исследуемого узла, вида приложенной нагрузки и свойств материала описывается дифференциальными уравнениями различного вида. Любое из этих уравнений может быть получено из общего квазигармонического уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + Q = 0, \quad (13.4)$$

где x, y, z — пространственные координаты; φ — искомая непрерывная функция; K_x, K_y, K_z — коэффициенты; Q — внешнее воздействие.

В двумерном случае при $K_x = K_y = 1$ уравнение (13.4) сводится к уравнению, которое описывает напряженное состояние, возникающее в поперечном сечении упругого однородного стержня под воздействием крутящего момента M :

$$\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \partial^2 \varphi / \partial y^2 + 2E\theta = 0, \quad (13.5)$$

где E — модуль сдвига материала стержня; θ — угол закручивания на единицу длины, φ — функция, связанная с напряжениями сдвига τ_x и τ_y уравнениями

$$\begin{aligned} \tau_x &= \partial \varphi / \partial y; \sqrt{d} = \sigma. \\ \tau_y &= \partial \varphi / \partial x. \end{aligned} \quad (13.6)$$

В уравнение (13.6) в явном виде не входит крутящий момент, связанный с искомой функцией напряжения φ уравнением

$$M = 2 \int_S \varphi dS, \quad (13.7)$$

где S — площадь рассматриваемого сечения.

Точное решение краевых задач получают только в частных случаях. Поэтому реализация таких моделей заключается в использовании различных приближенных моделей. Широкое распространение получили модели на основе интегральных уравнений и модели на основе метода сеток. Одним из наиболее популярных методов решения краевых задач в САПР является метод конечных элементов.

13.2.2. Математические модели на макроуровне

Большинство технических подсистем характеризуется фазовыми переменными. Фазовые переменные образуют вектор неизвестных в ММ технической системы. Для каждой физической подсистемы характерны свои законы, однако для простейших элементов форма выражающих их уравнений оказывается одинаковой. Ниже приводятся в качестве примера электрическая и механическая подсистемы.

Электрическая подсистема

Фазовыми переменными электрической подсистемы являются токи I и напряжения U . Запишем уравнения трех типов простейших элементов.

1. Уравнение сопротивления (закон Ома) $I = U/R$, где R — электрическое сопротивление.
2. Уравнение емкости $I = C(dU/dt)$, где C — электрическая емкость.
3. Уравнение индуктивности $U = L(dI/dt)$, где L — электрическая индуктивность.

Механическая поступательная система

Фазовые переменные механической поступательной подсистемы — силы F и скорости V — соответственно аналоги токов и напряжений. Запишем уравнения трех типов простейших элементов:

1. Уравнение вязкого трения $F = V/R_M$, где $R_M = 1/k$ — аналог электрического сопротивления; k — коэффициент вязкого трения.

2. Уравнение массы (уравнение второго закона Ньютона) $F = ma = C_M (dV/dt)$, где $a = dV/dt$ — ускорение; $C_M = m$ — аналог электрической емкости (масса элемента).

3. Уравнение пружины $F = kx$, где x — перемещение; k — жесткость пружины. Продифференцируем обе части уравнения по времени: $dF/dt = kV$, или $V = L_M(dF/dt)$, где $L_M = 1/k$ — аналог электрической индуктивности.

Аналогичное компонентное уравнение можно получить из закона Гука для элемента, у которого учитывается сжимаемость, т.е. $P = E(\Delta l/l)$, где P — напряжение в элементе; E — модуль Юнга; l — длина элемента; Δl — изменение длины элемента. Умножив обе части этого уравнения на площадь S поперечного сечения элемента и продифференцировав по времени, получим $d(PS)/dt = (ESA)(d\Delta l/dt)$; $d(\Delta l)/dt = V$; $PS = F$; $dF/dt = (ES/l)V$, или $V = L_M(dF/dt)$; $L_M = l/(ES)$.

Механическая вращательная подсистема

Фазовые переменные этой подсистемы — моменты сил M и угловые скорости ω — соответственно, аналоги токов и напряжений. Запишем уравнения трех типов простейших элементов.

1. Уравнение вязкого трения вращения $M = \omega/R_{вр}$, где $R_{вр} = 1/k$ — аналог электрического сопротивления; k — коэффициент трения вращения.

2. Основное уравнение динамики вращательного движения $M = J(d\omega/dt)$, где J — аналог электрической емкости (момент инерции элемента).

3. Уравнение кручения бруса с круглым поперечным сечением $M = GJ_p\theta$, где M — крутящий момент; G — модуль сдвига; J_p — полярный момент инерции сечения; $\theta = d\varphi/dl$ — относительный угол закручивания.

Рассмотрим брус конечной длины, тогда $\theta = \varphi/l$, где φ — угол закручивания; l — длина бруса. Продифференцируем обе части уравнения по времени, т.е. $dM/dt = (GJ_p/l)(d\varphi/dt)$, или если учесть, что $(d\varphi/dt) = \omega$ и $L_{вр} = l/(GJ_p)$, то $\omega = L_{вр}(dM/dt)$, где $L_{вр}$ — аналог электрической индуктивности (вращательная гибкость).

Аналогичное компонентное уравнение можно получить для спиральной пружины, $M = c\varphi$, где c — жесткость пружины. Продифференцировав обе части уравнения по времени, получим $\omega = L_{вр}(dM/dt)$; $L_{вр} = l/c$.

Лекция 14. Математические модели объектов проектирования РЭС

14.1. Общие сведения о математических моделях РЭС

Проектирование радиоэлектронных средств с применением ЭВМ требует описания этого объекта на языке математики в виде, удобном для его алгоритмической реализации.

Математическое описание проектируемого объекта называют *математической моделью*. **Математическая модель** — это совокупность математических элементов (чисел, переменных, векторов, множеств) и отношений между ними, которые с требуемой для проектирования точностью описывают свойства проектируемого объекта. На каждом этапе проектирования используется свое математическое описание проектируемого объекта, сложность которого должна быть согласована с возможностями анализа на ЭВМ, что приводит к необходимости иметь для одного объекта несколько моделей различного уровня сложности.

В общей теории математического моделирования *математическую модель* любого объекта характеризуют *внутренними, внешними, выходными параметрами* и *фазовыми переменными*. **Внутренние параметры** модели определяются характеристиками компонентов, входящих в проектируемый объект, например номиналы элементов принципиальной схемы. Если проектируемый объект содержит n элементарных компонентов, то и его *математическая модель* будет определяться параметрами, которые образуют вектор *внутренних параметров* $\overline{W} = |w_1 \dots w_n|^T$. Каждый из параметров w_i , в свою очередь, может быть функцией, вектором или еще более сложным математическим функционалом в зависимости от объекта проектирования.

Выходные параметры модели — это показатели, характеризующие функциональные, эксплуатационные, конструкторско-технологические, экономические и другие характеристики проектируемого объекта. К таким показателям могут относиться коэффициенты передачи, масса и габариты проектируемого объекта, надежность, стоимость и т.п. Понятия *внутренних* и *выходных параметров* инвариантны, при моделировании на более сложном уровне *выходные параметры* могут стать *внутренними* и наоборот. Например, сопротивление резистора является *внутренним параметром* при моделировании усилительного устройства, компонентом которого он является, но это же сопротивление будет *выходным параметром* при моделировании самого резистора, что требуется при пленочном его исполнении. Вектор *выходных параметров* модели будем обозначать

$$\overline{F} = |f_1 \dots f_k|^T.$$

Внешние параметры модели — это характеристики внешней по отношению к проектируемому объекту среды, а также рабочие управляющие воздействия. Вектор *внешних параметров* в общем случае содержит множество самых различных составляющих. К его составляющим с полным правом можно отнести все, что говорилось ранее о составляющих вектора *внутренних параметров*. Будем обозначать его

$$\overline{Q} = |q_1 \dots q_m|^T.$$

Уравнения *математической модели* могут связывать некоторые физические характеристики компонентов, которые полностью характеризуют состояние объекта, но не являются *выходными* или *внутренними параметрами* модели (например, токи и напряжения в радиоэлектронных устройствах, *внутренними параметрами* которых являются номиналы элементов электрических схем, а *выходными параметрами* — выходная мощность, коэффициент передачи). Такие характеристики называют **фазовыми переменными**. Минимальный по размерности вектор *фазовых переменных* $\overline{V} = |v_1 \dots v_r|^T$, полностью характеризующий работу объекта проектирования, называют **базисным вектором**. Например, при составлении уравнений *математической модели* радиоэлектронных устройств в качестве *базисного вектора* \overline{V} можно использовать вектор узловых потенциалов либо вектор напряжений на конденсаторах и токов в

индуктивностях — переменные состояния. Использование вектора *фазовых переменных* позволяет упростить алгоритмическую реализацию программ, составляющих уравнения *математической модели* устройства.

В общем случае *выходные параметры* \bar{F} представляются операторами от векторов $\bar{V}, \bar{W}, \bar{Q}$ и могут быть определены из решения системы уравнений *математической модели* устройства. С учетом вышесказанного *математическая модель* любого радиотехнического объекта может быть представлена в виде следующих систем уравнений:

$$\bar{\varphi}(\bar{V}, \bar{W}, \bar{Q}) = \mathbf{0}; \quad (14.1)$$

$$\bar{F} = \bar{\psi}(\bar{V}), \quad (14.2)$$

где $\bar{\varphi}$ и $\bar{\psi}$ — операторы, определяющие вид систем уравнений модели.

Система уравнений (14.1) может представлять собой систему линейных алгебраических уравнений, нелинейных уравнений различного вида, дифференциальных в полных или частных производных, и является собственно *математической моделью* проектируемого объекта. В результате решения системы (14.1) определяются действующие в устройстве *фазовые переменные* \bar{V} . Система уравнений (14.2) определяет зависимость *выходных параметров* объекта от *фазовых переменных* \bar{V} .

В частных случаях составляющие вектора \bar{V} могут являться *внутренними* или *выходными параметрами* объекта, и тогда системы уравнений (14.1) и (14.2) упрощаются.

Часто моделированием называют лишь составление системы (14.1). Решение уравнений (14.1) и отыскание вектора \bar{F} с помощью уравнения (14.2) называют *анализом математической модели*.

На каждом уровне моделирования различают *математические модели* проектируемого радиотехнического объекта и компонентов, из которых состоит объект. *Математические модели* компонентов представляют собой системы уравнений, которые устанавливают связь между *фазовыми переменными*, *внутренними* и *внешними параметрами*, относящимися к данному компоненту. Эти уравнения называют *компонентными*, а соответствующую модель — *компонентной*.

Математическую модель объекта проектирования, представляющего объединение компонентов, получают на основе *математических моделей* компонентов, входящих в объект. Объединение *компонентных уравнений* в *математическую модель* объекта осуществляется на основе фундаментальных физических законов, выражающих условия непрерывности и равновесия *фазовых переменных*, например законов Кирхгофа. Уравнения, описывающие эти законы, называют *топологическими*; они отражают связи между компонентами в устройстве. Совокупность *компонентных* и топологических уравнений для проектируемого объекта и образует систему (14.1), являющуюся *математической моделью* объекта.

Исходя из задач конкретного этапа проектирования, *математическая модель* проектируемого объекта должна отвечать самым различным требованиям:

- отражать с требуемой точностью зависимость *выходных параметров* объекта от его *внутренних* и *внешних параметров* в широком диапазоне их изменения;
- иметь однозначное соответствие физическим процессам в объекте;
- включать необходимые аппроксимации и упрощения, которые позволяют реализовать ее программно на ЭВМ с различными возможностями;
- иметь большую универсальность, т. е. быть применимой к моделированию многочисленной группы однотипных устройств;
- быть экономичной с точки зрения затрат машинных ресурсов и т. п.

Эти требования в своем большинстве являются противоречивыми, и удачное компромиссное удовлетворение этих требований в одних задачах может оказаться далеким от оптимальности в других. По этой причине для одного и того же компонента

или устройства часто приходится иметь не одну, а несколько моделей. В связи с этим классификация моделей должна выполняться по множеству признаков, чтобы описать все возможные случаи.

По уровню сложности различают полные модели и макромодели. Полные модели объекта проектирования получаются путем непосредственного объединения *компонентных моделей* в общую систему уравнений. Макромодели представляют собой упрощенные *математические модели*, аппроксимирующие полные.

В свою очередь, макромодели делят на две группы: факторные и фазовые модели.

Факторные модели предназначены для использования на последующих этапах проектирования.

Фазовые макромодели предназначены для использования на том же этапе проектирования, на котором их получают, для сокращения размерности решаемой задачи.

По способу получения *математические модели* радиотехнических объектов делят на *физические* и *формальные*. **Физические модели** получают на основе изучения физических закономерностей функционирования проектируемого объекта, так что структура уравнений и параметры модели имеют ясное физическое толкование.

Формальные модели получают на основе измерения и установления связи между основными параметрами объекта в тех случаях, когда физика работы его известна недостаточно полно. Как правило, *формальные модели* требуют большого числа измерений и по своей природе являются локальными, справедливыми вблизи тех режимов, в которых производились измерения. Такие модели называют моделями "черного ящика".

В современных системах автоматизированного проектирования формирование системы уравнений *математической модели* проектируемого объекта выполняется автоматически с помощью ЭВМ. В зависимости от того, что положено в основу алгоритма формирования системы уравнений, модели радиоэлектронных объектов можно разделить на *электрические, физико-топологические* и *технологические*.

Понятие *электрической модели* включает либо систему уравнений, связывающих напряжения и токи в электрической схеме, являющейся моделью объекта, либо саму электрическую схему, составленную из базовых элементов (резисторов, конденсаторов), на основе которой можно в ЭВМ получить систему уравнений, связывающих напряжения и токи в модели объекта.

В *физико-топологических моделях* исходными параметрами являются геометрические размеры определяющих областей проектируемого объекта и электрофизические характеристики материала, из которых они состоят. В результате решения системы уравнений этой модели поля находятся внутри и на внешних выводах устройства. Такие модели применяются при разработке полупроводниковых приборов, СВЧ-устройств и в ряде других случаев.

Технологические модели основываются на параметрах технологических процессов изготовления проектируемого объекта (температура и время диффузии, концентрация диффузанта). *Выходные параметры* такой модели — совокупность физико-топологических либо технологических параметров.

По способу задания *внутренних* и *внешних параметров математические модели* делят на **дискретные** и **непрерывные**.

Различают модели *статические* и *динамические* в зависимости от того, учитывают ли уравнения модели инерционности процессов в проектируемом объекте или нет. **Статические модели** отражают состояние объекта проектирования при неизменных *внешних параметрах* и не учитывают его переходные характеристики. **Динамические модели** дополнительно отражают переходные процессы в объекте, происходящие при изменении во времени *внешних параметров*.

Существуют и другие варианты классификации *математических моделей* элементов и узлов радиоустройств.

Программа моделирования радиотехнических и других объектов должна автоматически формировать систему уравнений *математической модели* из базового набора элементарных схемных элементов, *компонентные уравнения* для которых хранятся в библиотеке программы. Для синтеза адекватных реальному объекту моделей большинства радиотехнических устройств базовый набор должен содержать по крайней мере пять типов сосредоточенных схемных элементов, перечисленных в таблице 14.1. В таблице приведены и *компонентные уравнения* для каждого из элементов базового набора.

14.2. Общая характеристика задач автоматизации конструкторского проектирования РЭС

Этап конструкторского проектирования радиоэлектронных средств представляет комплекс задач, связанных с преобразованием функциональных или принципиальных электрических схем разработанных устройств в совокупность конструктивных компонентов, между которыми будут существовать необходимые пространственные или электрические связи. Конструкторский этап является завершающим в общем цикле разработки радиоустройств и заканчивается выдачей конструкторско-технологической документации для их изготовления и эксплуатации.

При конструировании радиоэлектронных средств ведущим принципом является *модульный*, заключающийся в выделении конструктивных модулей (компонентов) различной степени сложности, находящихся в отношении соподчиненности.

Таблица 14.1.

Базовые элементы	Компонентные уравнения		
	В операторной форме	Во временной форме	В частотной форме
1. Резистор:			
линейный	$u = Ri(s)$	$u(t) = Ri(t)$	$u(\omega) = Ri(\omega)$
управляемый током	$u = r(i)i(s)$	$u(t) = R[i(t)]i(t)$	$u(\omega) = R[i(\omega)]i(\omega)$
управляемый напряжением	$i = G(u)u(s)$	$i(t) = G[u(t)]u(t)$	$i(\omega) = G[u(\omega)]u(\omega)$
2. Конденсатор:			
линейный	$I = Csu(s)$	$i(t) = cdu/dt$	$i(\omega) = j\omega Cu(\omega)$
управляемый током	$u = i(s)/[sC(i)]$	$u(t) = \int \frac{i(t)}{c(i)} dt$	$u(\omega) = i(\omega)/[j\omega C(i)]$
управляемый напряжением	$i = sC(u)u(s)$	$i(t) = \frac{d[c(u)u(t)]}{dt}$	$i(\omega) = j\omega C(u)u(\omega)$
3. Индуктивность:			
линейная	$u = Lsi(s)$	$u(t) = Ldi(t)/dt$	$u(\omega) = j\omega Li(\omega)$
управляемая током	$u = sL(i)i(s)$	$u(t) = d[L(i)i(t)]/dt$	$u(\omega) = j\omega L(i)i(\omega)$

Таким образом, конструкцию радиоэлектронного устройства можно представить в виде иерархической структуры, состоящей из компонентов разной степени сложности, что схематически показано на рис. 14.1. Модуль или компонент первого уровня представляет собой конструктивно неделимое устройство, например микросхему, транзистор, дискретный резистор и т. д.

Модуль второго уровня объединяет на одной печатной плате несколько модулей первого уровня.

Модуль третьего уровня — блок — объединяет модули второго уровня и конструктивно может быть оформлен в виде панели (кассеты) с печатным или проводным монтажом.

Наконец, модуль четвертого уровня представляет собой отдельное устройство, объединяющее ряд панелей (кассет) в стойку, шкаф и т. п. Межпанельные соединения здесь обычно реализуются проводным монтажом. Естественно, что приведенный пример лишь иллюстрирует модульный принцип конструирования радиоустройств, который в зависимости от назначения и состава модулей первого уровня может претерпевать большие изменения. Так, при конструировании устройств на основе базовых матричных кристаллов модулем первого уровня могут служить элементы базового кристалла.

Метод модульного конструирования обладает рядом неоспоримых достоинств, одним из которых является упрощение алгоритмической реализации методов решения конструкторских задач на различных уровнях разработки радиоаппаратуры. Вместе с тем применение этого метода возможно лишь при решении проблемы конструктивной и схемной унификации модулей различного уровня, возможность которой определяется достигнутым уровнем технологии.

При выполнении этого условия можно выделить ряд стандартных задач конструкторского этапа проектирования, которые приходится решать на различных уровнях. Очевидно, что на содержание этих этапов накладывает специфические особенности вид проектируемой аппаратуры. Так, если говорить о микроэлектронных устройствах, составляющих 70% всех радиоустройств, то к этим задачам следует отнести задачи:

- компоновки модулей;
- размещения модулей низшего уровня в модуле высшего;
- трассировки межсоединений;
- получения конструкторско-технологической документации.

Эти задачи обладают рядом особенностей по сравнению с задачами других этапов проектирования радиоустройств, например схемотехнического, поэтому разберем их подробнее.

Задача **компоновки** заключается в распределении модулей низшего уровня по конструктивным модулям высшего уровня.

При этом считается, что каждый модуль является конструктивно неделимым компонентом по отношению к модулю более высокого уровня и, как правило, функционально и конструктивно унифицированным. Среди задач компоновки можно выделить два характерных класса.

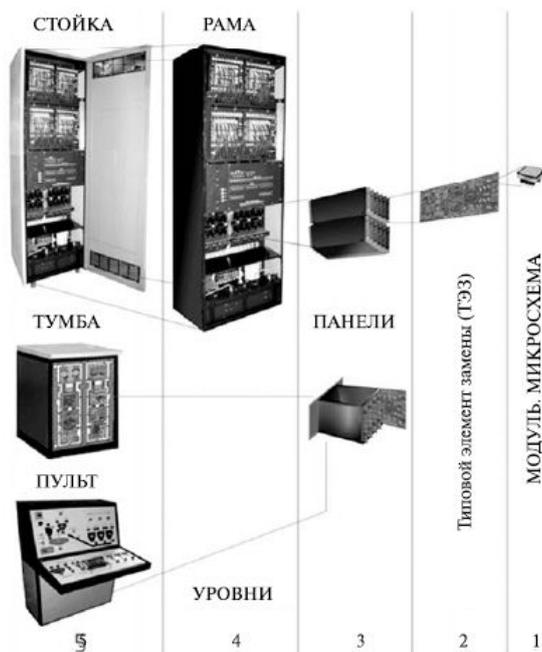


Рис. 14.1. Иерархия конструктивных модулей

Лекция 15. Разработка математических моделей при проектировании технологии

15.1. Методы получения моделей элементов

Получение моделей элементов (моделирование элементов) в общем случае — процедура неформализованная. Основные решения, касающиеся выбора вида математических соотношений, характера используемых переменных и параметров, принимает проектировщик. В то же время такие операции, как расчет численных значений параметров модели, определение областей адекватности и др., алгоритмизированы и решаются на ЭВМ. Поэтому моделирование элементов обычно выполняется специалистами конкретных технических областей с помощью традиционных средств экспериментальных исследований и средств САПР.

Методы получения функциональных моделей элементов делят на *теоретические* и *экспериментальные*. **Теоретические методы** основаны на изучении физических закономерностей, протекающих в объекте процессов. Далее происходит определение соответствующего этим закономерностям математического описания, обоснование и принятие упрощающих предположений, выполнение необходимых выкладок и приведение результата к принятой форме представления модели. **Экспериментальные методы** основаны на использовании внешних проявлений свойств объекта, фиксируемых во время эксплуатации однотипных объектов или при проведении целенаправленных экспериментов.

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

15.1.1. Методика макро моделирования

Применение методики состоит из следующих этапов:

1. *Определение тех свойств объекта, которые должны отражаться моделью (устанавливаются требования к степени универсальности будущей модели).*
2. *Сбор априорной информации о свойствах моделируемого объекта.* Примерами собираемых сведений могут служить справочные данные, математические модели и результаты эксплуатации существующих аналогичных объектов и т. п. Назовем эту информацию производственной статистикой.
3. *Получение общего вида уравнений модели (структуры модели).* Этот этап в случае *теоретических методов* включает выполнение всех присущих этим методам операций, перечисленных выше. Часто проектировщику модели удобнее оперировать не уравнениями, а эквивалентными схемами, с помощью которых инженеру проще устанавливать физический смысл различных элементов математической модели.
4. *Определение численных значений параметров модели.* Возможны следующие приемы выполнения этого этапа:
 - использование специфических расчетных соотношений с учетом собранных на этапе 2 сведений;
 - решение экстремальной задачи, в которой в качестве целевой функции выбирается степень совпадения известных значений выходных параметров объекта с результатами использования модели, а управляемыми параметрами являются параметры модели;
 - проведение экспериментов и обработка полученных результатов.
5. *Оценка точности полученной модели и определение области ее адекватности.* При неудовлетворительной точности оценок выполняют итерационное приближение к желаемому результату повторением этапов 3-5.

6. *Представление полученной модели в форме, принятой в используемой библиотеке моделей.*

15.1.2. Методы планирования экспериментов

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

Выбор вида зависимости выходного параметра *макромодели* y (в общем случае рассматривается вектор выходных параметров Y) от внешних параметров q_k , объединенных в вектор факторов Q , осуществляется проектировщиком. Чаще всего в методах планирования эксперимента используются модели линейные

$$y = AQ \quad (15.1)$$

или квадратичные

$$y = AB \quad (15.2)$$

где A — вектор — строка коэффициентов (параметров) модели; B — вектор, включающий факторы q_k , те или иные произведения из двух, трех или более факторов и, возможно, также квадраты факторов q_k ; $k = 1, \dots, p$; p — число факторов.

Число опытов N , как правило, должно превышать число определяемых параметров вектора A . Параметры рассчитывают по *методу наименьших квадратов*, т. е. из условия минимизации суммы квадратов отклонений значений \tilde{y}_ℓ , определенных по уравнению модели (15.1), и измеренных значений y_ℓ :

$$\min \sum_{\ell=1}^N (\tilde{y}_\ell(A) - y_\ell)^2 \quad (15.3)$$

где ℓ — номер опыта.

В зависимости от способов планирования преимущества *активных экспериментов* перед *пассивными* могут выражаться в получении оптимального положения области адекватности, в ее увеличенном объеме, в упрощении оценок точности и т. п.

15.1.3. Регрессионный анализ

Связь между y и Q может быть не функциональной, а статистической, что особенно характерно при *пассивных экспериментах*. Для получения моделей в такой ситуации часто применяют регрессионный анализ. Модель создается в форме уравнения регрессии (15.1), в котором роль коэффициентов a_k в векторе A выполняют коэффициенты относительной регрессии.

Рассмотрим алгоритм вычисления коэффициентов a_k . По результатам *пассивных экспериментов* получаются *оценки математических ожиданий* M_y , M_{q_k} среднеквадратичных отклонений σ_y , σ_k , соответственно, для выходного y и внешних q_k параметров, а также коэффициенты корреляции r_k между y и q_k , образующие вектор R , и коэффициенты корреляции d_{kj} между факторами q_k и q_j , образующие матрицу D . Далее решается система линейных алгебраических уравнений

$$D\eta = R \quad (15.4)$$

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

$$a_k = \eta_k \sigma_y / \sigma_k \quad (15.5)$$

Если факторы q_k некоррелированы, то D — единичная матрица и можно обойтись без решения системы (15.4), так как $\eta_k = r_k$.

15.1.4. Диалоговое моделирование

Поскольку в методике макромоделирования присутствуют эвристические и формальные операции, целесообразно разрабатывать модели элементов в диалоговом

режиме работы с ЭВМ. Используемый язык взаимодействия человека с ЭВМ должен иметь возможность оперативного ввода исходной информации о структуре модели, об известных характеристиках и параметрах объекта, о плане экспериментов. Диалоговое моделирование должно иметь программное обеспечение, в котором реализованы алгоритмы статистической обработки результатов экспериментов. В данное программное обеспечение должен входить расчет выходных параметров эталонных моделей и создаваемых *макромоделей*, в том числе расчет параметров по методам планирования экспериментов и регрессионного анализа. В методику должны быть включены алгоритмы методов поиска экстремума, расчета областей адекватности и др. Пользователь, разрабатывающий модель, может менять уравнения модели, задавать их в аналитической, схемной или табличной форме, обращаться к нужным подпрограммам и тем самым оценивать результаты предпринимаемых действий, приближаясь к получению модели с требуемыми свойствами.

15.2. Математические модели объектов проектирования на микроуровне

Математические модели деталей и процессов на микроуровне отражают физические процессы, протекающие в сплошных средах и непрерывном времени. Независимыми переменными в этих моделях являются пространственные координаты и время. В качестве зависимых переменных выступают фазовые переменные, такие как потенциалы, напряженности полей, концентрации частиц, деформации и т. п. Взаимосвязи переменных выражаются с помощью уравнений математической физики — интегральных, интегро-дифференциальных или дифференциальных уравнений в частных производных. Эти уравнения составляют основу ММ на микроуровне.

Для получения законченной математической модели, используемой в задачах проектирования, необходимо дополнительно выполнить ряд процедур:

- выбрать краевые условия. Краевые условия представляют собой сведения о значениях фазовых переменных и (или) их производных на границах рассматриваемых пространственных и временных областей;
- дискретизировать задачу. Дискретизация подразумевает разделение рассматриваемых пространственных и временных областей на конечное число элементарных участков с представлением фазовых переменных конечным числом значений в избранных узловых точках, принадлежащих элементарным участкам;
- алгебраизировать задачу — аппроксимировать дифференциальные и интегральные уравнения алгебраическими.

Используют два основных подхода к дискретизации и алгебраизации краевых задач, составляющие сущность *методов конечных разностей (МКР)* и *конечных элементов (МКЭ)*. С помощью любого из этих методов формируется окончательная модель, исследуемая при выполнении различных процедур анализа проектируемого объекта.

Пользователь САПР средствами входного языка задает исходную информацию о конфигурации проектируемого объекта, о способе дискретизации — разделения среды на элементы, — о физических свойствах участков среды. Формирование модели объекта, т. е. разделение среды на элементы, выбор математических моделей элементов из заранее составленных библиотек, объединение моделей элементов в общую систему уравнений, так же как и решение получающихся уравнений, осуществляется автоматически на ЭВМ.

Основные уравнения математической физики, используемые в моделях проектируемых объектов. Процессы, протекающие в техническом объекте при его функционировании, по своей физической природе могут быть разделены на:

- электрические;
- тепловые;
- магнитные;
- оптические;
- механические;

- гидравлические и т. п.

Каждому типу процессов в математической модели соответствует своя подсистема, основанная на определенных уравнениях математической физики. Рассмотрим примеры уравнений, составляющих основу математических моделей технических объектов на микроуровне.

Электрические процессы в современных полупроводниковых приборах с достаточной точностью удается описать с помощью уравнений непрерывности и Пуассона. Уравнения непрерывности выражают скорости изменения концентраций свободных носителей заряда и записываются отдельно для дырок и электронов:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} - \operatorname{div} J_p + g_p \quad (15.6)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} - \operatorname{div} J_n + g_n \quad (15.7)$$

где p и n — концентрации дырок и электронов, соответственно; q — заряд электрона; g_p и g_n — скорости процесса генерации-рекомбинации, соответственно, дырок и электронов;

$$J_p = q(-\mu_p p \operatorname{grad} \varphi - D_p \operatorname{grad} p); \quad (15.8)$$

$$J_n = q(-\mu_n n \operatorname{grad} \varphi - D_n \operatorname{grad} p) \quad (15.9)$$

где q — плотности дырочного и электронного токов; μ_p, μ_n — подвижности; D_p, D_n — коэффициенты диффузии дырок и электронов; φ — электрический потенциал.

Уравнения (15.8)-(15.9) показывают, что причинами изменения концентрации носителей могут быть неодинаковость числа носителей, втекающих (и вытекающих) в элементарный объем полупроводника (тогда $\operatorname{div} J \neq 0$), и нарушение равновесия между процессами генерации и рекомбинации носителей. Уравнения (15.8) и (15.9), называемые уравнениями плотности тока, характеризуют причины протекания электрического тока в полупроводнике: электрический дрейф под воздействием электрического поля ($\operatorname{grad} \varphi \neq 0$) и диффузию носителей при наличии градиента концентрации. Уравнение Пуассона характеризует зависимость изменений в пространстве напряженности электрического поля $E = -\operatorname{grad} \varphi$ от распределения плотности электрических зарядов ρ :

$$\operatorname{div} E = \rho / (\epsilon \epsilon_0) \quad (15.10)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная.

В качестве краевых условий в моделях полупроводниковых приборов используют зависимости потенциалов на контактах от времени, принимают значения концентраций носителей на границе между внешним выводом и полупроводником равными равновесным концентрациям p_0 и n_0 , для границ раздела полупроводника и окисла задаются скоростью поверхностной рекомбинации g_s , что определяет величины нормальных к поверхности раздела составляющих плотностей тока J_p и J_n и т. д.

Результат решения уравнений непрерывности и Пуассона при известных краевых условиях — это поля потенциала и концентраций подвижных носителей в различных областях полупроводниковой структуры. Знание этих полей позволяет оценить электрические параметры прибора.

В основе моделей диффузионных процессов, используемых, в частности, для описания технологических операций диффузии примесей при изготовлении интегральных схем и полупроводниковых приборов, лежит уравнение диффузии

$$\partial N / \partial t = \operatorname{div} (D \operatorname{grad} N), \quad (15.11)$$

где N — концентрация примеси; D — коэффициент диффузии.

Краевые условия представлены зависимостью распределения примеси N в объеме полупроводника в начальный момент времени и зависимостью поверхностной концентрации от времени.

На использовании закономерностей протекания тепловых процессов основано действие многих теплофизических установок. В РЭС полезные свойства обусловлены закономерностями электрических процессов, однако рассеяние мощности и изменения температуры оказывают заметное влияние на характер функционирования аппаратуры. Поэтому в моделях РЭС, как и в моделях многих устройств иной природы, приходится учитывать тепловые процессы. Теплоперенос в твердых телах описывается уравнением теплопроводности

$$C\rho\partial T/\partial T = \text{div}(\lambda\text{grad}T) + g_Q, \quad (15.12)$$

где T — температура; C — удельная теплоемкость; ρ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; g_Q — количество теплоты, выделяемой в единицу времени в единице объема.

Лекция 16. Математические модели РЭС на метауровне

16.1. Математические модели аналоговой РЭА

Использование основных положений схемотехнического моделирования для проектирования сложной *аналоговой РЭА* на метауровне оказывается затруднительным. Это связано с чрезмерно большими размерностями задач. Для их решения необходимы *упрощения*. Основой снижения размерности задач является *макромоделирование*. Часто используют ряд дополнительных упрощений и допущений. Главные из них формулируются следующим образом.

1. Однонаправленность в передаче сигналов, т. е. использование макромоделей, в которых отсутствует влияние выходных переменных на состояние входных цепей.
2. Отсутствие влияния нагрузки на параметры и состояние моделируемых систем.
3. Использование вместо фазовых переменных двух типов (напряжение и ток) переменных одного типа, называемых сигналами. При этом компонентные уравнения элемента представляют собой уравнения связи сигналов на входах и выходах этого элемента.
4. Линейность моделей инерционных элементов.

Перечисленные допущения характерны для *функционального моделирования*, широко применяемого для анализа систем автоматического управления. Элементы (звенья) систем при *функциональном моделировании* делят на три группы:

- *линейные безынерционные звенья* для отображения таких функций, как повторение, инвертирование, чистое запаздывание, идеальное усиление, суммирование сигналов;
- *нелинейные безынерционные звенья* для отображения различных нелинейных преобразований сигналов (ограничение, детектирование, модуляция и т. п.);
- *линейные инерционные звенья* для выполнения дифференцирования, интегрирования, фильтрации сигналов.

Инерционные элементы представлены отношениями преобразованных по Лапласу или Фурье выходных и входных фазовых переменных. При анализе во временной области применяют преобразование Лапласа — модель инерционного элемента с одним входом и одним выходом есть передаточная функция; а при анализе в частотной области (преобразование Фурье) модель элемента есть выражения амплитудно-частотной и частотно-фазовой характеристик. При наличии нескольких входов и выходов ММ элемента представляется матрицей передаточных функций или частотных характеристик.

Допущения, принимаемые при *функциональном моделировании*, существенно упрощают алгоритмы получения математических моделей систем (ММС) из математических моделей элементов (ММЭ).

Математическая модель системы представляет собой совокупность ММЭ, входящих в систему, при отождествлении переменных, относящихся к соединяемым входам и выходам.

16.2. Математические модели логических схем цифровой РЭА

На функционально-логическом уровне необходим ряд положений, которые упрощают модели устройств. Это позволяет анализировать более сложные объекты по сравнению с объектами, анализируемыми на схемотехническом уровне. Часть используемых положений аналогична положениям, принимаемым для моделирования *аналоговой РЭА*.

Во-первых, это положение о представлении состояний объектов с помощью однотипных фазовых переменных (обычно напряжений), называемых сигналами.

Во-вторых, не учитывается влияние нагрузки на функционирование элементов-источников.

В-третьих, принимается допущение об однонаправленности, т. е. о возможности передачи сигналов через элемент только в одном направлении — от входов к выходам.

Дополнительно к этим положениям при моделировании цифровой РЭА принимается положение о дискретизации переменных, их значения могут принадлежать только заданному конечному множеству — алфавиту, например двоичному алфавиту $\{0,1\}$.

Моделирование цифровой РЭА возможно с различной степенью детализации. На логическом (*вентильном*) подуровне функционально-логического проектирования в качестве элементов аппаратуры рассматривают простые схемы типа вентилях, на регистровом подуровне элементами могут быть как отдельные вентили, так и любые более сложные сочетания простых схем, например регистры, счетчики, дешифраторы, сумматоры, арифметико-логические устройства и т. п.

Рассмотрим математические модели элементов на логическом подуровне. Для одновыходных комбинационных элементов ММ представляет собой выражение (в общем случае алгоритм), позволяющее по значениям входных переменных (значениям входов) в заданный момент времени t вычислить значение выходной переменной (значение выхода) в момент времени $t + t_3$ где t_3 — задержка сигнала в элементе. Такую модель элемента называют *асинхронной*. При $t_3 = 0$ модель элемента называют *синхронной*. Модель многовыходного элемента должна включать в себя алгоритм вычисления задержек и значений всех выходных сигналов.

Для элементов последовательностных схем (элементов с памятью) используют модели, в которых аргументами выходных переменных y_j могут быть как входные u_i , так и внутренние u_k переменные. Вектор внутренних переменных V отражает состояние элемента (состояние его памяти).

Объединение моделей элементов в общую математическую модель системы выполняется на основе вышеперечисленных допущений отождествлением переменных на соединяемых входах и выходах элементов.

16.3. Имитационные модели

Все развитие науки связано с созданием и изучением *моделей* реальных систем, процессов и явлений. Язык науки требует, чтобы изучаемое явление (система-процесс) было описано на точном уровне, не допускающем принципиальных разночтений. Наиболее точны *математические модели*. На другом конце шкалы точности — текстовые модели, использующие, по возможности, однозначные понятия. Имитационные модели находятся между этими крайними точками шкалы точности. В этой науке создаются и используются специальные приемы воспроизведения процессов, протекающих в реальных объектах, в тех моделях этих объектов, которые реализуются в ЭВМ.

Имитационное моделирование, как правило, связано с моделированием динамических объектов, процессов и явлений. Изменения ситуаций во времени — тот феномен, который изучается с помощью имитационных моделей. В результате могут быть получены новые знания или выработаны разного рода решения. Например, диспетчер на железной дороге, смотрящий на табло, по которому в условном виде перемещаются поезда и вагоны на сортировочной станции, имеет дело с отображающей моделью. Но если такое табло находится в учебном центре, где обучают будущих диспетчеров, то процессы, отражаемые на табло, лишь имитируют реальность. И в этом случае речь идет об *имитационном моделировании*.

Появление ЭВМ дало мощный толчок для развития *имитационного моделирования*. Существуют два типа имитационных моделей: *моделирование по времени и моделирование по событиям*.

В первом случае в ЭВМ имеется датчик временных интервалов, разбивающий непрерывную шкалу времени на участки стандартной длины. Длина этих участков определяется спецификой моделируемого явления. Если, например, надо воспроизвести в машине процессы, протекающие в период движения снаряда в стволе оружия, то

интервалы должны составлять тысячные доли секунды. Если же на ЭВМ моделируется процесс оседания на дно водоема твердых частиц, то интервалы моделирования могут соответствовать часам или даже суткам.

Для *имитационного моделирования* разработаны специальные программные средства: специализированные *языки программирования* (наиболее распространенный из них — СИМУЛА) и специализированные *пакеты прикладных программ*.

Реальные сложные системы функционируют в условиях действия большого количества случайных возмущающих факторов, приводящих к нарушению нормального хода работы. Источниками возмущающих факторов являются воздействия внешней среды, а также различные отклонения, возникающие внутри системы. Под действием случайных факторов производительность, время выполнения планового задания и другие технико-экономические показатели не только подвергаются рассеянию, но и могут получить смещение своих средних значений. Поэтому оценка только по средним значениям приближительна.

При моделировании на ЭВМ технологического процесса происходит воспроизведение явлений с сохранением их логической структуры и расположения во времени. Это позволяет получать наиболее точные характеристики процесса проектирования (техническую производительность, время проведения отдельных технологических операций и т. д.).

Цель моделирования технологического процесса заключается в проектном расчете технической производительности и других показателей экономической эффективности с учетом заданного варианта структуры каждой операции технологического процесса, надежности оборудования и инструмента, различных событий, возникающих в процессе проведения операций.

Результаты моделирования используются для повышения качества принимаемых значений на этапе проектирования операций и подготовки управляющих программ, а также позволяют исследовать степень влияния надежности отдельных операций, числа и вида инструментов-дублеров, размера партии изделий на их выходные показатели. Таким образом, моделирование технологического процесса выполняется для решения следующих задач:

- прогнозирование основных выходных характеристик изделия при заданном варианте структуры технологического процесса, времени его проведения, технической производительности, длительности простоев из-за отказов инструментов и оборудования, среднего числа отказов и др.;
- получение закона распределения времени при выполнении планового задания, статистических характеристик и других показателей экономической эффективности;
- использование результатов моделирования для выбора оптимального варианта структуры технологического процесса;
- исследование вариантов структуры процесса с помощью разработанной имитационной модели.

Математическая модель технологического процесса строится с учетом заданного варианта его структуры, заданной компоновки оборудования, надежности элементов и их взаимосвязи в процессе обработки.

В основу моделирования технологического процесса положена структура каждой из его операций, определяющая, какие переходы, на какой позиции и в какой последовательности выполняются, какие инструменты-дублеры используются и т. д.

Процесс изготовления РЭС является дискретным стохастическим процессом. Его дискретность заключается в том, что элементарные операции (переходы, мероприятия восстановления работоспособности и др.) выполняются не мгновенно, а имеют определенную длительность, причем следующая процедура выполняется только после полного окончания предыдущей.

В процессе изготовления принимает участие большое число элементов (инструменты, оборудование), которые в случайные моменты времени могут выходить из строя, требуя замены или ремонта. Это приводит к нарушению нормального хода процесса. Величины, оценивающие появление отказов и затраты времени на выполнение восстановительных работ, носят случайный характер. Случайными являются: время работы оборудования до отказа, время работы каждого инструмента до отказа, время бесперебойной работы между последовательными отказами, время восстановления работоспособности, суммарное время изготовления РЭС, техническая производительность и т. д.

Имитационную модель проверяют на чувствительность, т.е. определяют значимость влияния возможных отклонений в пределах заданной точности (допуска) постоянных параметров x_1, \dots, x_k , входящих в модель, на результат моделирования P (рис. 16.1). С помощью имитационной модели можно, например, определить показатели качества изделия, время проведения процесса изготовления, собственные потери времени из-за отказов инструментов и техническую производительность. Таким образом, имитационная модель и моделирование технологического процесса позволяют воспроизводить последовательную или параллельно-последовательную схему (рис. 16.1), где v_i — величина постоянных ограничений в правой части; t — время проведения операции; S — вектор входных параметров; v — управляющие воздействия.

Величины v_i могут колебаться в пределах $v_{i \min} - v_{i \max}$, что обуславливается видом ограничения, технологическими характеристиками процесса, требованиями к точности и качеству изготавливаемой продукции и т.д. Используя подход *имитационного моделирования*, находят отклонения от оптимальных параметров процесса и целевой функции, полученных по усредненным данным, значений этих же параметров и величины целевой функции, найденных при условии, что постоянные v_i в ограничениях модели принимают свои крайние значения, каждое из которых имеет два уровня: $v_{i \min}$ и $v_{i \max}$.

Определив с помощью математической модели оптимальные параметры обработки и величину целевой функции для каждого случая предельных отклонений колебаний постоянных v_i , оценивают степень расхождения полученных характеристик с соответствующими значениями усредненного варианта.

Определяют вероятность того, что Δ_f и Δ_x (10.11) находятся в пределах заданной точности δ_f и δ_x , т. е.

$$P = \{ |\hat{f}^* - f^*| \leq \delta_f \}$$

$$P = \{ |\hat{x}^* - x^*| \leq \delta_x \}$$

Чтобы найти оптимальные режимы операций и экстремум целевой функции с заданной точностью и надежностью, необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

$$P = \{ |\hat{f}^* - f^*| \leq \delta_f \} \geq 1 - a$$

$$P = \{ |\hat{x}^* - x^*| \leq \delta_x \} \leq 1 - a$$

где найденные режимы операций и значение целевой функции будут находиться в заданных пределах с достоверностью $(1 - a)$.

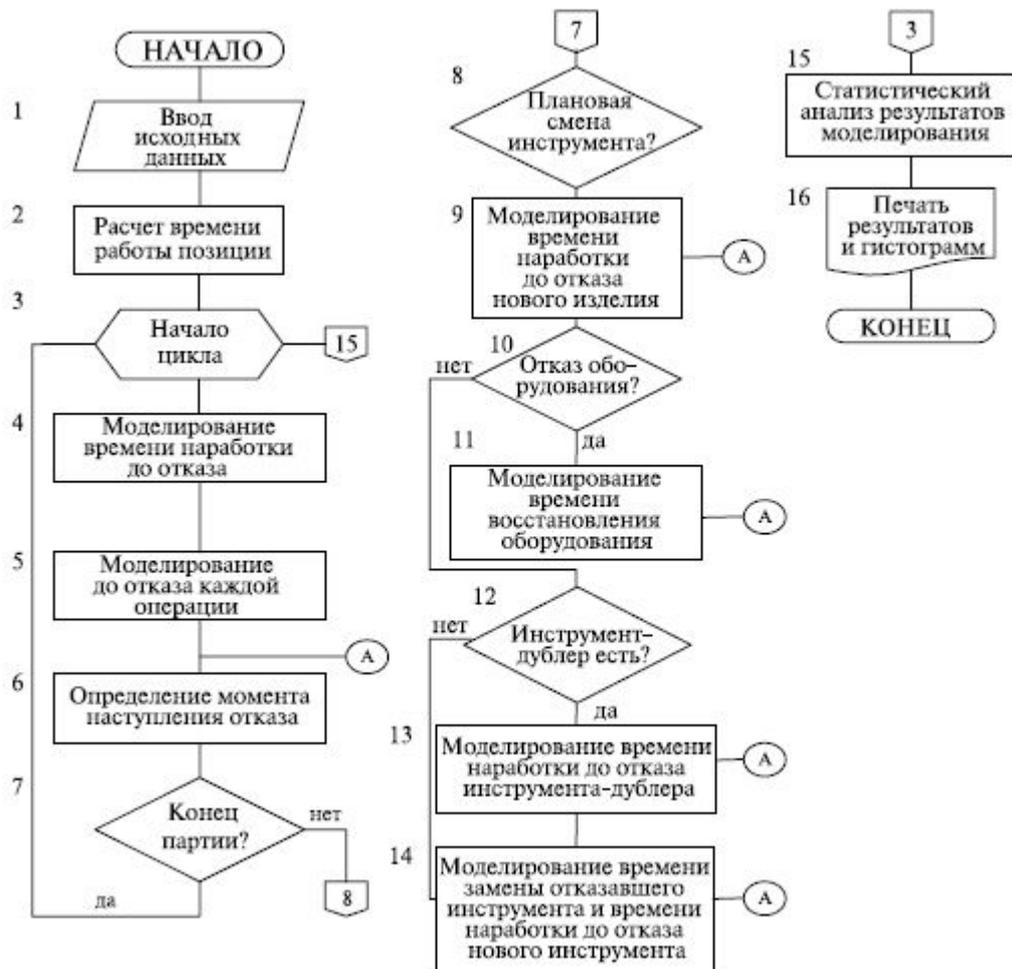


Рис. 16.1. Алгоритм имитационного моделирования процесса изготовления изделий РЭС
 Для сокращения числа вариантов нужно, в первую очередь, учитывать активные ограничения в усредненном варианте и рассматривать вариацию правой части ограничений v_i только для их активной части.

Лекция 17. Анализ, верификация и оптимизация проектных решений средствами САПР

17.1. Основные задачи многообъектного технологического проектирования

Решение задачи сокращения времени на технологическую подготовку *производства* и выпуска новых изделий, особенно малыми партиями, обеспечивает повышение их конкурентоспособности и дает возможность оперативного реагирования на изменения потребительского спроса. Это, в свою очередь, снижает как себестоимость изготовления новой продукции, так и время от появления новых конструкторских разработок до их внедрения в промышленные образцы.

Для решения этой задачи необходимо определить совокупность необходимых методов и средств образования маршрутов *проектирования* — последовательностей проектных операций и процедур, ведущих к достижению поставленной цели. При этом методы построения последовательностей *проектирования* определяются типом проектных задач.

Основой для осуществления многообъектного технологического *проектирования* являются уже существующие *рабочие производственные системы (РПС)*, ориентированные на выпуск своих *производственных заданий (ПЗ)* и имеющие фонд свободного времени своего технологического оборудования. Технологическое оборудование, имеющее фонд свободного времени, является ресурсами *производственных систем (ПС)*, необходимыми для функционирования *виртуальных производственных систем (ВПС)*. На основе информации о ресурсах *ПС* оперативно формируется конфигурация (возможно, изменяющаяся во времени), максимально соответствующая требованиям выполняемых *ПЗ*.

Особенностью такого подхода является использование **элементов интеллектуального управления**, позволяющее принимать решения по изменению конфигурации *ВПС* и формированию управляющей информации в реальном масштабе времени с минимальным участием человека-оператора.

Многообъектное технологическое *проектирование с интеллектуальным управлением* в *РПС* включает в себя: методики *проектирования* технологических процессов, методику обеспечения целеустремленной генерации возможных вариантов конфигурации *ВПС*, методику осуществления *верификации* сгенерированных вариантов и отбора лучших, а также методику принятия решения, на основе которого осуществляется управление процессом конфигурирования *ВПС* во времени. В связи с тем, что принятие решения и формирование на его основе управляющего воздействия осуществляется на основе сложных творческих процессов, управление должно строиться как *интеллектуальное*.

Таким образом, концептуальная идея построения *виртуальной производственной системы* заключается в мобильной организации временно функционирующих объектно-ориентированных *ПС* для выполнения текущих технологических процессов на базе *РПС*. Другими словами, при наличии некоторого *ПЗ* необходима стратегия выполнения их в *РПС*, имеющих фонд свободного времени и ориентированных, в свою очередь, на выпуск других, различных по своим параметрам изделий. При этом выполнение спроектированных технологических процессов не должно негативно сказываться на сроках и себестоимости выпуска основной для этих *РПС* продукции.

Реализация идеи достигается за счет формирования *ВПС* рациональной конфигурации, позволяющей выполнять *ПЗ* в сроки, не превышающие заданные, но близкие к ним, с минимальной себестоимостью. Такой подход обеспечивает отсутствие материальных перестроек при формировании *ПС* для выполнения *ПЗ*, минимальные затраты на хранение готовой продукции и минимальные объемы используемых ресурсов *оперативных производственных систем (ОПС)*. Использование свободного технологического оборудования *РПС*, ориентированных на выполнение своих плановых

технологических процессов, обеспечивает существенное снижение времени и трудоемкости технологической подготовки *производства*.

Данные о предметной области, к которой относится объект, о существующих и разрабатываемых его структурах, известные или прогнозируемые отношения и связи между элементами и свойствами объекта и внешней среды представляет собой **порождающую среду**. Совокупность информационных потоков, образованных информацией о *ПЗ* и *ОПС*, образует порождающую среду, необходимую для генерации вариантов конфигураций *ВПС*.

Порождающая среда представляет собой систему сущностей *OS*, которая может быть представлена в виде

$$OS = (\{(sa_i SA_i), i \in N_n\}, \{sb_j, SB_j\}; j \in N_m\}), \quad (17.1)$$

где sa_j — и $-SA_i$ — соответственно, свойство и множество его проявлений; sb_j, SB_j — база и множество ее элементов; $N_n = \{1, 2, \dots, n\}$ и $N_m = \{1, 2, \dots, m\}$; n — число единиц технологического оборудования в *ВПС*; m — число видов изделий в *ПЗ*.

Совокупность отношений можно представить в виде множеств D_1, D_2, \dots, D_N , тогда R является отношением над этими множествами, если R есть множество упорядоченных последовательностей (и кортежей) вида $\langle d_1, d_2, \dots, d_n \rangle$, где d_1 — элемент из D_1 ; d_2 — элемент из D_2 ; ...; d_n — элемент из D_N . Множества D_1, D_2, \dots, D_N являются доменами отношения R .

Отношение R состоит из некоторого числа кортежей, соответствующих числу элементов в *ПЗ*, и представляет собой мощность. Отношение может быть представлено в виде табличной функции. Такое представление предопределяет применение реляционных баз данных.

При совместном использовании баз знаний и данных особое значение имеют операции выбора и проекции. По значениям атрибутов, которые рассчитаны на основе информации, полученной из баз знаний, с помощью этих операций проводится отбор необходимой информации из базы данных.

На этапе **принятия решений**, в соответствии с требованиями и ограничениями более высокого уровня, принимается решение о выполнении некоторого объема *ПЗ*.

На этапе **проектирования** производится анализ выбранного *ПЗ*, разработка технологического процесса в виде набора маршрутов, описаний, выбор оборудования, оснастки и т. д.

На этапе **планирования** составляется план изготовления изделий по соответствующей технологии на технологическом оборудовании, составляющем *ВПС*.

На этапе **приобретения** осуществляется фактическое *приобретение* сырья, полуфабрикатов, комплектующих, информации, необходимых для *производства* продукта по соответствующей технологии.

На этапе **производства** реализуется план изготовления изделий, в результате которого выполняется *ПЗ*.

На этапе **контроля качества** готового продукта осуществляется сравнение продукта с его спецификацией и извещение о несоответствиях, если таковые имеются.

На этапе поставки готовый продукт, прошедший *контроль качества*, направляется потребителю.

Функции, выполняемые на перечисленных этапах, взаимосвязаны и могут использовать специфичные для той или иной функции данные, разделяемые между несколькими функциями, или общие для всех функций.

При решении задачи формирования *ВПС* необходимо формирование и применение баз данных, которые содержат информацию, полученную на основе основных научных положений технологии *проектирования*; методов математического моделирования, системно-структурного анализа; теории информации, множеств, математической логики, управления, автоматизированного *проектирования* и технологии программирования.

Модель системы многообъектного технологического *проектирования* позволяет не только представить функции и виды деятельности в автоматизированном *производстве*, но является основой для его системного *проектирования*. Модель базируется на понятии "управляемое динамическое *производство*", на котором выполняются следующие последовательные этапы: принятие решения, оценка конструкции, технологическое *проектирование*, *верификация*, контроль прохождения *ПЗ* через *ВПС*.

Реализация математических моделей функционирования *ВПС* учитывает, что современное гибкое автоматизированное *производство* базируется на массовом применении вычислительной техники — начиная от *ПС*, имеющих, как правило, встроенные микропроцессоры, и кончая автоматизированными рабочими местами конструкторов, технологов, диспетчеров и т. д.. В силу физической распределенности этих компонентов объективно возникает задача создания соответствующей распределенной вычислительной системы ЭВМ, охватывающей участки, цеха, заводы, отрасли и т. д.

Эффективность управления реальной *ПС* зависит от последовательности и значений принимаемых решений, а также от оперативности получаемой информации. Для принятия необходимых решений требуется получение соответствующей информации о *ПС* в реальном времени, а также о прошлом или возможном будущем. Поскольку время на обработку поступающей информации ограничено, анализ складывающейся производственной ситуации и формирование соответствующей команды управления требуется автоматизация выполнения указанных действий. Это приводит к необходимости использования моделей, имитирующих основные действия оператора при управлении *ПС*. Такая система должна обладать элементами *интеллектуального управления*.

На рис. 17.1 представлена структурная модель процесса определения конфигурации *ВПС*. Генерация вариантов осуществляется на основе эволюционного метода, использующего *генетические алгоритмы*.

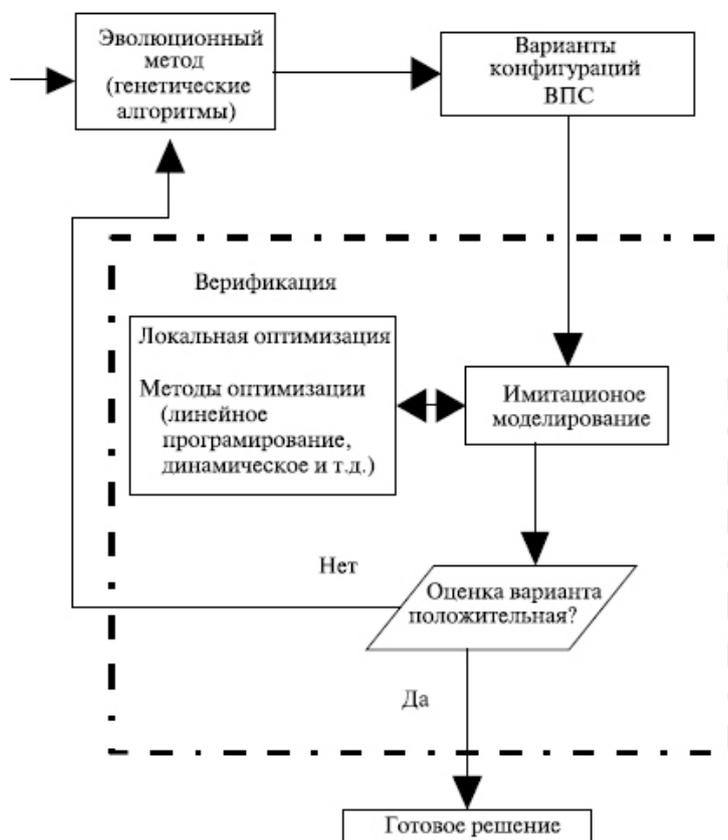


Рис. 17.1. Структура процесса формирования конфигурации ВПС

Для реализации генерации вариантов известен метод **комбинирования эвристик**. Этот метод позволяет уменьшить требуемую вычислительную мощность всего *генетического алгоритма* в целом.

По завершению формирования очередных вариантов конфигурации *ВПС* выполняется процесс их *верификации*. Целью *верификации* полученных результатов является оценка вариантов и выбор наилучшего среди них. В случае, если на каком-либо этапе генерации сформированный вариант оказывается работоспособным (отвечает условиям целевых функций), такой вариант рассматривается как рабочий, и на его основе формируется команда на практическую реализацию в *ПС*.

Верификация является комплексной процедурой, в основе которой лежит *имитационное моделирование* процессов, протекающих в *ВПС*. На отдельных этапах *имитационного моделирования* осуществляется локальная *оптимизация* с применением таких методов, как линейное программирование, динамическое программирование и т. д. Выбор конкретного метода зависит от типа текущей задачи.

Имитационное моделирование позволяет выделить из общей задачи моделирования отдельные локальные, для решения которых могут быть применены указанные методы. Целью этого этапа является попытка находжений в рамках сгенерированной текущей конфигурации *ВПС* наилучшего варианта с точки зрения объемов используемых в ней производственных ресурсов при обеспечении заданных условий.

Если наилучший полученный вариант конфигурации не соответствует заданным условиям, происходит *ранжирование сгенерированной популяции*. На основе ранжированной популяции осуществляется формирование новой популяции, и далее процесс повторяется до получения рабочего варианта.

После получения массивов данных о технологических операциях, выполнение которых в том или ином составе и последовательности обеспечивает выполнение *ПЗ*, необходимо формирование окончательных маршрутов их выполнения и последовательности запуска в *ВПС*.

Эта задача является сложной в виду высокой вычислительной мощности вследствие высокой размерности. Как показывают исследования, при решении подобных задач следует применять методы *эволюционного поиска* рационального решения.

Одним из таких методов является метод на основе использования *генетических алгоритмов*. Согласно методу *генетических алгоритмов*, возможные решения представляются в виде набора *хромосом* (популяций). Процесс **формирования хромосом** может осуществляться двумя способами. *При первом способе* в качестве генов используются непосредственно проектируемые параметры. Тогда каждому локусу соответствует одна технологическая операция, а генами являются операции из маршрута выполнения *ПЗ*. Значением *i*-го гена будет технологическая операция, выполняемая *i*-й в маршруте обработки.

При втором способе генами являются не параметры технологического процесса (проектируемые параметры), а номера эвристик, используемых для определения последовательности технологического маршрута.

Такой подход получил название **метод комбинирования эвристик**. Этот метод предполагает поиск последовательности эвристик, обеспечивающий оптимальный вариант технологических маршрутов и их состав. При использовании указанного метода число требующихся генов в *хромосоме* в два раза меньше, чем при использовании первого способа. Если число используемых эвристик равно *K*, то мощность *W* множества возможных *хромосом* составляет

$$W = K^N \quad (17.2)$$

где *N* — число наименований элементов, составляющих *ПЗ*.

Для организации алгоритма поиска рабочего варианта распределения *ТП* в *ВПС* вводят ограничения целевой функции.

1. Задействовать минимальное число слоев *ОПС*, т. к. в этом случае сокращается объем транспортных расходов, уменьшается количество договоров и производственных связей.

2. Выполнение заданных сроков, т. к. срыв сроков недопустим.

3. Обеспечение минимальной себестоимости.

Для решения поставленной задачи используются следующие эвристики.

Эвристики для выбора очередной технологической операции:

1. Выбирается *ПЗ* с наиболее "коротким" сроком.

2. Выбирается *ПЗ*, требующее использования нетипичных видов обработки (например размерная: электрохимическая, лазерная и т. д.).

3. Выбирается *ПЗ* с наименьшим временем окончания обслуживания на предыдущей стадии.

4. Выбирается *ПЗ* с наименьшей длительностью выполнения очередной операции.

5. Выбирается *ПЗ* с наибольшей длительностью выполнения очередной операции.

6. Выбирается *ПЗ* с аналогичной выполняемой операцией на данном виде технологического оборудования.

Эвристики для выбора *ПС*:

1. Выбирается *ПС*, в которой есть возможность выполнения необходимых специфических технологических операций (размерная обработка: лазерная, химическая, электроэрозионная и т. д.).

2. Выбирается *ПС*, в которой есть возможность осуществления всего необходимого набора технологических операций.

3. Выбирается *ПС*, в которой выполнение *ПЗ* будет иметь минимальную себестоимость.

4. Выбирается *ПС*, в которой выполнение очередной операции *ПЗ* закончится раньше, чем в других.

5. Выбирается *ПС*, в которой время выполнения очередной операции минимально.

Полученные две группы эвристик обозначим, соответственно, символами *A* и *B*. Тогда каждую эвристику первой группы обозначим как *A1*, *A2*, ..., *A6*, а каждую эвристику второй группы обозначим как *B1*, *B2*, ..., *B5*. Используя разработанные эвристики в их обозначениях, формируют комбинации из 30 возможных вариантов:

Таблица 17.1.

$E1 = (A1, B1)$	$E2 = (A1, B2)$	$E3 = (A1, B3)$	$E4 = (A1, B4)$	$E5 = (A1, B5)$
$E6 = (A2, B1)$	$E7 = (A2, B2)$	$E8 = (A2, B3)$	$E9 = (A2, B4)$	$E10 = (A2, B5)$
$E11 = (A3, B1)$	$E12 = (A3, B2)$	$E13 = (A3, B3)$	$E14 = (A3, B4)$	$E15 = (A3, B5)$
$E16 = (A4, B1)$	$E17 = (A4, B2)$	$E18 = (A4, B3)$	$E19 = (A4, B4)$	$E20 = (A4, B5)$
$E21 = (A5, B1)$	$E22 = (A5, B2)$	$E23 = (A5, B3)$	$E24 = (A5, B4)$	$E25 = (A5, B5)$
$E26 = (A6, B1)$	$E27 = (A6, B2)$	$E28 = (A6, B3)$	$E29 = (A6, B4)$	$E30 = (A6, B5)$

Использование метода комбинирования эвристик предусматривает формирование популяции *хромосом*, состоящей из генов — аналогов каждой из перечисленных в таблице 17.1 комбинаций эвристик. Размер каждой *хромосомы* определяется числом задействованных единиц технологического оборудования в *ВПС*. Размер популяции определяется количеством *ПЗ*. Структура популяции на некотором промежуточном этапе имеет следующий вид (таблица 17.2):

Таблица 17.2.

	1	2	3	...	m-1	m
1	E3	E8	E20	...	E4	E5
2	E18	E23	E29	...	E30	E23
...
n	E26	E22	E13	...	E9	E20

На основании анализа эволюции *хромосом* от популяции к популяции производится модификация конфигурации *ВПС*. Если в результате эволюции формируется рабочий вариант, удовлетворяющий целевой функции, производится попытка исключения из состава *ВПС* технологического оборудования, или даже целой *РПС*, использованию которой соответствуют эвристики, минимально повторяющиеся в последовательности генов *хромосомы*.

В случае, если в результате эволюционных преобразований не удастся получить работоспособный вариант, в состав формируемой *ВПС* вводят дополнительные единицы технологического оборудования используемых *РПС*, или элементы других, не используемых до этого частей *РПС*, но которые отвечают эвристикам, максимально часто встречающимся в последовательности генов *хромосомы*.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.intuit.ru